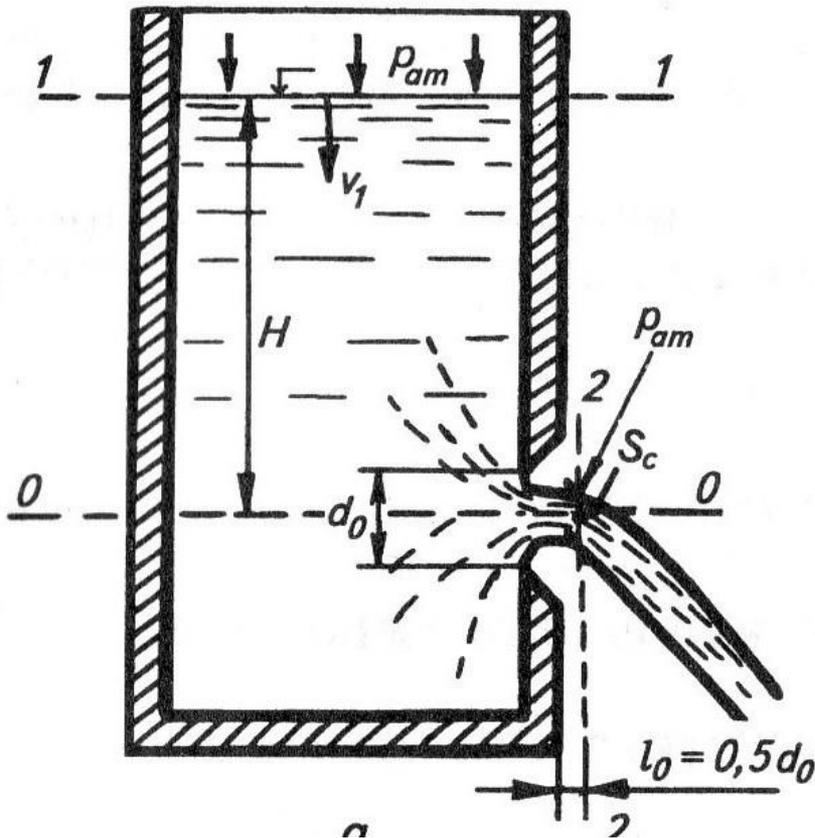


Лекция 4

Гидравлика



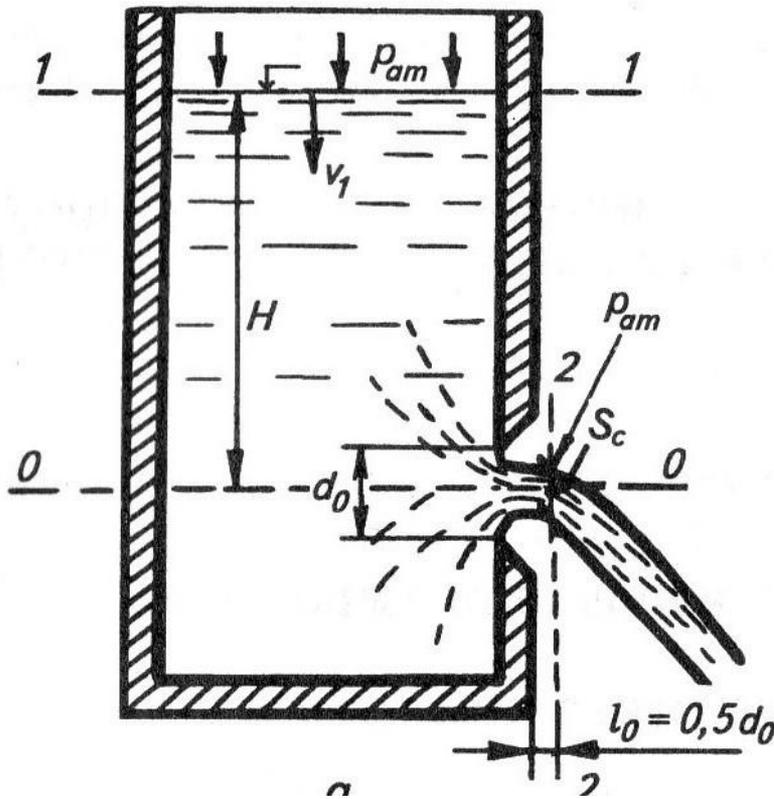
Истечение жидкости через отверстия



- Рассмотрим истечение жидкости через малое незатопленное отверстие с острой кромкой. Глубина погружения центра тяжести отверстия под свободной поверхностью равна H (напор).
- Истечение происходит при постоянном напоре, т.е. уровень жидкости в резервуаре неизменный. Это возможно, если свободная поверхность занимает большую площадь или, если в резервуар подается такой же расход жидкости, что и вытекает через отверстие.
- При постоянном напоре скорости истечения будут неизменными во времени, т.е. движение будет установившимся.
- *Малым отверстием* называют такое, у которого наибольший вертикальный размер d не превышает $0,1H$.



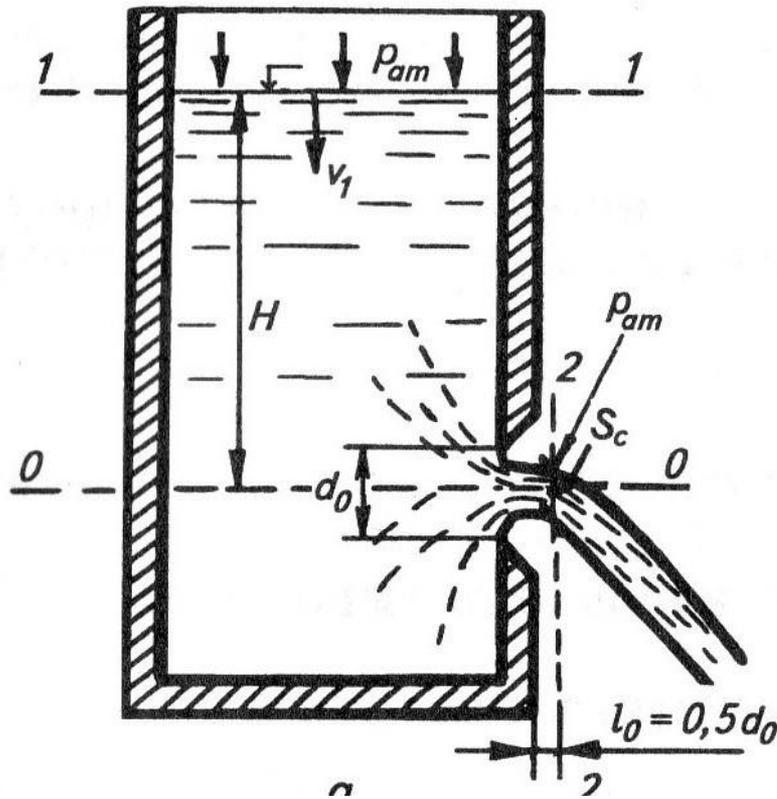
Истечение жидкости через отверстия



- Свободная поверхность жидкости в резервуаре находится под давлением p_0 . Истечение происходит в газовую среду с давлением p_c .
- Траектории частиц при приближении к отверстию искривляются. Действующая центробежная сила направлена внутрь формирующейся струи.
- Ближайшее к отверстию сечение струи, в котором движение может быть принято плавно изменяющимся, находится на расстоянии примерно $0,5d$ от внутренней поверхности стенки резервуара. Это сечение называют *сжатым сечением* струи. Скорости во всех точках сжатого живого сечения можно считать параллельными и в силу малости отверстия одинаковыми.



Истечение жидкости через отверстия



- Коэффициент сжатия – это отношение площади сжатого живого сечения ω_c к площади отверстия ω :
- $\epsilon = \omega_c / \omega$
- Для случая истечения жидкости выводятся формулы для определения скорости и расхода жидкости с помощью уравнения Бернулли.
- Уравнение Бернулли составляется для сечений, движение в которых можно считать плавно изменяющимся. Выберем сечение А-А по свободной поверхности жидкости в резервуаре и сжатое сечение струи С-С. Горизонтальную плоскость сравнения удобно провести через центр сжатого сечения.



Истечение жидкости через отверстия

- Уравнение Бернулли для данной задачи имеет вид:

- $$H + p_0/\rho g + \alpha_0 u_0^2/2g = 0 + p_c/\rho g + \alpha_c u_c^2/2g + h_{тр},$$

-
- где p_0 и p_c - давление в выбранных сечениях А-А и С-С; u_0 и u_c – средняя скорость движения жидкости в сечениях А-А и С-С; $h_{тр}$ – потери напора (удельной энергии) на участке между сечениями А-А и С-С.

- В данном случае потери энергии сводятся к местным потерям и определяются по формуле:

- $$h_{тр} = h_m = \xi_{0.к} u_c^2/2g,$$

- где $\xi_{0.к}$ – коэффициент потерь при истечении жидкости через отверстие с острой кромкой.

- Перенесем известные члены уравнения в его левую часть:

- $$H + (p_0 - p_c)/\rho g + \alpha_0 u_0^2/2g = (\alpha_c + \xi_{0.к}) u_c^2/2g$$



Истечение жидкости через отверстия

- Находящуюся в левой части этого выражения сумму называют действующим напором:

- $$H_0 = H + (p_0 - p_c) / \rho g + \alpha_0 v_0^2 / 2g$$

- $$H_0 = (\alpha_c + \xi_{0.к}) v_c^2 / 2g$$

- Расход определяется по формуле:

- $$Q = \omega c v_c = \varepsilon \omega v_c$$

- $$Q = \varepsilon \varphi \omega (2gH)^{1/2}$$

- Произведение коэффициента сжатия ε и коэффициента скорости φ называют коэффициентом расхода μ :

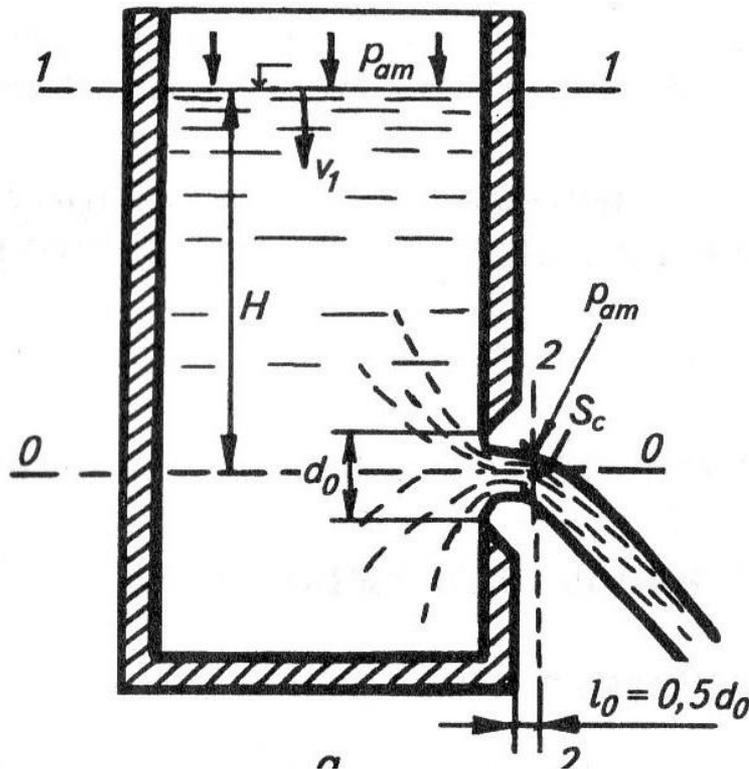
- $$\mu = \varepsilon \varphi$$

- Формула для определения расхода жидкости через отверстие получится такой:

- $$Q = \mu \omega (2gH_0)^{1/2}$$



Истечение жидкости через отверстия



- В большинстве случаев в гидротехнической практике происходит истечение в атмосферу из сосудов, на свободной поверхности которых атмосферное давление, т.е. $p_0 = p_c = p_{ат}$. Выражение для h_0 приобретает вид:

$$H = h_0 + \alpha \omega v_0^2 / 2g$$

-
- В тех случаях, когда можно пренебречь влиянием скоростного напора $\alpha \omega v_0^2 / 2g$, основные расчетные формулы приобретают вид:

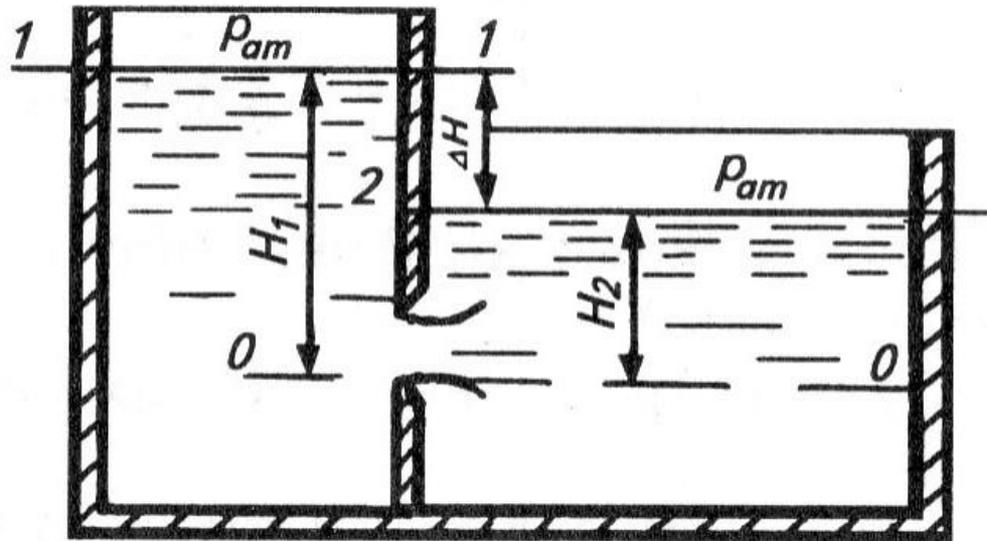
$$v_c = \varphi (2gH)^{1/2}$$

$$Q = \mu \omega (2gH)^{1/2}$$

-



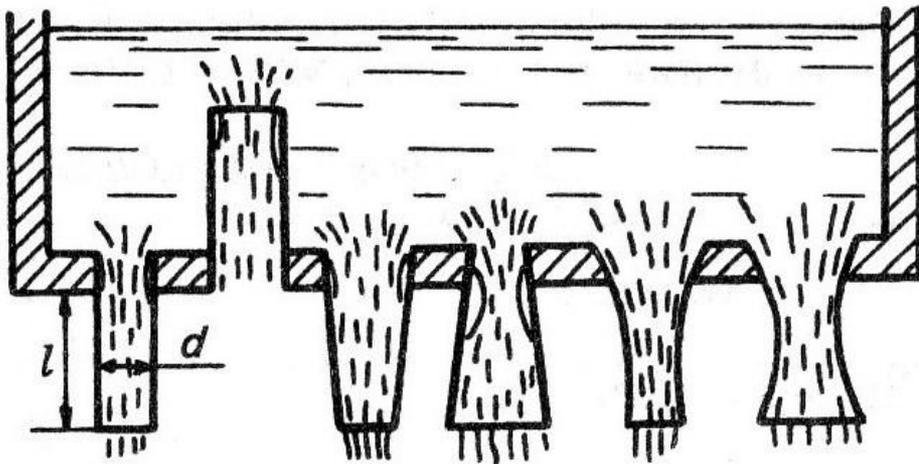
Истечение жидкости через отверстия



- Значения коэффициентов скорости φ и расхода μ определены экспериментально и приводятся справочниках.
- При истечении жидкости через отверстие под уровень жидкости (затопленное отверстие) формулы для скорости и расхода имеют вид:
 - $u_c = \varphi(2gz)^{1/2}$
 - $Q = \mu\omega(2gz)^{1/2}$
 - z - разность уровней жидкости в двух резервуарах.



Истечение жидкостей через насадки



- **Насадки** – это короткие трубки, присоединенные к отверстию. Они служат для изменения скорости или расхода жидкости через отверстие.

При истечении в газовую среду насадок называется **незатопленным**.

Насадки имеют различную геометрическую форму и называются: **внешний цилиндрический насадок, внутренний цилиндрический насадок, конический сходящийся насадок, конический расходящийся насадок, коноидальный насадок.**



Истечение жидкости через насадки

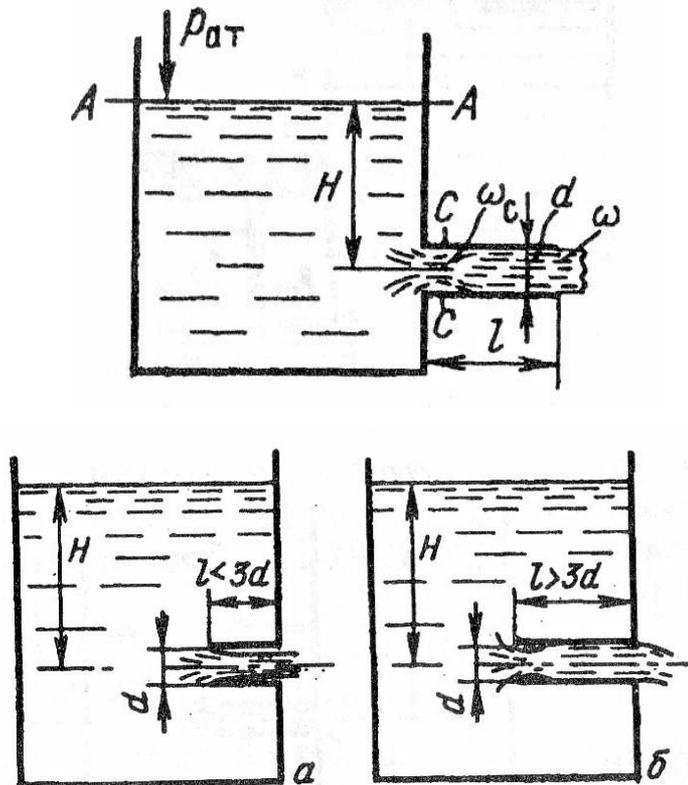
- Формулы для определения скорости и расхода жидкости через насадки имеют такой же вид, как и формулы для истечения через малое отверстие в тонкой стенке. Отличаются они только значениями коэффициентов скорости φ и расхода μ . Для каждого насадка они свои, получены опытным путем и приведены в справочниках.

- $$u_n = \varphi_n (2gH)^{1/2}$$

- $$Q_n = \mu_n \omega (2gH)^{1/2}$$



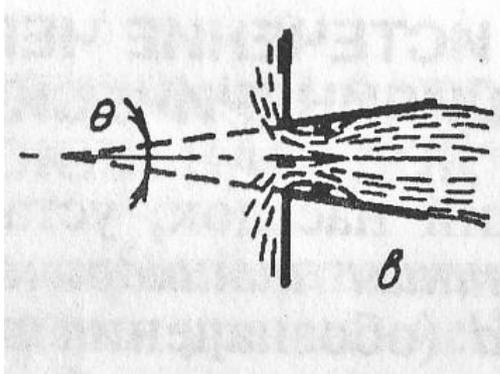
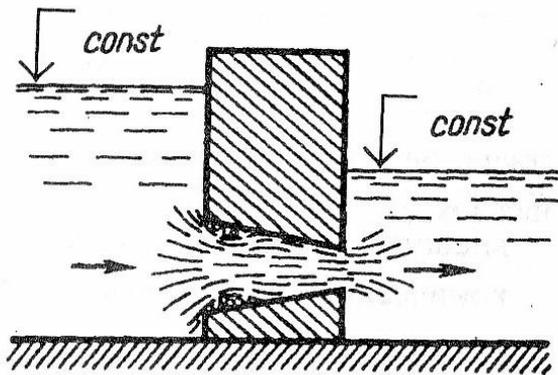
Виды насадков



- **Внешним цилиндрическим насадком (насадком Вентури)** называют прямую цилиндрическую трубку длиной $l = (3...4)d$, присоединенную под прямым углом с внешней стороны резервуара к отверстию того же диаметра.
- При истечении через внешний цилиндрический насадок коэффициент расхода μ_n примерно на 32% больше, чем коэффициент расхода μ через отверстие в тонкой стенке. При необходимости увеличить расход через отверстие достаточно присоединить к внешней стенке резервуара цилиндрический насадок.
- **Внутренним цилиндрическим насадком (насадком Борда)** называют цилиндрический насадок, установленный внутри резервуара. По сравнению с истечением через отверстие в тонкой стенке здесь происходит более заметное сжатие, и коэффициент расхода получается меньшим.



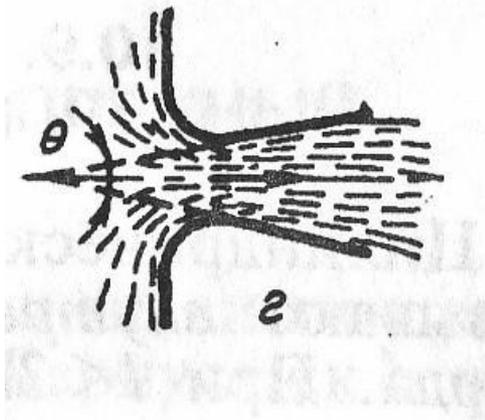
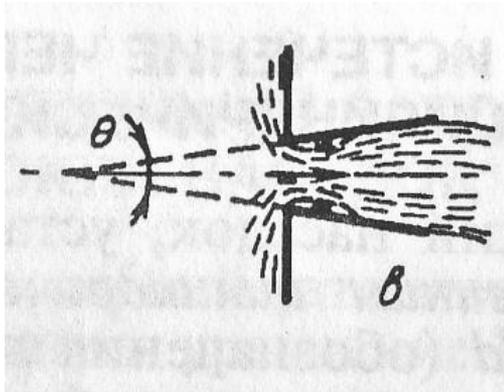
Виды насадков



- **Коническим сходящимся насадком (круглого сечения)** называют насадок, имеющий форму усеченного конуса, сходящегося по направлению к выходному отверстию. В водомерных устройствах на каналах мелиоративных систем применяют также сходящиеся насадки с квадратным и прямоугольным сечениями.
- Выходящая из конического насадка струя характеризуется большой кинетической энергией, в связи с чем эти насадки применяют в соплах турбин, гидромониторах и пожарных брандспойтах.
- **Коническим расходящимся насадком** называют насадок, имеющий форму усеченного конуса, расходящегося по направлению к выходному отверстию.



Виды насадков



- Если к отверстию в тонкой стенке присоединить внешний цилиндрический или расходящийся насадок, во втором случае при прочих одинаковых условиях расход будет значительно больше. При этом за расходящимся насадком скорость и кинетическая энергия струи будут меньше.
- Такие насадки применяют, если необходимо пропустить относительно большой расход при малых скоростях на выходе или в устройствах, когда требуется достичь значительного вакуума (водоструйные насосы, гидроэлеваторы и т.п.).
- *Конические насадки* имеют сложную форму. Вход выполняют по форме вытекающей через отверстие струи, а выходной участок - цилиндрическим. За счет этого сжатие струи на выходе из насадка отсутствует.



Сравнение насадков

- Проведем сравнение (при равенстве площади сечения ω и напора H) истечения жидкости из отверстия в тонкой стенке и различных насадков.
- Наибольшая скорость истечения обеспечивается при истечении через отверстие в тонкой стенке, через сходящийся и коноидальный насадки.
- Максимальная пропускная способность отмечена при истечении через расходящийся и коноидальный насадки.
- Расход при истечении через внешний цилиндрический насадок больше, чем через отверстие в тонкой стенке, но вытекающая через отверстие струя обладает большей кинетической энергией, чем при истечении через внешний цилиндрический насадок.
- Из всех сравниваемых устройств коноидальный насадок характеризуется максимальной кинетической энергией струи.
- Расходящиеся насадки обеспечивают минимальные значения скорости и кинетической энергии струи.
- Наибольшее значение коэффициента сопротивления ξ у конического насадка.

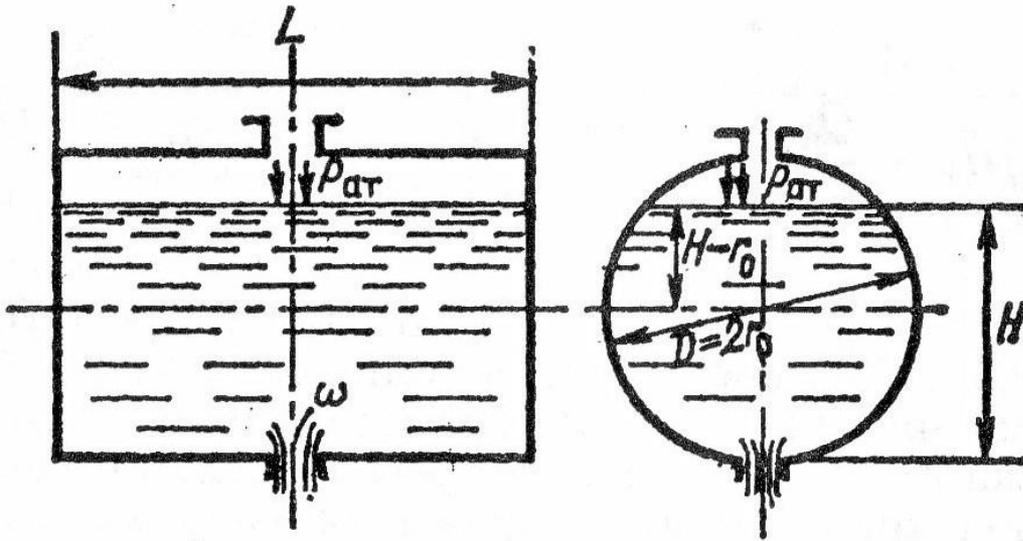


Истечение жидкости при переменном напоре

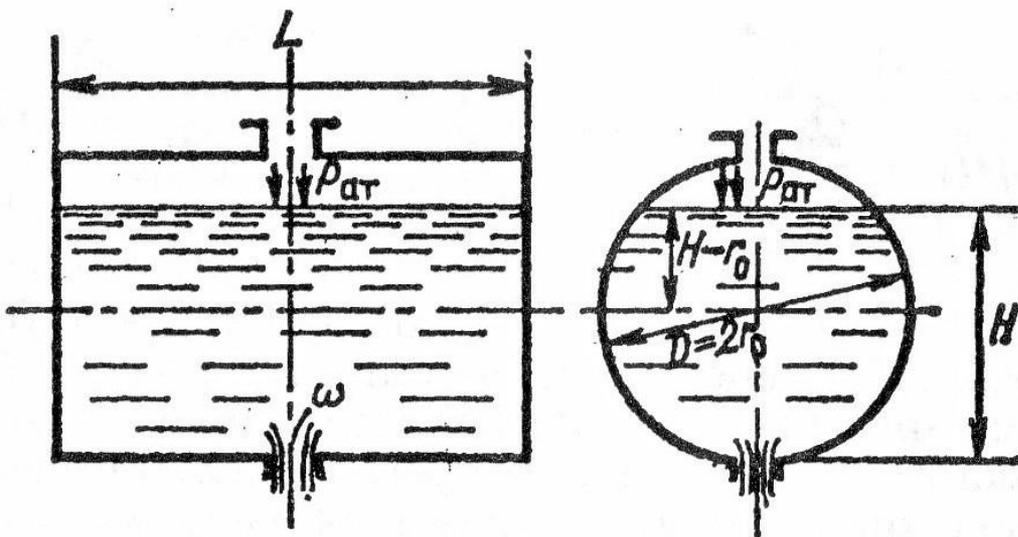
- При изменении напора во времени изменяются параметры потока – расход, скорость, давление. Поэтому истечение жидкости из резервуара при переменном напоре представляет один из случаев неустановившегося движения.

Для определения параметров неустановившегося движения уравнение Бернулли, полученное для установившегося движения, в общем случае непригодно.

Основная задача при рассмотрении истечения с переменным напором – определение времени, за которое напор изменится от начального значения H_1 до некоторого назначенного значения H_2 . В процессе истечения убыль жидкости в резервуаре может частично восполняться притоком от внешнего источника, а может и не восполняться.



Истечение жидкости при переменном напоре



- Существуют формулы для определения времени опорожнения резервуаров для разных случаев, они приводятся в учебниках по гидравлике.

Время полного опорожнения резервуара определяется по следующей формуле:

$$= 2F(H_n)^{1/2} / \mu\omega(2g)^{1/2},$$

Т

где H_n – глубина жидкости в резервуаре до начала истечения; F – площадь сечения резервуара; ω – площадь сечения отверстия.

Для определения времени понижения уровня жидкости в сосуде на некоторую величину от H_1 до H_2 используют формулу:

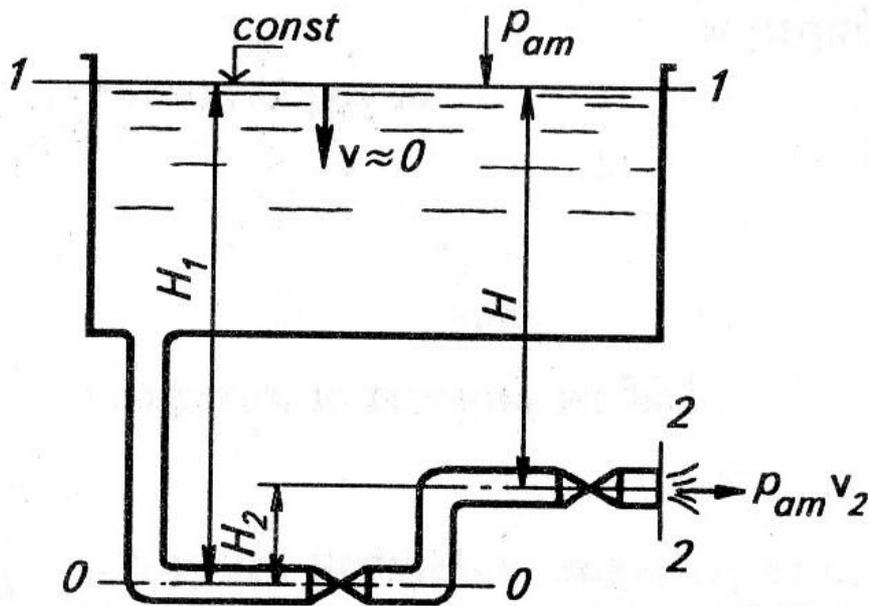
$$= 2F((H_1)^{1/2} - (H_2)^{1/2}) / \mu\omega(2g)$$

Т



Гидравлический расчет трубопроводов

- Простой трубопровод – трубопровод, не имеющий ответвлений и состоящий из труб одинакового диаметра, выполненных из одного материала.



Движение жидкости в трубопроводе обусловлено напором H , равным разности напоров в резервуаре-питателе и приемнике или разности напоров в резервуаре-питателе и в струе на выходе из трубы. Если указанная разность не будет изменяться во времени, то движение будет установившимся.

Простые трубопроводы делят на гидравлически длинные и короткие.



Гидравлически длинные и короткие трубопроводы

- **Гидравлически длинный трубопровод** – трубопровод, в котором потери напора по длине настолько превышают местные потери и скоростной напор, что сумму $\sum h_m + \alpha u^2/2g$ не вычисляют, а принимают как некоторую часть потерь по длине $h_{дл}$.
- При расчетах длинных трубопроводов находят потери напора по длине $h_{дл}$, а затем суммарные местные потери напора учитывают, увеличивая найденные значения $h_{дл}$ на 5...10%.
- **Гидравлически короткий трубопровод** – трубопровод, в котором потери напора по длине и местные потери сопоставимы по значению.
- При гидравлическом расчете коротких трубопроводов учитывают как местные потери напора, так и потери напора по длине, а в балансе напоров учитывают скоростные напоры в сечениях трубопроводов.
- Все задачи на простые трубопроводы решают с помощью уравнения Бернулли и уравнения неразрывности.



Расчет трубопроводов

□ Для решения любой задачи составляют уравнение Бернулли для двух сечений трубопровода.

□ Пренебрегая местными потерями и скоростными напорами, получаем:

□
$$H = h_{дл}$$

□ Выразим потери напора через гидравлический уклон $h_{дл} = J\ell$, откуда

□
$$J = H/\ell$$

□ Подставим в формулу Шези ($u = C(RH/\ell)^{1/2}$), получим

□
$$u = C(RH/\ell)^{1/2}$$

□

□
$$H = u^2\ell/(C^2R)$$

□

□ Расход жидкости при равномерном движении:

□
$$Q = \omega C(RJ)^{1/2}$$



Расчет трубопроводов

- Объединяем параметры, зависящие от размеров (диаметра) трубы и представим их в виде **расходной характеристики (модуля расхода)**:

- $$K = \omega C(R)^{1/2}$$

-
- **Модуль расхода** – это расход в данной трубе при гидравлическом уклоне, равном единице.

- $$Q = K(J)^{1/2}$$
- $$H = Q^2 \ell / K^2$$

- **Удельное сопротивление трубопровода** – напор, затрачиваемый на единице длины трубопровода при расходе, равном единице:

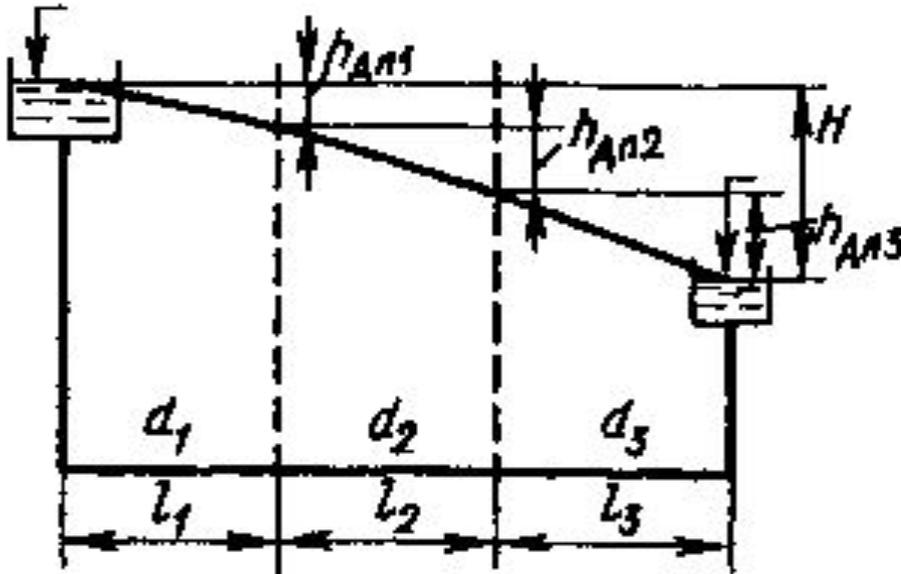
- $$A = \ell / K^2 = \ell / \omega^2 C^2 R$$
- $$A = 8\lambda / g \rho^2 d^5$$

- Удельное сопротивление A – это справочная величина, выбирается в зависимости от диаметра и материала трубопровода.

- Напор для простых длинных трубопроводов вычисляется по формуле:
- $$H = A \ell Q^2$$



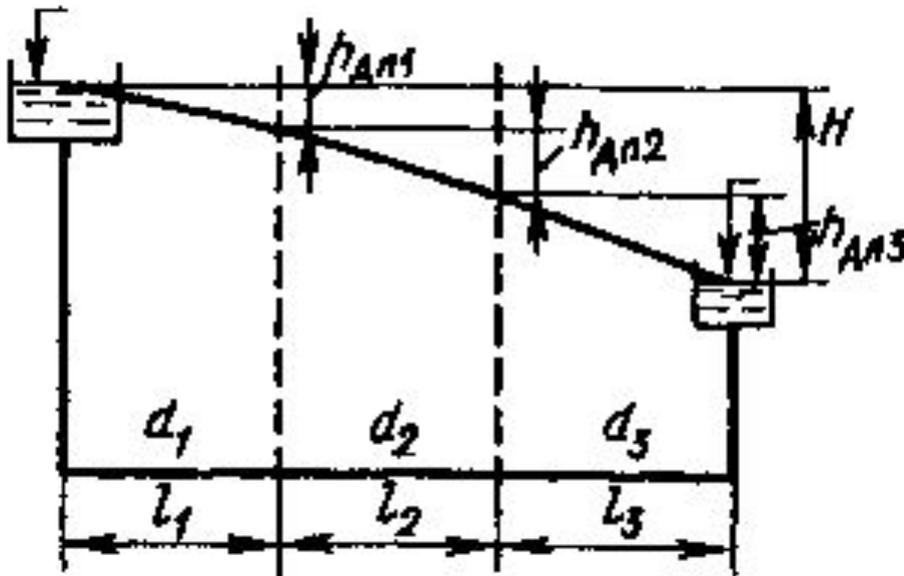
Расчет последовательных трубопроводов



- Рассмотрим систему из последовательно соединенных длинных труб различных диаметров и длин. В общем случае материал труб может быть различным. Система соединяет два резервуара.
- Заданы расход Q . Диаметры труб и длины участков. Расходные характеристики труб (модули расхода K) берут из справочника.
- По трубопроводу, составленному из последовательно соединенных труб, проходит неизменяющийся по длине транзитный расход Q . На каждом i -том участке трубопровода для пропуска расхода Q затрачивается часть суммарного напора H :
- $$h_i = Q^2 l_i / K_i^2 = h_{дл_i},$$
- где $i = 1, 2, 3, \dots, n$ - номер участка трубопровода



Расчет последовательных трубопроводов



Напор H затрачивается на преодоление потерь напора по длине и будет равен сумме потерь напора на отдельных участках:

$$H = H_1 + H_2 + \dots + H_n = \sum H_i$$

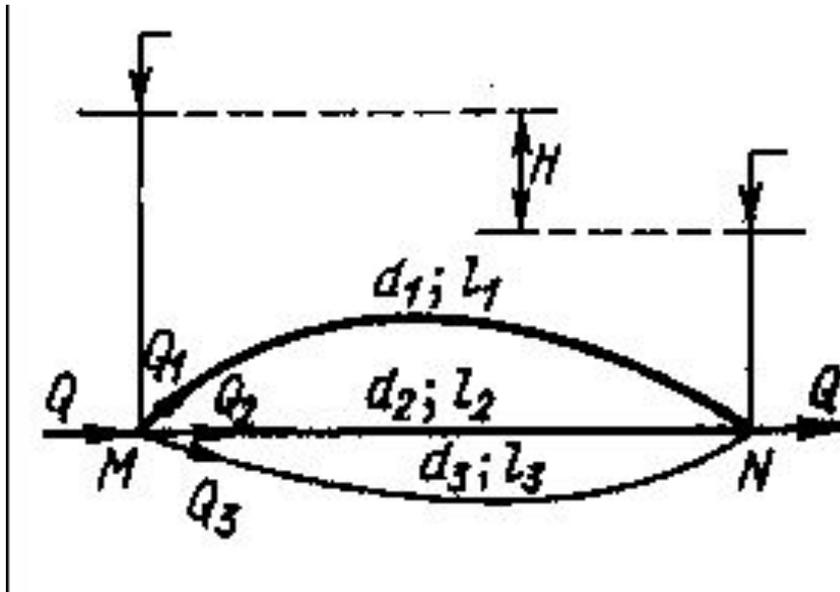
Получаем формулы для определения напора для трубопровода из последовательно соединенных труб:

$$H = Q^2 \sum \theta_2 i l_i / K_{\text{кв}} i^2$$

$$H = Q^2 \sum A i l_i$$



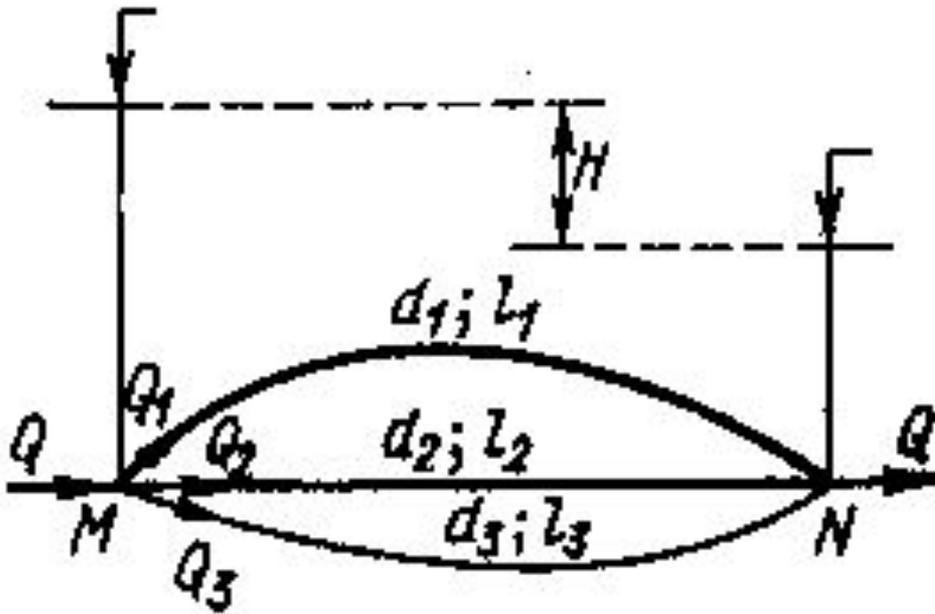
Расчет параллельных трубопроводов



- При параллельном соединении длинных трубопроводов между точками М и N проходит несколько труб.
- Заданы расход Q , длины, диаметры, материал и расходные характеристики труб.
- Разность пьезометрических напоров в начале и в конце труб составляет напор H , полностью затрачиваемый на преодоление сопротивлений. На каждом участке трубы движение происходит под действием одного итого же напора. Но так как длины участков различны, гидравлические уклоны на каждом участке будут разными.
$$J_i = H/l_i$$
- Расход жидкости, проходящий по любому участку:
$$Q_i = K_i(H/l_i)^{1/2}$$
- Для всех n участков имеем n уравнений для Q .
- Сумма расходов на отдельных участках должна быть равна общему расходу, поступающему в систему параллельно соединенных трубопроводов в точке М и выходящему из системы в точке N:
$$Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n = \Sigma Q_i$$



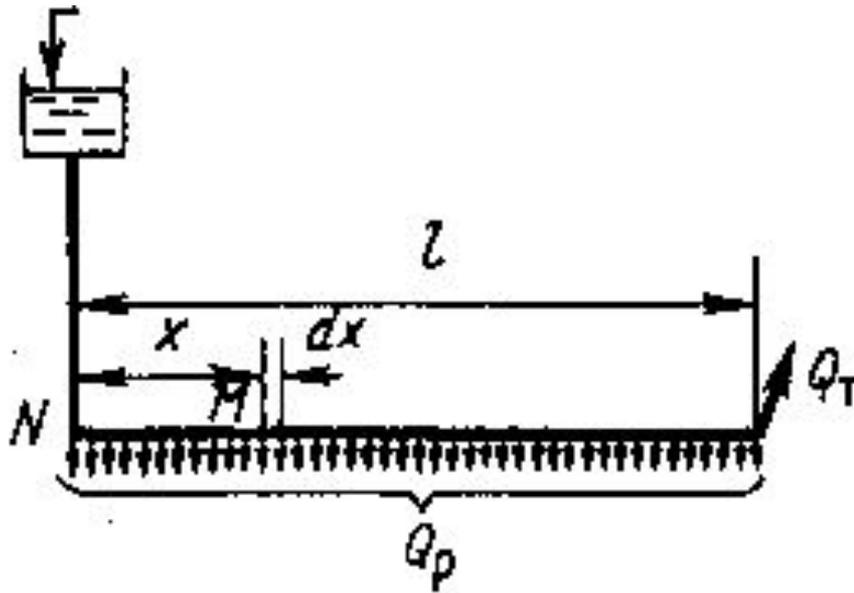
Расчет параллельных трубопроводов



- Таким образом, имеем $(n + 1)$ уравнение.
- Получим формулы для определения расхода и напора:
 - $Q = H^{1/2} \sum K_i (\ell_i)^{1/2}$
 - $H = Q^2 / \sum (K_i / (\ell_i)^2)$
- Распределение расходов между отдельными участками заранее неизвестно. Поэтому все расходы на участках выражают через какой-либо один, например через Q_1 .
- $Q_i = Q_1 K_i / K_1 (\ell_1 / \ell_i)^{1/2}$
- Подставив формулу в уравнение, найдем расход Q_1 , а затем и остальные расходы.
- При всех расчетах сначала предполагают, что область сопротивления на всех участках квадратичная, т.е. $\theta_1 = \theta_2 = 1$. а $K = K_{кв}$. С учетом этого предположения находят H и все Q_i , затем находят средние скорости u_i на каждом участке и уточняют область сопротивления, сравнивая u_i с $u_{кв}$. Если необходимо, то вводят поправки и вновь определяют напор H и расход Q в линиях.



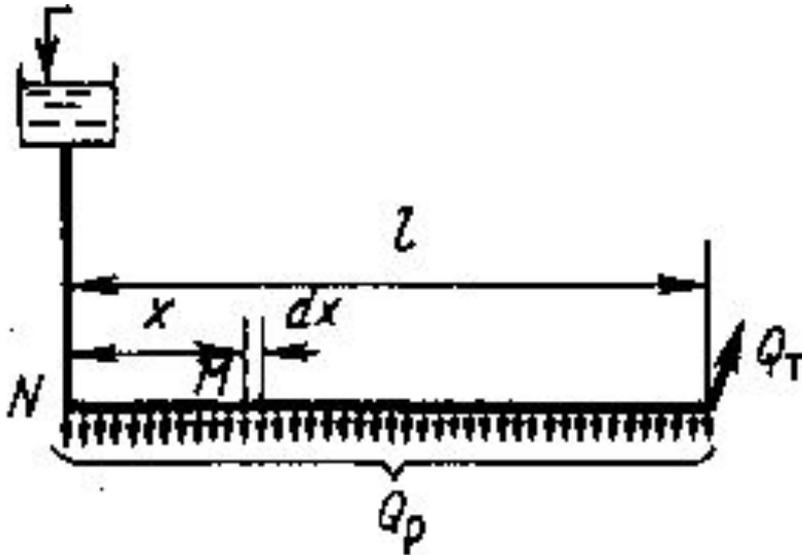
Расчет трубопроводов с путевым расходом



- Часто встречаются случаи, когда по длине трубопровода происходит раздача части или всего расхода, причем отбор жидкости (воды) потребителями происходит в нескольких сечениях по длине трубопровода.
- К таким трубопроводам относятся городские и сельские водопроводы, подающие воду в дома жителей или на различные объекты.
- Наиболее простая схема, применяемая при расчете таких трубопроводов, - непрерывное изменение раздаваемого (путевого) расхода Q_p по длине. При такой схеме на каждой единице длины расход в трубопроводе изменяется в среднем на величину Q_p/l .



Расчет трубопроводов с путевым расходом



- Расход жидкости, проходящий по трубопроводу без изменения называется транзитным Q_T . В начале трубопровода расход равен $Q_T + Q_p$, а в конце трубопровода Q_T .

- Вводится понятие «расчетный расход» - условный средний расход жидкости в трубопроводе Q_p . Выведена формула для определения расчетного расхода:

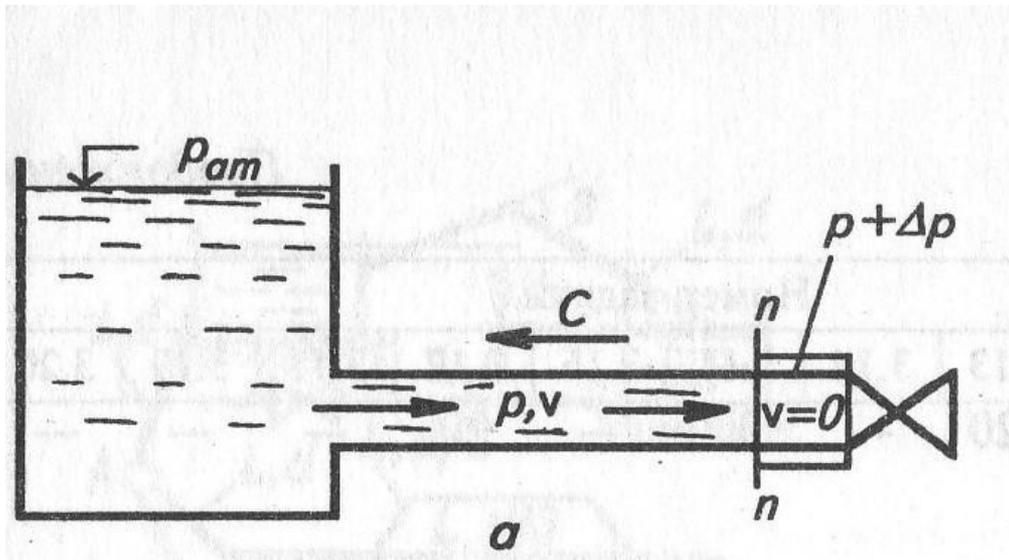
- $$Q_p = Q_T + 0.55Q_p$$

-
- Формула для определения потери напора в трубопроводе с непрерывным изменением расхода по длине:

- $$H = Q^2 p l / K^2 = \theta 2 Q^2 p l / K_{кв}$$



Гидравлический удар

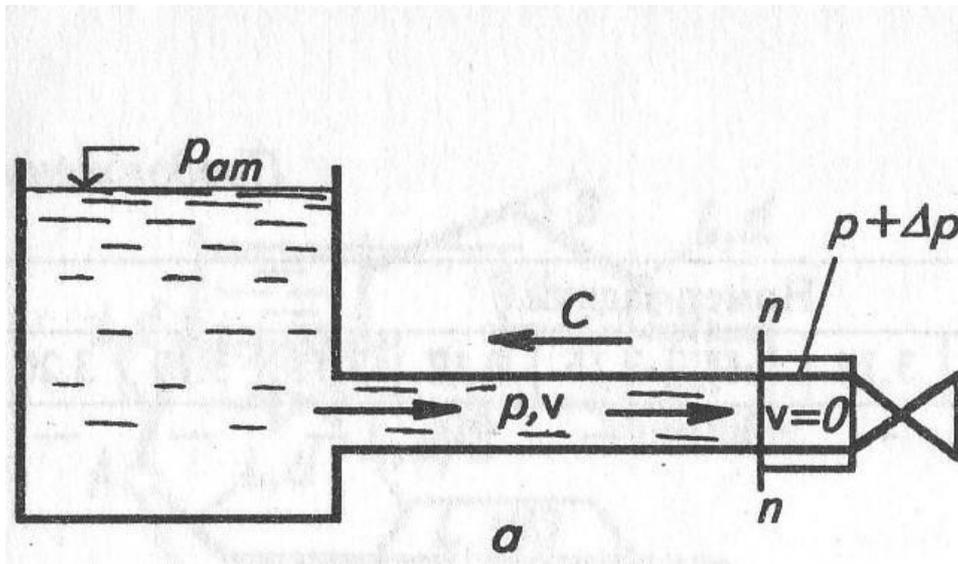


- *Гидравлический удар* может служить примером неустановившегося напорного движения жидкости. Неустановившееся движение характеризуется изменением с течением времени значений местных скоростей и давления в пространстве, занятом движущейся жидкостью.

Гидравлический удар - явление, возникающее при напорном движении жидкости в трубе, при быстром изменении скорости в одном из сечений. Это явление характеризуется возникновением волны повышенного или пониженного давления, которая распространяется от места изменения скорости и вызывает в каждом сечении колебания давления и деформацию стенок трубопровода. Вследствие этого могут возникать осложнения в нормальной работе трубопровода вплоть до разрыва стенок и аварий оборудования насосных станций.



Гидравлический удар



- Исследования гидравлического удара были выполнены Н.Е.Жуковским. Этим ученым найдены основные расчетные зависимости для вычисления изменения давления при гидравлическом ударе.

Гидравлический удар может возникнуть в результате быстрого закрытия или открытия запорных и регулирующих устройств, внезапной остановки насоса, пуска насоса при открытом затворе на нагнетательной линии. Характер процесса гидравлического удара зависит от вызвавших его причин.

Приведем формулы для определения повышения давления при гидравлическом ударе при мгновенном закрытии затвора. Их называют формулами Н.Е.Жуковского.

$$\Delta p = \rho c u_0$$

- $c = (E_0/\rho)^{1/2} / (1 + DE_0/eE)^{1/2}$,

- где ρ – плотность жидкости; u_0 – скорость движения жидкости до гидравлического удара; c – скорость ударной волны; D – диаметр трубопровода; e – толщина стенки трубопровода; E_0 и E – модули упругости жидкости и материала трубы соответственно.

□

