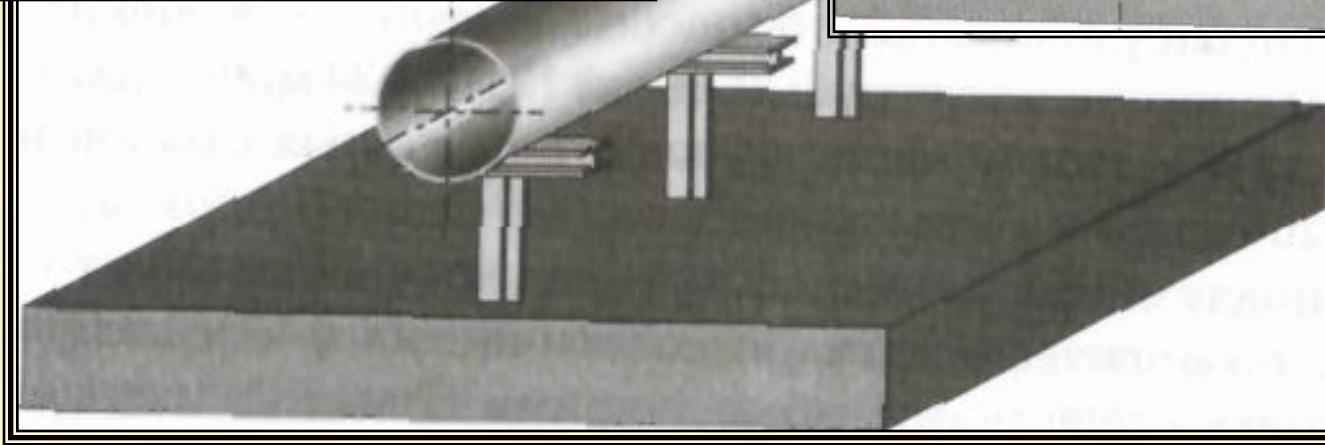
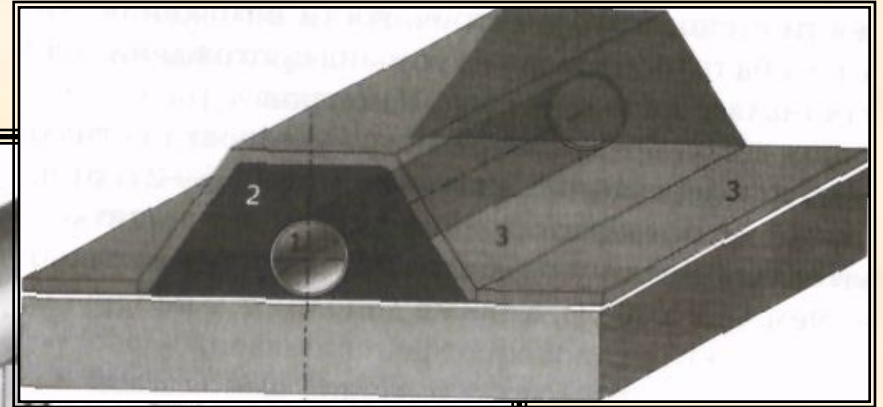
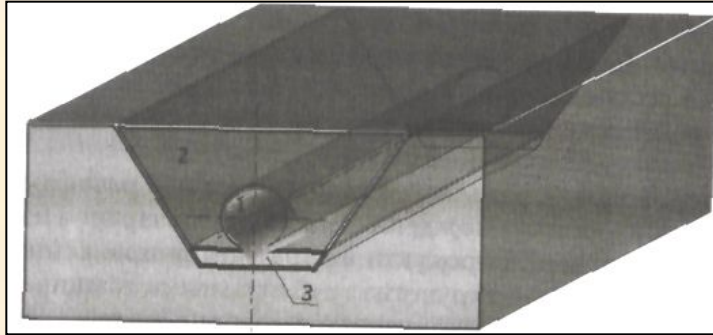


Основы расчета трубопроводов



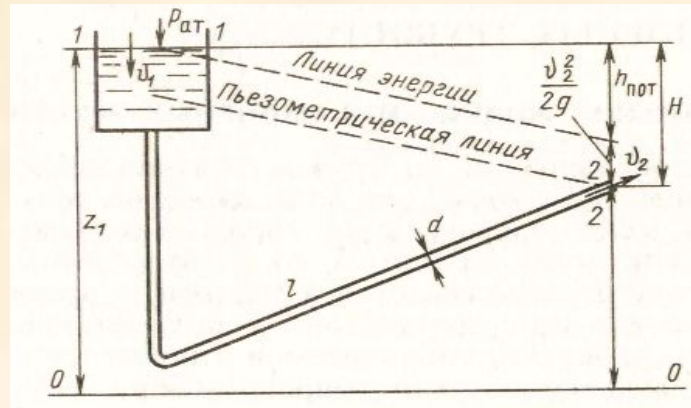
Гидравлика

*составитель доцент кафедры ГИГЭ ИГНД ТПУ
Крамаренко В.В.*

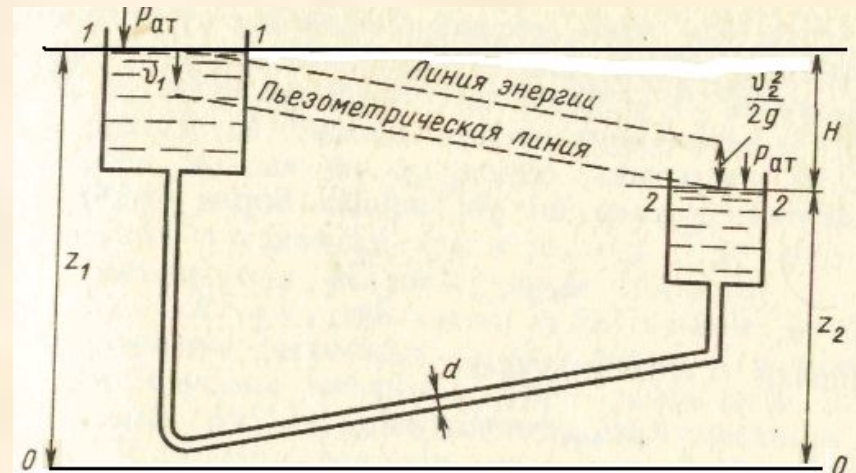
Основы расчета трубопроводов

- Трубопроводы широко применяются для перемещения 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 соотношению видов потерь напора выделяют **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, обвязка эксплуатационных нефтяных скважин, сифоны и т. д.
- **Длинные** трубопроводы – это трубопроводы, у которых местные потери напора незначительны и не превышают 5-10% от потерь напора по длине, к ним относятся водопроводы, участки магистральных нефтепроводов. При расчете длинных трубопроводов находят потери напора по длине h_l , затем увеличивают их на 5-10%.
- По конструкции 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.

- Для расчета простого короткого трубопровода при установившемся истечении жидкости в атмосферу составим уравнение Бернулли для сечений 1–1 и 2–2 (скорости v_1 и v_2 взяты в соответствующих сечениях):
- $z_1 + p_1/\gamma + v_1^2/(2g) = z_2 + p_2/\gamma + v_2^2/(2g) + h_w$
- Обозначая $z_1 - z_2 = H$ (действующий напор) и пренебрегая скоростным напором в резервуаре $v_1^2/(2g)$, так как он мал по сравнению $v_2^2/(2g)$, получим
- $H = v_2^2/(2g) + h_w$.
- Т.о., действующий напор при истечении в атмосферу расходуется на создание кинетической энергии потока на выходе и на преодоление потерь напора, которые складываются из потерь по длине и местных потерь
- $h_w = (\lambda l/d + \Sigma \xi) * v^2/2g$.
- В результате подстановки формула примет вид (индекс «2» при скорости v опущен)
- **$H = v^2/2g (1 + \lambda l/d + \Sigma \xi)$.**



- Составим уравнение Бернулли для трубопровода, в котором жидкость изливается из левого резервуара в правый подуровень
- $z_1 + p_1/\gamma + v_1^2/(2g) = z_2 + p_2/\gamma + v_2^2/(2g) + h_w$
- Пренебрегая скоростными напорами в резервуарах $v_1^2/(2g)$ и $v_2^2/(2g)$, и обозначая $z_1 - z_2 = H$, получаем
- $H = h_w = v^2/2g (\lambda l/d + \Sigma \xi)$,
- где v – скорость в трубопроводе.
- В этом уравнении нужно учесть коэффициент потерь напора на выход h_m , определяя потери на расширение потока по теореме Борда:
- $h_m = (v_1 - v_2)^2/2g$
- Принимая $v_2 = 0$, получаем
- $h_{л} = v^2/2g = \xi_{вых}(v^2/2g)$,
- где $\xi_{вых} = 1$.
-
- Тогда, выводя из-под знака суммы $\xi_{вых} = 1$, запишем в виде:
- $H = v^2/2g (1 + \lambda l/d + \Sigma \xi)$.
-



- При расчете длинных трубопроводов местными сопротивлениями и скоростным напором на выходе пренебрегают и уравнение приобретает вид:
- $H = h_{\lambda} = \lambda l / d * v^2 / 2g$
- Т.е. напор в трубопроводе равен сумме потерь напора по длине, определяемых по формуле Дарси-Вейсбаха.
- Запишем формулу относительно скорости в трубопроводе, подставив в нее диаметр трубы, выраженный через гидравлический радиус $d = 4R$, и гидравлический уклон $i = h_{\lambda} / l$.
- $v = \frac{C \sqrt{8g\lambda}}{\sqrt{Ri}}$, обозначив $C = \frac{1}{\sqrt{\lambda}}$, получим формулу Шези
- $v = \frac{C \sqrt{8g\lambda}}{\sqrt{Ri}}$
- Расход в трубопроводе определяется по формуле:
- $Q = vW = W C \sqrt{8g\lambda}$

- Произведение $wC\sqrt{Ri}$ обозначают буквой K и называют *расходной характеристикой трубопровода*, тогда уравнение имеет вид
- $Q = K\sqrt{i}$.
- Размерность K такая же, как и расхода. Численно значение равно расходу при уклоне, равном единице.
- Величина $l/K^2 = A$ называется удельным сопротивлением.
- Потери напора по длине с помощью этих параметров выражаются
- $h_{л} = AlQ^2 = lQ^2/K^2$.

Типы задач при расчете трубопроводов

- При расчете трубопровода возможны три основные постановки задачи.
- **Задача 1 типа.** При известном диаметре (d), длине (L), и заданном расходе (Q) требуется определить необходимый напор (H).
- При решении использовать уравнение
- $H = v^2/2g (1 + \lambda l/d + \Sigma \xi)$.
- Скорость v выражается через расход $v = 4Q/\pi d^2$, тогда
- $H = 16Q^2/(\pi^2 d^5 g) * (1 + \lambda l/d + \Sigma \xi)$.

- **Задача 2 типа.** Зная действующий напор и параметр провода, необходимо определить расход.
- Решая уравнение $H = 16Q^2 / (2p^2 d^4 g) * (1 + \lambda l / d + \Sigma \xi)$.
- относительно Q , находим
- $Q = pd^2 / 4 * (1 + \lambda l / d + \Sigma \xi) = \mu w \sqrt{2gh}$
- $m = 1 / \sqrt{(1 + \lambda l / d + \Sigma \xi)}$

- **Задача 3 типа.** Зная действующий напор, расход и длину трубопровода, следует определить диаметр трубопровода. Для нахождения диаметра решаем относительно d уравнение
- $H = 16Q^2 / (2p^2 d^4 g) * (1 + \lambda l / d + \Sigma \xi)$.
- Напор в этом уравнении имеет сложную зависимость от диаметра. Задача решается обычно или путем подбора, или графоаналитически.
- При решении графоаналитическим методом, подставляя различные значения диаметров в формулу, получают различные значения напора H , затем по полученным данным строят график зависимости H от d . Отложив по оси H заданный действующий напор, проецируют его на кривую зависимости, а затем точку с кривой на ось d получают искомый диаметр.

Частные случаи расчета трубопроводов

Расчет последовательно соединенных трубопроводов

- Последовательно соединенным, называется простой трубопровод, состоящий из участков труб различного диаметра. Расход жидкости во всех трубах одинаков, потери напора различны и равны сумме потерь напора на каждом участке, т. е.

- $H = \sum h_w$.
- Рассмотрим трубопровод, состоящий из n участков. Для каждого участка

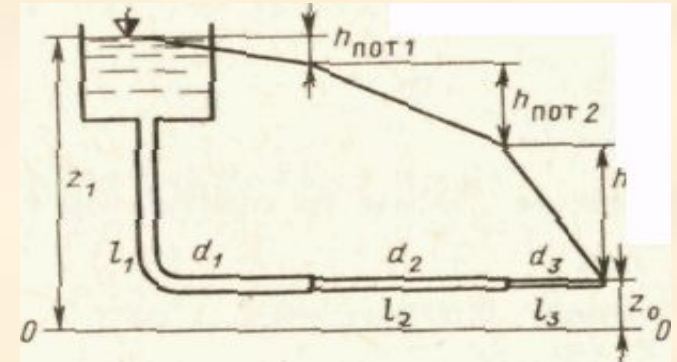
- $Q = K \sqrt{i} = K \sqrt{h_w / l}$, откуда

- $h_w = Q^2 / K^2 * l$.

- Просуммировав такие уравнения для каждого участка получим

- $H = Q^2 (l_1 / K_1^2 + l_2 / K_2^2 + l_3 / K_3^2 + \dots + l_n / K_n^2)$.

- Полученное уравнение позволяет решить 1 тип задач – по известным расходам, длинам и диаметрам участков вычислить напор.
- Если заданы напор, диаметры, длины участков, то можно вычислить расход (2 тип задач)
- Задачу 3 типа при помощи уравнения решить нельзя, так как невозможно определить все диаметры участков при известных прочих данных, так как количество неизвестных n , а уравнение одно. Задав диаметры всех участков, кроме одного, последний можно определить, вычислив его расходную характеристику.



Расчет параллельно соединенных трубопроводов

- Параллельно соединенные трубопроводы относятся к сложным системам. Схема параллельно соединенного трубопровода представлена на **рис.** Пусть в точке *A* трубопровод разветвляется, а в точке *B* его ветви сходятся.
- Длина и диаметр каждой ветви соответственно обозначены $l_1, l_2, \dots, l_{n+1}$ и $d_1, d_2, \dots, d_{n+1}$.
- Потери напора в каждой ветви одинаковы и равны $H=h_w$, так как концы ветвей смыкаются в точках *A* к *B*, в каждой из которых может быть только один напор; кроме того, сумма расходов отдельных ветвей равна магистральному или общему расходу. Исходя из этого, напомним расчетные уравнения для потери напора:
 - для первой ветви $hw = Q_1^2 l_1 / K_1^2$
 - для второй ветви $hw = Q_2^2 l_2 / K_2^2$
 - для *n*-й ветви $hw = Q_n^2 l_n / K_n^2$
- Получается всего *n* уравнений, в которых содержится *n+1* неизвестных, в том числе *n* неизвестных расходов плюс потери напора *hw*. Чтобы найти все неизвестные, надо иметь еще одно уравнение. Напишем уравнение неразрывности для угловых точек *A* или *B* т. е.

$$Q = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n$$
- Имея *n+1* уравнений, можно определить все неизвестные. Расходы определяются по отдельным ветвям в соответствии с зависимостью

$$Q_1/Q_2 = K_1/K_2 \sqrt{l_1/l_2} = \sqrt{A_2 l_2 / A_1 l_1}$$

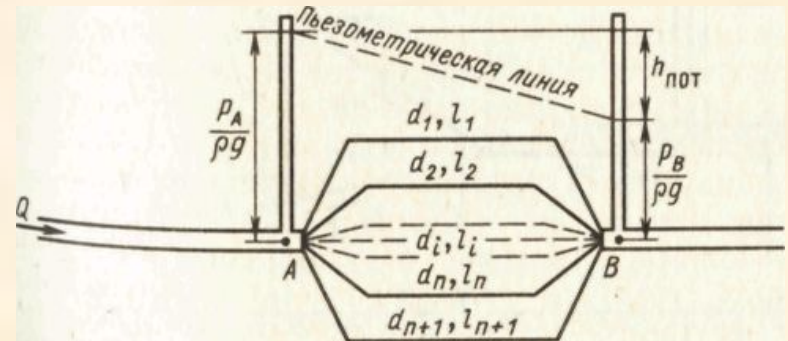
Отсюда

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \sqrt{A_1 l_1 / A_2 l_2},$$

$$\frac{Q_n}{Q_1} = \sqrt{A_1 l_1 / A_n l_n},$$

Тогда

$$Q_1 = Q / \left(1 + \sqrt{A_1 l_1 / A_2 l_2} + \dots + \sqrt{A_1 l_1 / A_n l_n} \right).$$

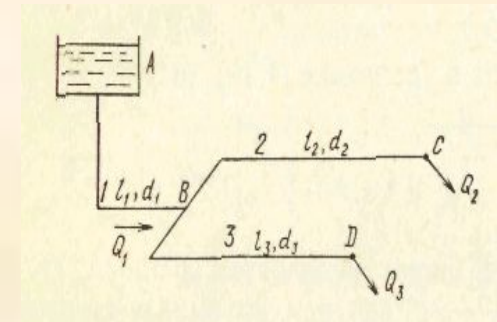


Расчет трубопроводов при непрерывном изменении расхода по пути

- В сложных трубопроводах различают расходы: транзитный, передаваемый по магистрали, и путевой (или попутный), отбираемый по пути движения жидкости.
- Расход называют сосредоточенным, если точки отбора находятся на значительном расстоянии друг от друга, и непрерывным, если эти точки расположены очень близко друг другу. Понятие “непрерывный расход” обычно используют при расчете водопроводных сетей.
- При непрерывной раздаче жидкости по пути, т.е. в тех случаях, когда жидкость из трубопровода расходуется во многих точках, потерю напора определяют по формуле
- $H = Q_0^2 l / (3K^2) = A l Q_0^2 / 3,$
- где Q_0 – начальный расход, непрерывно и равномерно расходуемый по длине трубы.
- Если часть расхода по трубе проходит транзитом Q_{mp} , а часть расходуется непрерывно и равномерно составит по длине трубы Q_0 , общая потеря напора
- $H = l / K^2 * (Q_A^2 - Q_A Q_0 + Q_0^2 / 3),$
- где Q_A – начальный общий расход в трубе
- $Q_A = Q_{mp} + Q_0$

Расчет разветвленного трубопровода

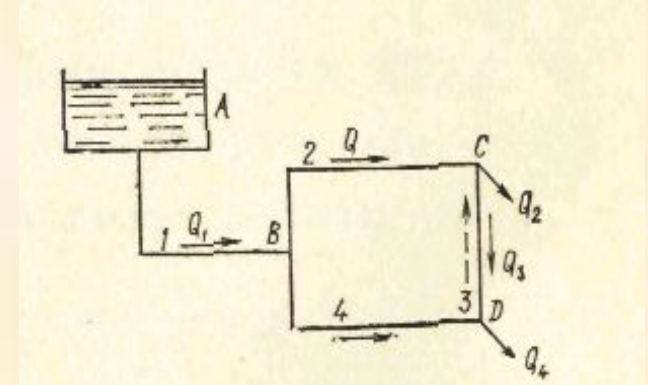
- Тупиковый трубопровод, показанный на рис., состоит из магистрального трубопровода l , питаемого от резервуара A , и двух ответвлений 2 и 3 , в конце которых в точках C и D происходит отбор расхода жидкости, вытекающей в атмосферу.
- Основными задачами при гидравлическом расчете разветвленной сети можно считать определение конечных расходов Q_2 и Q_3 при заданном напоре H в начальном сечении или определение потерь напора при заданных конечных расходах Q_2 и Q_3 . В качестве примера рассмотрим первую задачу.
- Так как участки 1 и 2 соединены последовательно, то суммарные потери напора на участке $A C$ равны
- $H = H_1 + H_2$.
- Аналогично для участков 1 и 3 на пути AD имеем
- $H = H_1 + H_3$.
- Учитывая формулу $H = A_l Q^2$, эти уравнения можно переписать в виде:
- $H = A_1 l_1 Q_1^2 + A_2 l_2 Q_2^2$; (1)
- $H = A_1 l_1 Q_1^2 + A_3 l_3 Q_3^2$. (2)
- Вычитая из первого уравнения второе, получим
- $A_2 l_2 Q_2^2 = A_3 l_3 Q_3^2$. (3)
- Так как участки 2 и 3 имеют в начале общую точку B , а истечение жидкости из точек C и D происходит в атмосферу, то можно считать, что участки 2 и 3 соединены параллельно, следовательно
- $Q_1 = Q_2 + Q_3$. (4)
- Из равенства (3) следует, что
- $Q_3 = Q_2 \cdot \sqrt{(A_2 l_2 / A_3 l_3)}$
- Подставляя последнюю формулу в равенство $(Q_1 = Q_2 + Q_3)$, получим
- $Q_1 = Q_2 (1 + \sqrt{(A_2 l_2 / A_3 l_3)})$
- С учетом этого равенства по уравнению (1) определяется конечной расход Q_2 , при заданном напоре H , а расход Q_3 определяется по формуле (4)



- В том случае, если точки C и D расположены в разных горизонтальных плоскостях, то аналогичная система уравнений получает вид:
- $z_a - z_c = A_1 l_1 Q_1^2 + A_2 l_2 Q_2^2,$
- $z_a - z_D = A_1 l_1 Q_1^2 + A_3 l_3 Q_3^2.$
- Откуда
- $z_c + A_2 l_2 Q_2^2 = z_D + A_3 l_3 Q_3^2.$
- Кроме того, имеем
- $Q_1 = Q_2 + Q_3.$
- Решая эти уравнения аналогично изложенному выше, находим концевые расходы Q_2 и Q_3 .
- Обычно требуется определить диаметр прокладываемых труб и высоту водонапорной башни. Для этого по заданным расходам Q_1 , Q_2 и $Q = Q_1 + Q_2$ и допускаемым скоростям в трубах рассчитывается диаметр труб. Затем по принятому диаметру труб определяются потери напора на участках ответвлений и на магистральном участке. Далее потери напора на том ответвлении, где они имеют большее значение, суммируются с потерями напора на магистральном участке и таким образом, находятся общие потери, а по ним из уравнений с учетом геометрических высот можно определить и высоту башни.

Расчет кольцевого трубопровода

- Рассмотрим простейший случай кольцевого трубопровода, состоящего из одного кольца и имеющего две точки отбора воды C и D . Основной расчетной задачей кольцевой сети будем считать определение напора H при заданных расходах в точках отбора Q_2 и Q_3 , расположении трубопровода, длинах отдельных участков и диаметрах всех труб.
- Решение этой задачи затруднено тем, что неизвестны ни расход, ни направление потока на замыкающем участке кольца между точками C и D . Если, например, течение происходит от точки C к точке D , то расход на участке 2 $Q = Q_2 + Q_3$, а если течение происходит от точки D к точке C , то $Q_1 = Q_2 - Q_3$.
- В связи с этим при гидравлическом расчете кольцевой сети прежде всего намечают **точку схода**. *Точкой схода называется узел кольцевой сети, к которому жидкость притекает с двух сторон*. Эта точка характерна тем, что потери напора от магистральной узловой точки B до нее одинаковы по обоим полукольцам.
- Пусть точкой схода будет точка D , тогда, мысленно размыкая кольцо в этой точке, получим трубопровод, имеющий простое разветвление в точке B , гидравлический расчет которого изложен выше.
- Таким образом, расчет кольцевого трубопровода сводится к следующему. Прежде всего задаются направлением движения жидкости и назначают точку схода, затем пользуясь таблицами, определяют потери напора по участкам сети. Если точка схода была назначена правильно, то сумма потерь напора в полукольцах должна быть одинакова.
- $h_2 + h_3 = h_4$
- Разница в потерях напора по полукольцам (*невязка*) допускается не более 5% суммы потерь напора по длине полукольца. Если указанное условие не выполняется, следовательно, точка схода назначена неверно, и ее переносят в ту сторону, где потери оказались больше. Методом повторных попыток добиваются равенства потерь.



Расчет сифона

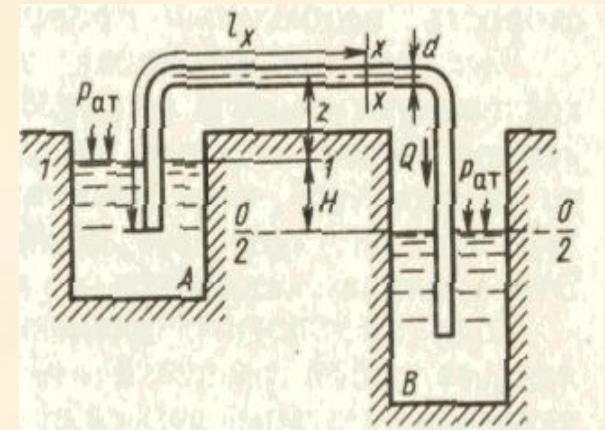
- Составим уравнение Бернулли для сечений 1–1 и 2–2, взяв за плоскость отсчета плоскость 0–0, совпадающую с 2–2:
- $H + p_{at}/\rho g + v_1^2/(2g) = 0 + p_{at}/\rho g + v_2^2/(2g) + h_w$.
- Пренебрегая скоростными напорами в резервуарах, получаем

- $H = h_w = v^2/2g * (1 + \Sigma \lambda * l/d + \Sigma \xi)$
- где v – скорость движения воды в сифоне; $\Sigma \lambda$ – сумма коэффициентов сопротивлений по длине на восходящем, на горизонтальном и на нисходящем участках. Если диаметр на всех участках сифонной трубы один и тот же, то

$$\Sigma \lambda * l/d = \lambda l/d,$$

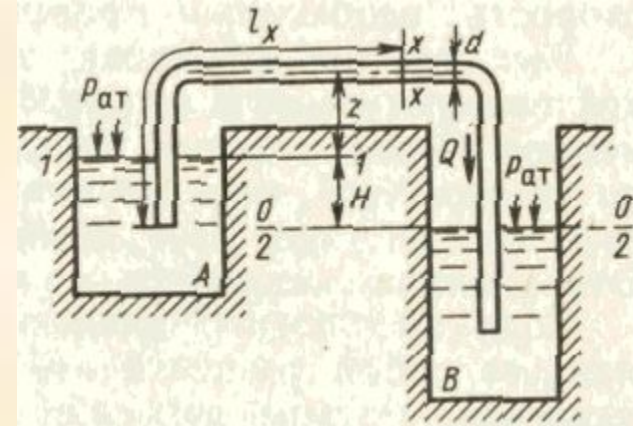
- где l – длина сифонной трубы. Тогда получим уравнение
- $H = v^2/2g * (1 + \lambda l/d + \Sigma \xi),$
- где $\Sigma \xi$ – сумма коэффициентов местных сопротивлений

$$\Sigma \xi = \xi_{вх} + \xi_{вых} + 2\xi_{пов}.$$



- Полученное уравнение может быть решено относительно любого из трех неизвестных: H , v (Q), d , т. е. сифонный трубопровод может быть рассчитан в любой постановке задачи.

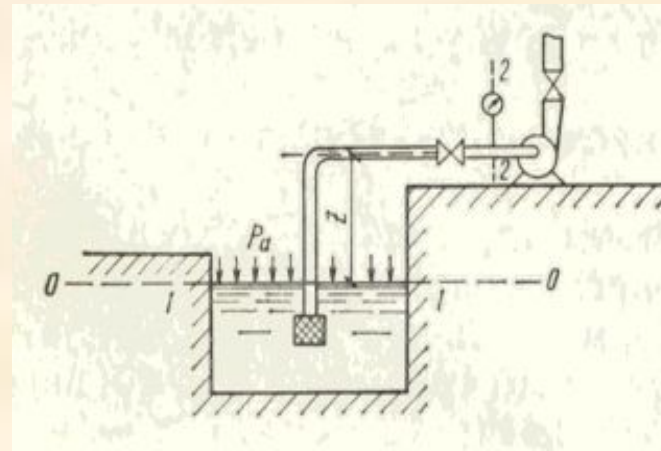
- Однако при расчете сифона надо дополнительно убедиться возникнет ли в трубе чрезмерный вакуум, так как глубокий *вакуум* может вызвать вскипание жидкости, что нарушит работу сифона. Составим уравнение Бернулли для сечений 1–1 и x–x относительно плоскости 0–0



- $$H + p_{at}/\rho g + v_1^2/(2g) = H + z + p_x/\rho g + v_2^2/(2g) + h_w.$$
- Полагая $v_1=0$, перепишем уравнение
- $$(p_{at} - p_x)/\rho g = z + v^2/(2g) + (\lambda l/d + \Sigma \xi) * v^2/(2g).$$
- Величина в левой части уравнения представляет собой вакуум
- $$h_{\text{вак}} = (p_{at} - p_x)/\rho g, \text{ и}$$
- $$h_{\text{вак}} = z + (1 + \lambda l/d + \Sigma \xi) * v^2/(2g),$$
- где v – скорость движения воды в сифоне; z – высота в сечении x–x над уровнем воды в резервуаре, l – части сифонной трубы от начала до сечения x–x сечения, $\Sigma \xi$ – сумма коэффициентов местных сопротивлений от начала трубы до сечения x–x. В нашем случае
- $$\Sigma \xi = \xi_{\text{вх}} + \xi_{\text{нов}}.$$
- Из уравнения следует, что $h_{\text{вак}}$ будет тем больше, чем больше z , скорость v и потери напора.

Расчет всасывающего трубопровода насоса

- **Расчет всасывающего трубопровода насоса** – участка трубопровода от места водозабора до насоса, ведется аналогично расчету сифона. Определяется вакуум во всасывающем трубопроводе перед входом в насос, для этого составляется уравнение Бернулли для сечений 1-1 и 2-2, принимая плоскость сравнения 0-0 на уровне жидкости в резервуаре:
- $$p_{atm}/\rho g = z + p_2/\rho g + v^2/(2g) + (\lambda l/d + \Sigma \xi) * v^2/(2g),$$
- где z – высота установки насоса, называемая геометрической высотой всасывания.
- Это уравнение показывает, что процесс всасывания, т.е. подъем жидкости на высоту z , сообщение ей скорости и преодоление всех гидравлических сопротивлений, происходит в результате использования, (с помощью насоса) атмосферного давления. Из формулы можно получить выражение для вакуумметрической высоты всасывания:
- $$h_{вак} = (p_{atm} - p_2)/\rho g = z + v^2/(2g) + (\lambda l/d + \Sigma \xi) * v^2/(2g).$$
- Из этой формулы видно, что для уменьшения вакуума на входе в насос необходимо уменьшать высоту установки насоса, скорость движения жидкости и гидравлические сопротивления.



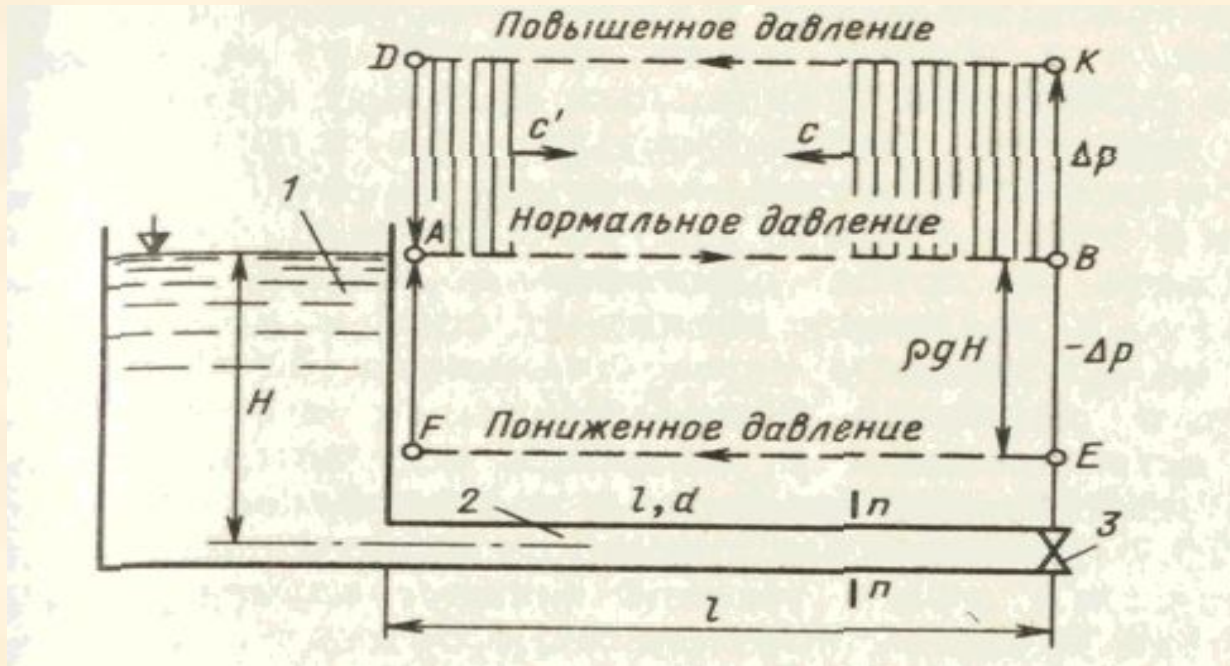
Изменение пропускной способности трубопроводов в процессе их эксплуатации

- При проектировании напорных трубопроводов следует учитывать, что их пропускная способность в период эксплуатации снижается – в некоторых случаях (например, для трубопроводов водоснабжения) до 50% расчетной и даже ниже. Вследствие коррозии и инкрустации (образование отложений в трубах) шероховатость труб увеличивается, что в первом приближении можно оценить по формуле
- $\Delta = \Delta_0 + \alpha t$,
- где Δ_0 – шероховатость, мм, для новых труб (в начале эксплуатации); Δ – абсолютная шероховатость, мм, через t лет эксплуатации; α – коэффициент, характеризующий быстроту возрастания шероховатости, мм/год.
- Значение коэффициента α зависит от материала труб и свойств жидкости. В табл. приведены значения α (по А.Д. Альштулю и А.Г. Камерштейну) в зависимости от физико-химических свойств транспортируемой воды.

Коррозионное воздействие	Характеристика природных вод	α , мм/год
Слабое	Слабоминерализованные воды, воды с незначительным содержанием органических веществ и растворенного железа	0,005-0,055
Умеренное	Слабоминерализованные воды, воды содержащие органические вещества и растворенное железо в количестве меньше 3 мг/л	0,055-0,18
Значительное	Воды с держанием железа более 30 мг/л, но с малым содержанием хлоридов и сульфатов	0,18-0,40
Сильное	Коррозионные воды с большим содержанием хлоридов и сульфатов (больше 500-700 мг/л), необработанные воды с большим содержанием органических веществ	0,40-0,60
Очень сильное	Воды со значительной карбонатной и малой постоянной жесткостью, сильно минерализованные	0,6-0,1 и более

Гидравлический удар

- Изменение давления в водоводах, вызванное резким увеличением или уменьшением скорости движения жидкости, называется *гидравлическим ударом*. Гидравлический удар в 1898 г. подробно описал выдающийся русский ученый Н. Е. Жуковский.
- Ударное давление Δp определяется разностью давлений при неустановившемся и установившемся режимах. Если давление $\Delta p > 0$ то удар называется положительным, при $\Delta p < 0$ то отрицательным.



- Различают четыре этапа развития гидравлического удара.**

Первый этап. Допустим, что задвижка 3 мгновенно закрылась и слой жидкости, находящийся у задвижки остановился, а вся жидкость в трубе 2 продолжает двигаться с прежней скоростью v . Через некоторое время начнут останавливаться и другие слои жидкости слева от задвижки, т.е. фронт остановившейся жидкости будет перемещаться от задвижки к резервуару 1. Обозначим этот фронт сечением $n-n$. В остановившемся объеме между задвижкой сечением возникает дополнительное давление Δp . Итак, слева от сечения $n-n$ жидкость движется вправо со скоростью v и в трубе будет прежнее давление p ; справа от сечения $n-n$; жидкость неподвижна и давление равно $p + \Delta p$. Фронт сжатия быстро перемещается в сторону резервуара. Скорость перемещения этого фронта называется скоростью распространения ударной волны c . Описанный процесс будет продолжаться до тех пор, пока волна не дойдет до резервуара. Этим заканчивается первый этап гидравлического удара, в конце этого этапа вся жидкость в трубе неподвижна, сжата и находится под давлением $p + \Delta p$. Некоторый дополнительный объем жидкости из резервуара поступит в трубу.
- Второй этап.** Начало второго этапа совпадает с окончанием первого. Сжатая жидкость расширяясь, начнет двигаться в сторону резервуара. Сначала придут в движение слои жидкости вблизи резервуара, а затем и более отдаленные, т.е. фронт спада давления $n-n$ начнет повышаться от резервуара к задвижке. К концу фазы вся жидкость в трубе движется со скоростью v в сторону резервуара давление в трубе восстанавливается до первоначального.
- Третий этап.** Начало третьего этапа характеризуется тем, что жидкость в трубе движется в сторону резервуара со скоростью v . У задвижки возникает слой жидкости, в котором давление на Δp меньше первоначальное. Теперь фронт $n-n$ пониженного давления перемещается в сторону резервуара слева от него давление p , скорость направлена влево, справа жидкость неподвижна, давление в ней на Δp ниже нормального, Третий этап заканчивается приходом фронта $n-n$ к резервуару.
- Четвертый этап.** Начало четвертого этапа характеризуется тем, что давление у входа в трубу со стороны резервуара p , а со стороны трубы меньше на Δp , т.е. $p - \Delta p$. Такое неуравновешенное состояние приведет к тому, что жидкость из резервуара начнет втекать в трубу со скоростью v и в ней будет повышаться до p .

- Рассмотрим слой жидкости от задвижки до сечения n-n длиной Δl и площадью поперечного сечения w . Остановившаяся масса жидкости (m) в этом объеме потеряла количество движения за время Δt , в течение которого фронт повышенного давления передвинулся от задвижки влево на расстояние Δl :
- $mv = \rho w \Delta l v$.
- Импульс силы за тот же промежуток времени равен $\Delta p w \Delta t$.
- Справа от сечения n-n давление $p + \Delta p$, слева от него $- p$.
- Произведение $\Delta p w$ есть сила, остановившая объем жидкости $w \Delta l$ за время Δt . Приравняв импульс силы к количеству движения получим
- $\Delta p w \Delta t = \rho w \Delta l v$.
- Откуда
- $\Delta p = \rho \Delta l v / \Delta t$,
- где v скорость в трубопроводе до закрытия задвижки и поскольку $\Delta l / \Delta t$ – скорость распространения ударной волны c , запишем
- $\Delta p = \rho c v$.
- Эта формула была впервые получена Н.Е. Жуковским.

- В реальных условиях процесс гидравлического удара протекает несколько иначе, так как при больших давлениях, сопровождающих гидравлический удар, сказываются как сжимаемость жидкости, так и упругость стенок водовода. Для случая упругих стенок Н.Е. Жуковским была получена также формула для определения скорости ударной волны.

- $$c = \sqrt{\frac{E_{ж}}{\rho(1 + d/\delta * E_{ж} / E_{тр})}}$$

- где ρ – плотность жидкости; d – внутренний диаметр трубы, δ – толщина стенок трубы; $E_{ж}$ – модуль упругости жидкости (кг/м²), $E_{тр}$ – модуль упругости материала стенок трубы.
- Если труба абсолютно жесткая $E_{тр} \rightarrow \infty$, то $c_0 = \sqrt{E_{ж}}/r$, тогда скорость распространения ударной волны c_0 при абсолютно жестких стенках трубопровода равна скорости распространения звука в воде ($c_0 = 1425$ м/с) и для воды:
- $$c = 1425 / \sqrt{(1 + d/\delta * E_{ж} / E_{тр})}$$
- Формула справедлива для так называемого прямого удара, т.е. когда время закрытия задвижки меньше фазы удара $t_3 < T$ ($T = 2L/c$, где L – длина трубопровода от места его перекрытия до сечения в котором давление считается постоянным).
- Если $t_3 > T$ удар называют непрямым, и ударное повышение давления Δp будет меньше определяемого по формуле. При таких условиях повышение давления можно найти по формуле Мишо
- $$\Delta p = \rho c v (T/t_3) = 2\rho L v / t_3$$
- При условии, что $t_3 = T$ результаты расчетов по этим формулам одинаковы.

Источники:

Исаев А.П., Сергеев Б.И. Дидур В.А. Гидравлика и гидромеханизация сельскохозяйственных процессов. М.: Агропромиздат, 1990. – 400 с.

Пашков Н.Н., Долгачев Ф.М. Гидравлика. Основы Гидрологии.- М.: Энергоатомиздат, 1993. –448с.: ил.

Калицун В.Н. Гидравлика, водоснабжение, канализация. – М.: Стройиздат, 2000. – 397 с.

Штеренлихт. Гидравлика: Учебник для вузов.-М.: Энергоатомиздат, 2004. –640с.
