

ничном слое (ламинарная пленка + переходной слой) скорости течения изменяются так же, как при ламинарном режиме движения. В переходной зоне зарождаются вихри, обусловленные увеличением скорости движения и влиянием выступов шероховатости. Причем если выступы шероховатости меньше ламинарной пленки, то стенка будет гидравлически гладкой. Если же величина выступов будет превышать толщину ламинарной пленки, то неровности стенок будут увеличивать беспорядочность движения и стенка будет гидравлически шероховатой.

Возникающие в пограничном слое вихри проникают в центральную часть потока и образуют ядро турбулентного течения. В ядре турбулентного течения происходит интенсивное и непрерывное перемешивание частиц жидкости, возникают дополнительные напряжения, обусловленные турбулентностью потока.

Глава 5. ПОТЕРИ НАПОРА (УДЕЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ) ПРИ РАВНОМЕРНОМ ДВИЖЕНИИ ЖИДКОСТИ

Сопротивления, возникающие при движении жидкости, называются *гидравлическими сопротивлениями*. На преодоление этих сопротивлений тратится некоторая часть удельной энергии движущейся жидкости, которую называют *потерей удельной энергии*, или *потерей напора*.

В уравнении Бернулли для потока реальной жидкости потери напора обозначаются h_w .

Все гидравлические сопротивления разделяются на два вида: сопротивления по длине потока и местные сопротивления.

Гидравлические сопротивления по длине потока обуславливаются действием сил трения. Местные гидравлические сопротивления обуславливаются местным препятствием потоку жидкости в виде изгиба трубы, внезапного сужения или расширения русла, при обтекании клапанов, решеток, диафрагм, кранов, которые деформируют обтекающий их поток.

Таким образом, потери напора при движении жидкости будут равны сумме потерь напора на трение, вызванных гидравлическими сопротивлениями по длине потока и потерь напора на местные сопротивления, т. е.

$$h_w = h_{тр} + h_m.$$

5.1. ОСНОВНОЕ УРАВНЕНИЕ РАВНОМЕРНОГО ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ

Как уже указывалось выше, *равномерным движением жидкости* называют такое движение, при котором все живые сечения по длине потока одинаковы как по форме, так и по раз-

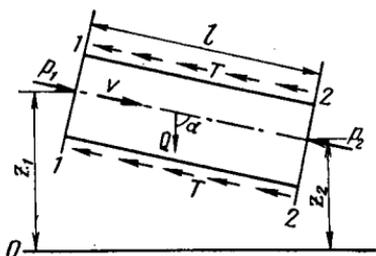


Рис. 1.30. К выводу уравнения равномерного движения жидкости.

мерам и скорости в соответственных точках живых сечений одинаковы.

Примером равномерного движения жидкости может служить движение жидкости в трубопроводах с постоянным расходом по длине.

Рассмотрим часть равномерно движущегося потока (рис. 1.30) при допущении одинаковости скорости движения частиц по всему живому сечению. Это допущение

упрощает решение поставленной задачи, дает возможность учесть только сопротивления трения потока о стенки трубы или русла и не учитывать сопротивления трения между частицами движущейся жидкости. В данном случае потери напора вызываются лишь гидравлическими сопротивлениями по длине потока, т. е. $h_w = h_{тр}$.

Запишем уравнение Бернулли для двух сечений 1—1 и 2—2 выделенного из потока участка относительно плоскости сравнения 0—0:

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + h_{тр} \quad (1.102)$$

или с учетом равенства скоростей

$$h_{тр} = \left(z_1 + \frac{p_1}{\gamma} \right) - \left(z_2 + \frac{p_2}{\gamma} \right), \quad (1.103)$$

т. е. при равномерном движении потока потери напора по длине равны разности удельных потенциальных энергий.

Для вычисления этой разности рассмотрим действие внешних сил на выделенную часть потока и составим сумму проекций всех действующих сил на ось потока:

$$P_1 - P_2 + Q \cos \alpha - T = 0, \quad (1.104)$$

где P_1 и P_2 — силы давления соответственно на сечения 1—1 и 2—2; Q — сила тяжести выделенной части потока; T — сила трения потока о стенки трубы или русла.

Подставив значения слагаемых уравнения (1.104), получим

$$p_1 \omega - p_2 \omega + \gamma \omega l \frac{z_1 - z_2}{l} - \tau \chi l = 0. \quad (1.105)$$

Разделив полученное уравнение на $\gamma\omega$, будем иметь

$$\left(z_1 + \frac{p_1}{\gamma}\right) - \left(z_2 + \frac{p_2}{\gamma}\right) = \frac{\tau l}{\gamma R}. \quad (1.106)$$

Так как левая часть уравнения (1.106) равна $h_{\text{тр}}$, то окончательно получим

$$h_{\text{тр}} = \frac{\tau l}{\gamma R}. \quad (1.107)$$

Выражение (1.107) — основное уравнение равномерного движения жидкости.

5.2. ПОТЕРИ НАПОРА ПО ДЛИНЕ В КАНАЛАХ

В каналах круглого сечения. Запишем формулу (1.98) в несколько ином виде, т. е. подставим значения $r_0 = d/2$ и

$I = \frac{p_1 - p_2}{\gamma}$, и тогда получим уравнение

$$\frac{v}{\gamma} = \frac{1}{32} \frac{p_1 - p_2}{\gamma \mu l} d^2 \quad (1.108)$$

и решим его относительно I :

$$I = \frac{32\mu v R}{\gamma d^2}. \quad (1.109)$$

Левая часть полученного уравнения представляет собой потери напора в трубопроводе между сечениями 1—1 и 2—2:

$$h_{\text{тр}} = \frac{32\mu v l}{\gamma d^2}. \quad (1.110)$$

Умножив числитель и знаменатель на $v/2$ и заменив $\gamma = \rho g$, получим

$$h_{\text{тр}} = \frac{64\mu v^2 l}{2\rho g v d d}. \quad (1.111)$$

Выполнив замену $\frac{\mu}{\rho} = \nu$ и $\frac{v}{vd} = \frac{1}{\text{Re}}$, получим

$$h_{\text{тр}} = \frac{64}{\text{Re}} \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g}. \quad (1.112)$$

Это формула для определения потерь напора при ламинарном режиме движения жидкости.

Обозначив $64/\text{Re}$ через λ , получим формулу Дарси—Вейсбаха в окончательном виде:

$$h_{\text{тр}} = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g}, \quad (1.113)$$

где λ — так называемый коэффициент гидравлического трения по длине (коэффициент Дарси). Величина безразмерная. Для ламинарного режима движения жидкости $\lambda = 64/Re$.

В каналах некруглого сечения. Формулу для определения потерь напора по длине в каналах некруглого сечения можно получить из основного уравнения равномерного движения жидкости (1.107). Для этого необходимо принять, как это предложил Шези, величину τ/γ пропорциональной квадрату скорости:

$$\frac{\tau}{\gamma} = \frac{1}{C^2} v^2, \quad \text{или} \quad (1.114)$$

$$h_{\text{тр}} = \frac{v^2 l}{C^2 R}, \quad (1.115)$$

где $1/C^2$ — коэффициент пропорциональности.

Решая выражение (1.115) относительно v , получим

$$v = C \sqrt{R I}, \quad (1.116)$$

где $I = h_{\text{тр}}/l$ — гидравлический уклон.

Формула (1.116) носит название *формулы Шези*, а коэффициент C называется *коэффициентом Шези* (C — начальная буква фамилии автора *Chezy*).

Размерность коэффициента Шези $\frac{m^{1/2}}{c}$.

По формуле Шези главным образом производится гидравлический расчет сооружений с безнапорным движением жидкости.

Однако практически удобнее иметь коэффициент C безразмерной величиной. С этой целью позднее была предложена замена

$$C = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}}, \quad (1.117)$$

где λ — коэффициент гидравлического трения по длине.

Подставив предложенную замену в формулу (1.115), получим

$$h_{\text{тр}} = \lambda \frac{l}{4R} \frac{v^2}{2g}. \quad (1.118)$$

Для трубопровода круглого сечения $4R = d$. Произведя соответствующую замену, получим известную формулу Дарси—Вейсбаха (1.113).

5.3. КОЭФФИЦИЕНТ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ТРЕНИЯ

Коэффициент гидравлического трения λ в большей степени зависит от шероховатости труб. Изучению этого явления посвящено много экспериментальных и теоретических исследова-

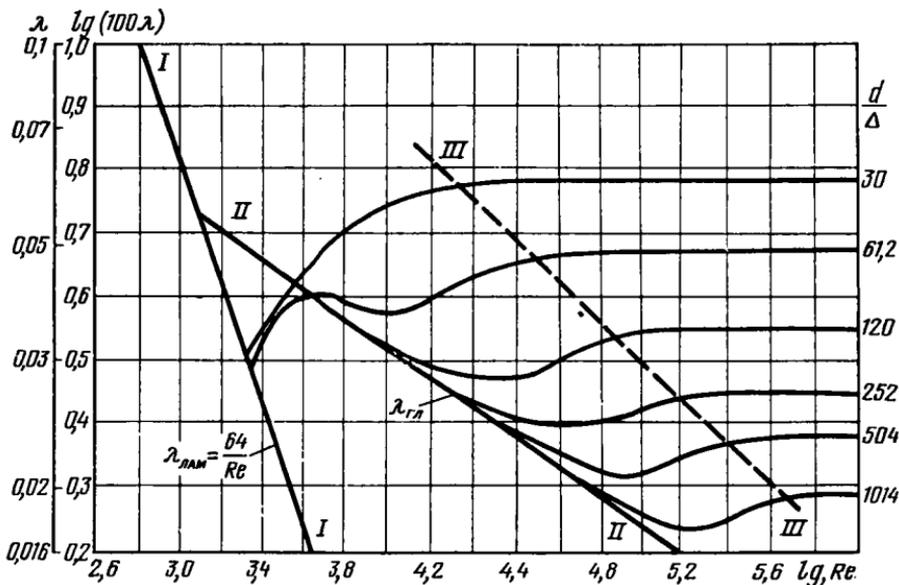


Рис. 1.31. График Никурадзе.

дований. Первыми из них были опыты И. Никурадзе, проведенные в 20-е годы в Германии. По результатам опытов был построен график зависимости в координатах $\lg 100 \lambda$ и $\lg Re$ при значениях относительной шероховатости труб $\frac{\Delta_{\text{экр}}}{D} \cdot 10^3$ от 0,98 до 33,33 (рис. 1.31).

Из графика видно, что при напорном движении в трубах существует 5 различных областей сопротивления: 1 область при $Re < 2320$ ($\lg Re < 3,36$) характеризует ламинарный режим движения; 2 область при $2320 < Re < 4000$ ($3,36 < \lg Re < 3,6$) характеризует скачкообразный переход от ламинарного режима к турбулентному; 3 область характеризует турбулентный режим движения жидкости по гидравлически гладким трубам (в этом случае $\lg \lambda$ изменяется по пологой прямой II); 4 область представляет собой переход от области движения по гидравлически гладким трубам к квадратичной области (область между линиями II и III); 5 область характеризует турбулентный режим с квадратичной областью сопротивления (область правее линии III).

Квадратичная область сопротивления указывает, что коэффициент гидравлического трения λ в этой области не зависит от Re , а потери напора по длине зависят от квадрата средней скорости.

И. Никурадзе проводил опыты в трубах с однородной искусственной шероховатостью. Однако применяемые на практике трубы имеют шероховатость неоднородную и неравномерную. С целью выяснения влияния различной шероховатости на λ были дополнительно проведены экспериментальные исследования, в результате которых получен ряд эмпирических формул. Приведем некоторые из них.

Для гидравлически гладких труб при $Re < 70\,000$ дает хорошие результаты формула П. Блазиуса

$$\lambda = 0,3164/Re^{0,226}. \quad (1.119)$$

Для гидравлически гладких труб применяется также формула Ф. А. Шевелева

$$\lambda = 0,25/Re^{0,226}.$$

Для гидравлически шероховатых (стальных, чугунных) труб применяются формулы Ф. А. Шевелева:

$$\text{при } v \geq 1,2 \text{ м/с } \lambda = 0,021/d^{0,3}; \quad (1.120)$$

$$\text{при } v < 1,2 \text{ м/с } \lambda = (1,5 \cdot 10^{-4}/d + 1/Re)^{0,3}. \quad (1.121)$$

Для четвертой области сопротивления, когда коэффициент λ зависит и от Re и от относительной шероховатости, справедлива формула А. Д. Альшуля

$$\lambda = 0,11 (k_s/d + 68/Re)^{0,25}, \quad (1.122)$$

где k_s — эквивалентная шероховатость, т. е. такая равномерная шероховатость, которая дает при подсчете одинаковую с заданной шероховатостью величину λ .

Трубы	k_s , мм
Стальные цельнотянутые (новые)	0,02...0,05
Те же (бывшие в эксплуатации)	0,15...0,3
Стальные сварные (новые)	0,04...0,1
Чугунные (новые)	0,25...1
Чугунные и стальные (бывшие в эксплуатации)	0,8...1,5
Асбестоцементные (новые)	0,05...0,1
Те же (бывшие в эксплуатации)	0,6
Бетонные и железобетонные	0,3...0,8

5.4. МЕСТНЫЕ ПОТЕРИ НАПОРА

Общие сведения. Местные потери напора возникают вследствие изменения величины или направления скорости движения жидкости на отдельных участках трубопровода (внезапное расширение или сужение потока, резкие повороты, при про-

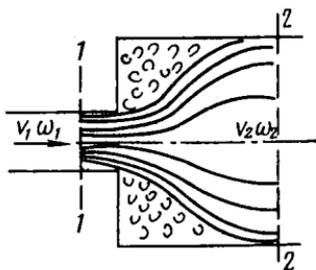


Рис. 1.32. Внезапное расширение.

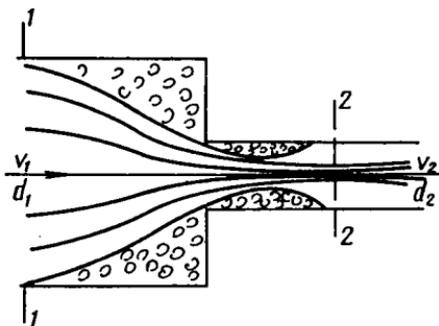


Рис. 1.33. Внезапное сужение.

текании через задвижки, вентили, сетки и т. д.). В результате этого часть напора удельной энергии затрачивается на преодоление сопротивлений движению жидкости, вызванных трением внутри жидкости, а другая часть механической энергии переходит в тепловую.

Экспериментальные исследования, проведенные Борда и Беланже, показали, что в турбулентном потоке местные потери напора пропорциональны квадрату скорости в сечении за местным сопротивлением, т. е.

$$h_m = \xi \frac{v^2}{2g}, \quad (1.123)$$

где ξ — коэффициент местного сопротивления; v — средняя скорость потока в сечении за местным сопротивлением.

Рассмотрим наиболее часто встречающиеся виды местных сопротивлений.

Внезапное расширение трубопровода. Рассмотрение местных сопротивлений целесообразно начать с наиболее часто встречающегося на практике случая внезапно расширяющегося трубопровода (рис. 1.32). Как показывают опыты, поток, выходя из узкой трубы в широкую, расширяется постепенно. В месте расширения между транзитной струей и стенками трубы образуется кольцевая вихревая зона. Возросшие силы трения при деформации потока и вращающиеся вальцы в вихревой зоне вызывают значительные потери удельной энергии или напора, которые можно подсчитать по формуле Борда

$$h_{в.р} = \frac{(v_1 - v_2)^2}{2g}, \quad (1.124)$$

где v_1 и v_2 — средние скорости движения потока соответственно в сечениях 1-1 и 2-2.

Или с учетом уравнения неразрывности $v_1\omega_1=v_2\omega_2$ можно представить величину потерь напора в зависимости от скоростей v_1 и v_2 :

$$h_{в.р} = \left(1 - \frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^2 \frac{v_1^2}{2g};$$

$$h_{в.р} = \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} - 1\right)^2 \frac{v_2^2}{2g}. \quad (1.125)$$

Отсюда коэффициенты сопротивления при внезапном расширении потока равны:

$$\xi_{в.р.1} = \left(1 - \frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^2; \quad \xi_{в.р.2} = \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} - 1\right)^2. \quad (1.125')$$

Внезапное сужение трубопровода. При внезапном сужении (рис. 1.33), так же как и при внезапном расширении, в месте сужения между транзитной струей и стенками трубы образуется кольцевая вихревая зона, которая и вызывает потери напора. Коэффициент сопротивления $\xi_{в.с}$ может быть приближенно найден по формуле И. Е. Идельчика при $d_2 < 0,5 d_1$:

$$\xi_{в.с} = 0,5 \left(1 - \frac{d_2^2}{d_1^2}\right) \quad (1.126)$$

и по формуле А. Д. Альтшуля при $d_2 > 0,5 d_1$:

$$\xi_{в.с} = \left(\frac{1}{0,57 + \frac{0,043}{1,1 - d_2^2/d_1^2}} - 1\right)^2 \quad (1.127)$$

или по опытным данным Вейсбаха.

d_2/d_1	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
$\xi_{в.с}$	0,5	0,49	0,46	0,43	0,4	0,35	0,29	0,22	0,14	0

Вход из резервуара в трубу. Этот случай можно рассматривать как внезапное сужение по формуле (1.126) при $d_2 \ll d_1$, т. е. $d_2 \approx 0$, тогда $\xi_{вх} = 0,5$.

Плавный поворот трубы до 90° (рис. 1.34). При изменении направления движения потока действуют центробежные силы, в результате влияния которых возникает поперечная циркуляция в потоке, а линии тока становятся винтообразными. Это приводит к большим потерям напора, чем на прямолинейных участках. Коэффициент сопротивления плавного поворота $\xi_{пов}$ зависит от отношения диаметра трубы d к радиусу закругления R .

d/R	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
$\xi_{пов}$	0,14	0,15	0,16	0,18	0,21	0,24	0,29	0,44	0,66	0,98	1,41	1,98

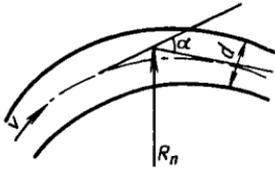


Рис. 1.34. Плавный поворот трубы.

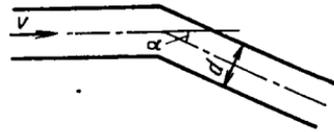


Рис. 1.35. Резкий поворот трубы.

Резкий поворот трубы (рис. 1.35). Значения коэффициента сопротивления принимаются в зависимости от угла поворота α .

α , град	30	40	50	60	70	80	90
$\zeta_{пов}$	0,2	0,3	0,4	0,55	0,7	0,9	1,1

Диафрагма (рис. 1.36) в виде диска с отверстием применяется для измерения расхода жидкости в трубах. Коэффициент сопротивления диафрагмы ζ_d зависит от отношения площади отверстия ω_0 к площади сечения ω_1 .

ω_0/ω_1	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
ζ_d	245	51,5	18,2	8,25	4,0	2,0	0,97	0,42	0,13	0

Задвижка (рис. 1.37). Для задвижки коэффициент сопротивления ζ_s зависит от степени перекрытия сечения трубы, которая характеризуется отношением высоты перекрытия a к диаметру трубопровода d .

a/d	0,875	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0
ζ_s	97,8	35	10	4,6	2,06	0,98	0,44	0,17	0,06	0,05

Значение коэффициентов сопротивления для других видов местных сопротивлений можно найти в справочниках по гидравлике.

Суммарные потери. Большинство коэффициентов местных сопротивлений ζ_m относится к турбулентному движению с числами Рейнольдса > 5 ($10^3 \dots 10^4$), когда влияние вязкости оказывается незначительным. При движении жидкости с малыми числами Рейнольдса коэффициенты местных сопротивлений зависят

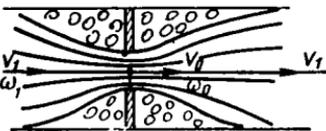


Рис. 1.36. Диафрагма.

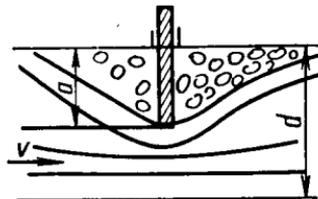


Рис. 1.37. Задвижка.

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

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

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.