

Тема 7. Гидравлический удар

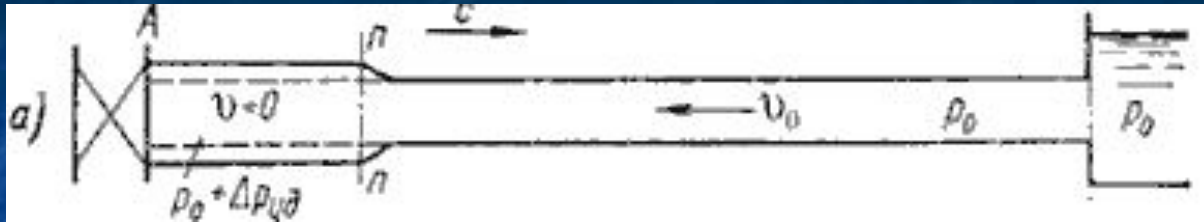
Гидравлический удар и его предотвращение

- **Гидравлическим ударом** называется резкое повышение давления, возникающее в напорном трубопроводе при внезапном торможении потока рабочей жидкости.
- Этот процесс является очень быстротечным и характеризуется чередованием резких повышений и понижений давления, которое связано **с упругими деформациями жидкости и стенок трубопровода.**
- Гидравлический удар чаще всего возникает при **резком открытии или закрытии** крана или другого устройства, управляемого потоком

Последствия гидравлического удара



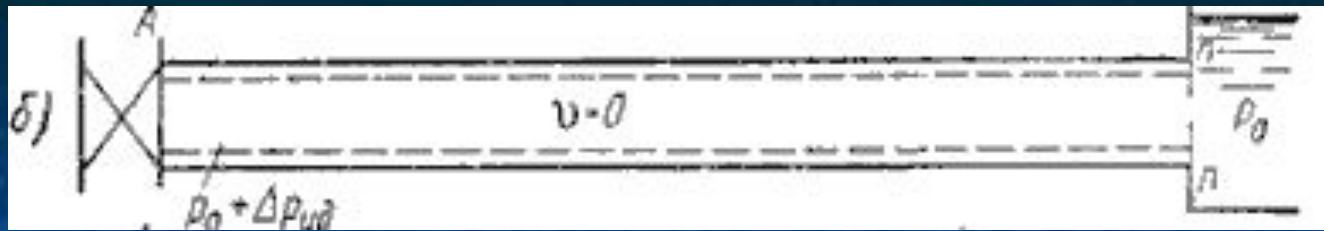
Стадии гидравлического удара



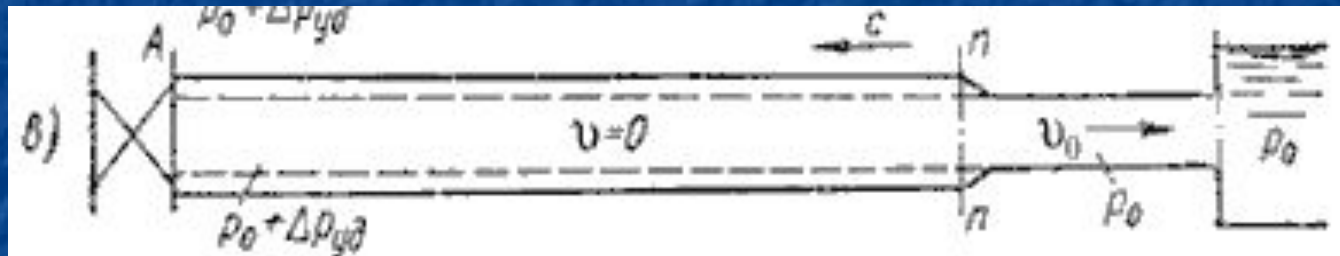
- а) Пусть в конце трубы, по которой движется

скоростью V_0 , произведено **мгновенное** закрытие крана А.

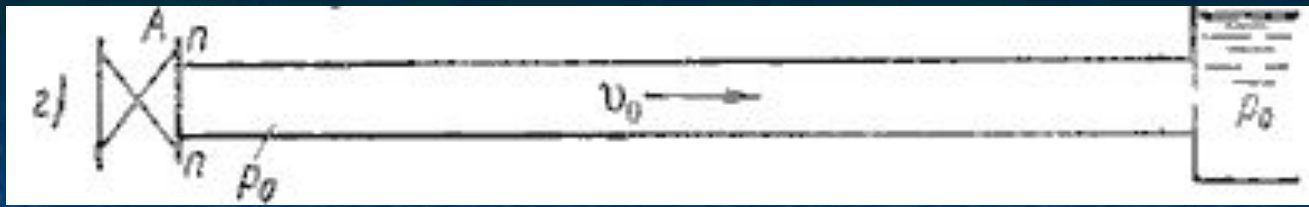
- Скорость частиц, натолкнувшихся на кран, будет погашена, а их кинетическая энергия перейдет в работу деформации стенок трубы и жидкости.
- При этом стенки трубы растягиваются, а жидкость сжимается в соответствии с увеличением давления на величину $\Delta P_{уд}$, которое называется **ударным**.
- Область (сечение n - n), в которой происходит увеличение давления, называется **ударной волной**.
- Ударная волна распространяется вправо со скоростью c , называемой **скоростью ударной волны**.



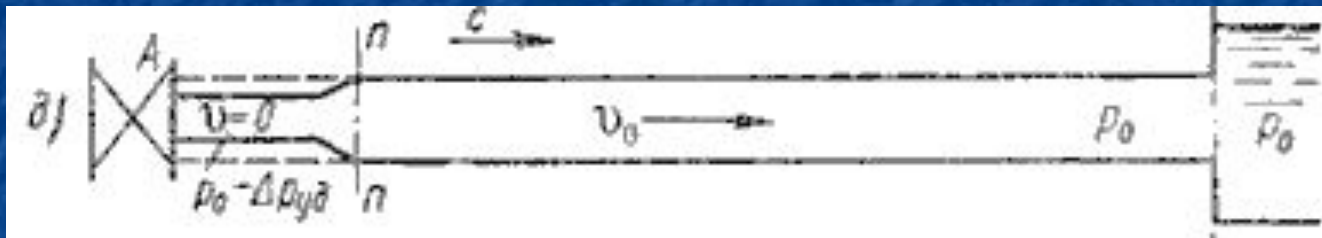
- б) Когда ударная волна переместится до резервуара, жидкость окажется остановленной и сжатой во всей трубе, а **стенки трубы - растянутыми**. Ударное повышение давления распространится на всю длину трубы



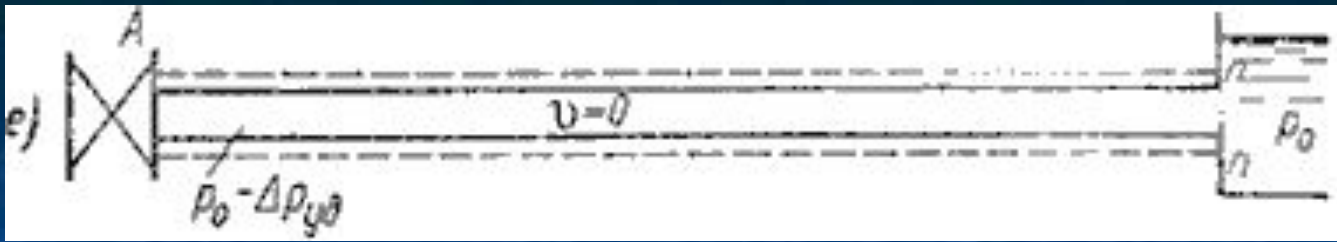
- в) Под действием перепада давления $\Delta P_{уд}$ частицы жидкости устремятся из трубы в резервуар. Теперь сечение **n-n** перемещается обратно к крану со скоростью **c**, оставляя за собой выровненное давление P_0



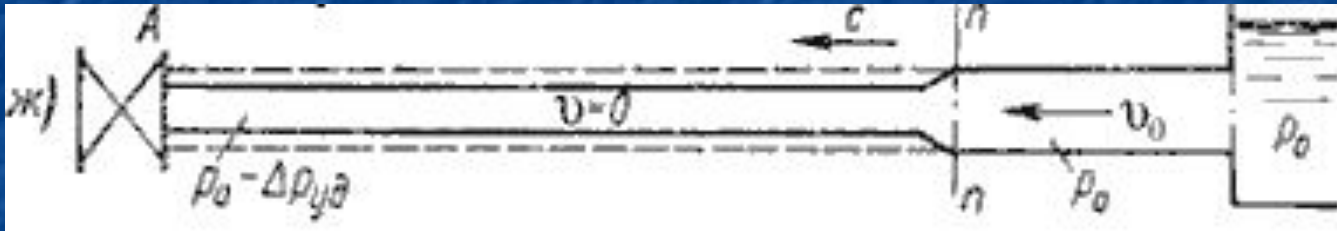
г) Жидкость и стенки трубы **упругие**, и они возвращаются к прежнему состоянию, соответствующему давлению P_0 . Работа деформации переходит в кинетическую энергию (за вычетом потерь, которые м. б. весьма малы), и жидкость в трубе приобретает первоначальную скорость V_0 , но с обратным знаком.



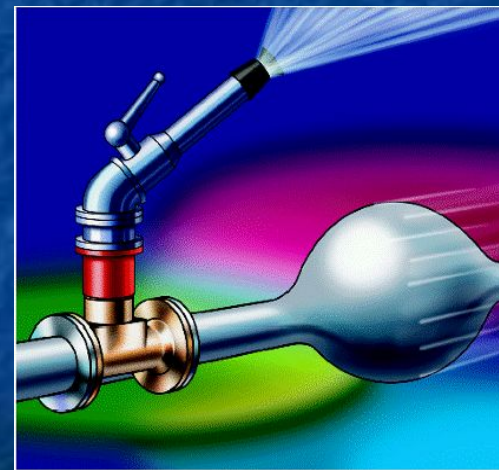
д) Возникает отрицательная ударная волна под давлением $P_0 - \Delta P_{уд}$ (движется от крана к резервуару со скоростью c), за ней - сжавшиеся стенки трубы и расширившаяся жидкость. Кинетическая энергия жидкости вновь переходит в работу деформаций, но противоположного знака



е) Состояние трубы в момент прихода отрицательной ударной волны к резервуару не является равновесным (аналогично случаю б, но с обратным знаком).



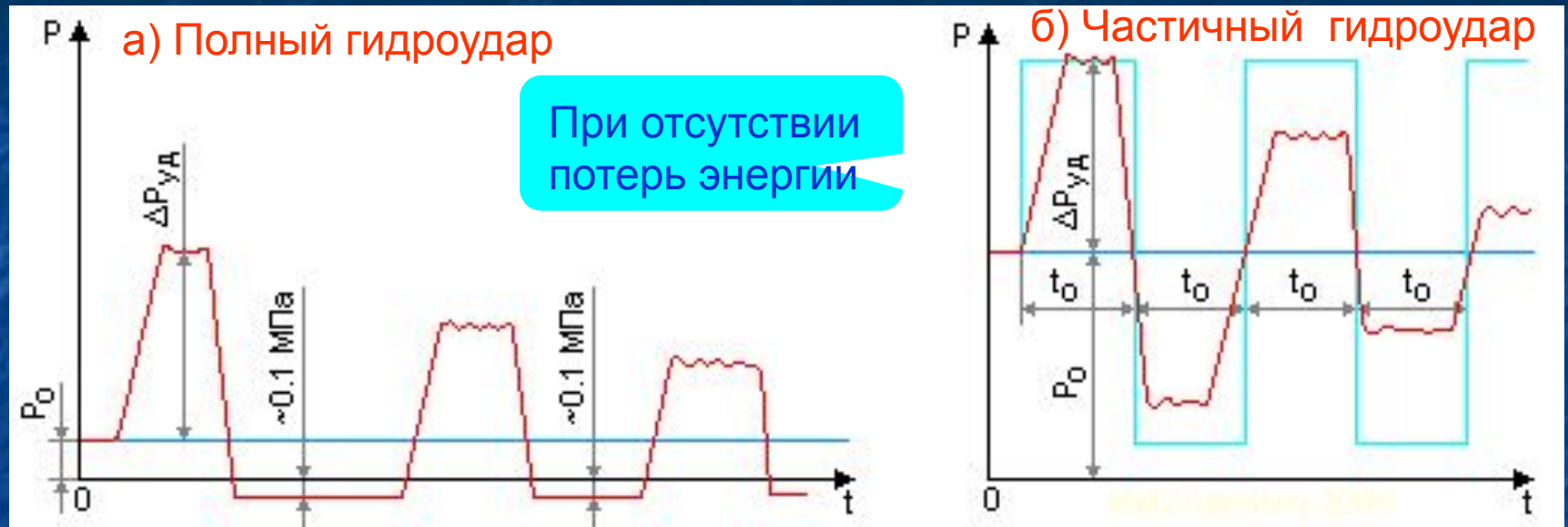
ж) Снова начинается процесс выравнивания давления в трубе и резервуаре, сопровождающийся движением жидкости со скоростью V_0 .



Весь цикл гидравлического удара будет повторяться с некоторым уменьшением амплитуды $\Delta P_{уд}$

Как только отраженная от резервуара ударная волна под давлением $\Delta P_{уд}$ достигнет крана, возникнет ситуация а.

Изменение давления при гидроударе



Явление гидравлического удара объяснил в 1897-1899 г. **Н.Е. Жуковский** - показал, что увеличение давления при гидроударе определяется по формуле:

$$\Delta p_{уд} = \rho \cdot c \cdot (V_0 - V) = \rho \cdot c \cdot \Delta V \quad - \text{формула Жуковского}$$

$c = 2L / \tau$ - скорость распространения ударной волны вдоль трубопровода, м/с;

τ - время закрытия задвижки, с.

Виды гидравлических ударов

В зависимости от времени распространения ударной волны t и времени перекрытия задвижки T (или другой запорной арматуры) выделяются 2 вида ударов:

а) **Полный (прямой) гидроудар** - возникает, если время перекрытия задвижки меньше двойного времени пробега волны T .

$$\tau < T = \frac{2L}{c} \quad T - \text{период трубопровода}$$

Теряется вся скорость потока - переходит в энергию давления и упругих деформаций стенок трубы. Возможно повторное неоднократное прохождения фронта волны в прямом и обратном направлениях.

$$\Delta p_{\text{п}} = a \cdot \rho \cdot V_0 \quad - \text{заброс давления при полном гидроударе;}$$

a - скорость звука в трубе.

Скорость ударной волны (скорость звука) в трубе

$$c = a = \frac{l}{\sqrt{\frac{\rho}{K} + \frac{2\rho \cdot r}{\delta \cdot E}}}$$

Здесь r - радиус трубопровода;

E - модуль упругости материала трубы;

δ - толщина стенки трубопровода;

K - объемный модуль упругости жидкости

Если труба имеет **абсолютно жесткие стенки**, т.е. $E = \infty$, то скорость ударной волны определится из выражения

$$a \approx \sqrt{\frac{K}{\rho}}$$

Для воды эта скорость равна 1435 м/с, для бензина 1116 м/с, для масла 1200 - 1400 м/с

б) Частичный (непрямой) гидроудар

Если время закрытия задвижки больше фазы удара (периода трубопровода), такой удар называется непрямым.

$$\tau > T = \frac{2L}{c}$$

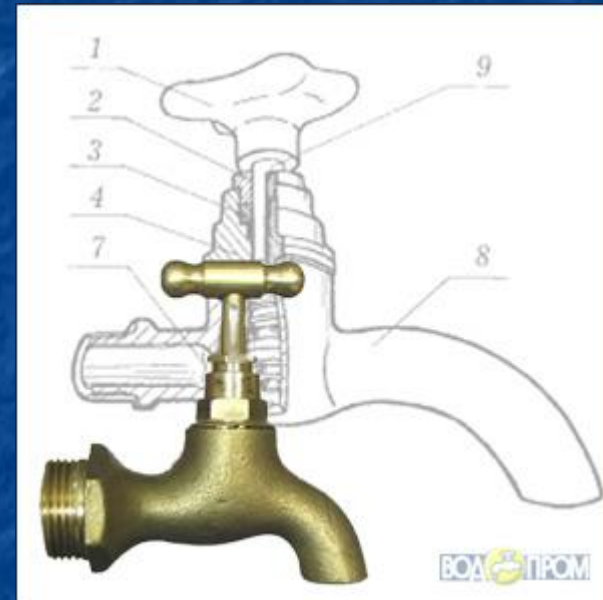
В этом случае дополнительное давление может быть определено по формуле:

$$\Delta p_n \approx \frac{T}{\tau} \Delta p_{II}$$

Ещё один вариант — наличие утечек из трубы во время гидроудара (неполное перекрытие трубы заслонкой или заглушкой, наличие в трубе дополнительных отверстий (созданных специально или аварийных) помимо входа. **Суммарная площадь таких отверстий или незакрытого просвета должна быть меньше внутреннего сечения трубы**, иначе гидроудара не будет в принципе.

Предотвращение возникновения гидравлического удара

- уменьшение скорости движения жидкости в трубопроводе, увеличив его диаметр;
- увеличение времени закрытия затвора;



- установка демпфирующих устройств-компенсаторов;
- уменьшение расстояния L между задвижками (переход к непрямому гидроудару).

Тема 8.

Гидравлический расчет простых трубопроводов

*При расчетах напорных трубопроводов основной задачей является либо **определение пропускной способности (расхода)**, либо **потери напора на том или ином участке**, равно как и на всей длине, либо **диаметра трубопровода при заданном расходе и потерях напора**.*

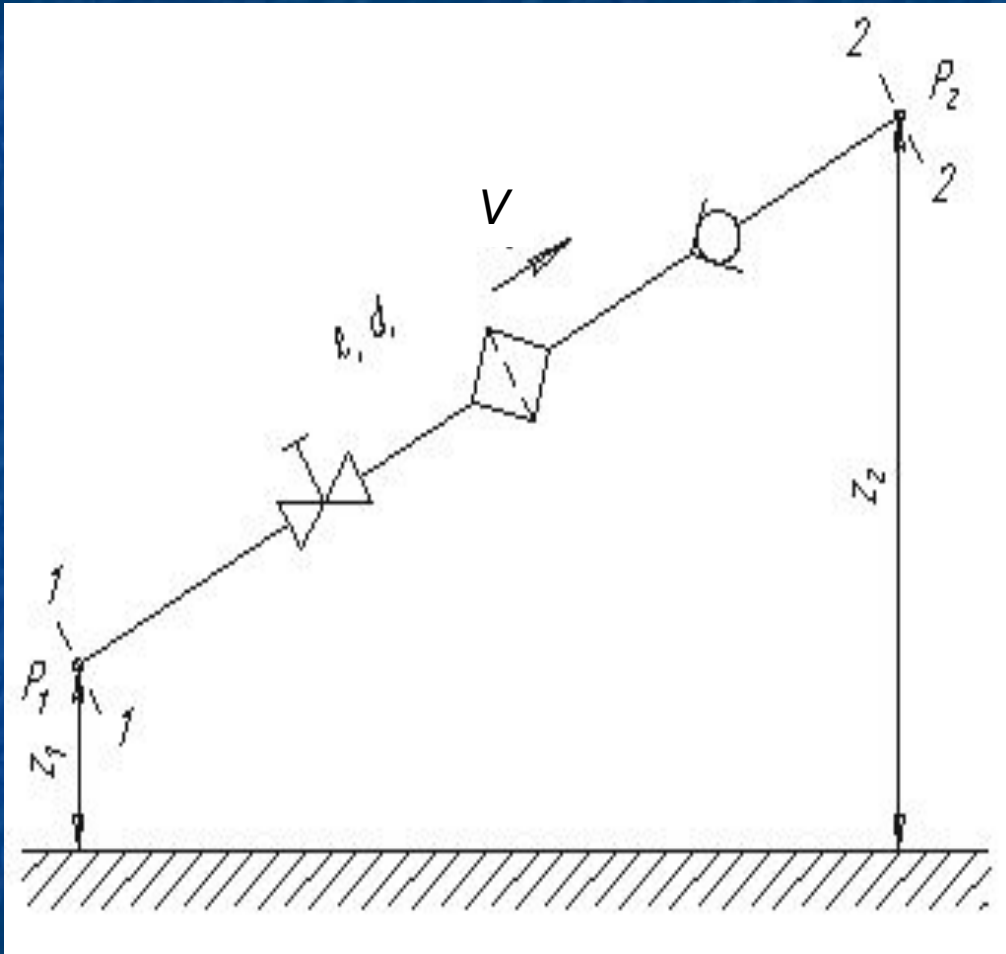
Классификация трубопроводов

- Трубопроводы делятся на *короткие и длинные*.
- **Короткие трубопроводы** - трубопроводы, в которых местные потери напора превышают 5...10% потерь напора по длине. При расчетах таких трубопроводов обязательно учитывают потери напора в местных сопротивлениях.
- **Длинные трубопроводы** - в которых местные потери меньше 5...10% потерь напора по длине. Их расчет ведется без учета местных потерь. К таким трубопроводам относятся, например, магистральные водоводы, нефтепроводы.

Классификация трубопроводов

- По гидравлической схеме работы **длинных трубопроводов** их делят на **простые и сложные**.
- **Простыми** называются **последовательно соединенные** трубопроводы одного или различных сечений, **не имеющие никаких ответвлений**.
- К **сложным трубопроводам** относятся системы труб с одним или несколькими ответвлениями (**разветвленные**) , с **параллельными ветвями** и т. д. К сложным относятся и так называемые **кольцевые трубопроводы**.

Простой трубопровод постоянного сечения



- Жидкость движется по трубопроводу, так как ее энергия в начале трубопровода больше, чем в конце.
- Перепад уровней - работой насоса;
- разностью уровней жидкости;
- давлением газа.

Запишем уравнение Бернулли для сечений 1-1 и 2-2.

Скорость в сечениях одинакова и $\alpha_1 = \alpha_2$, т.е. скоростной напор можно не учитывать.

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \sum h \quad \text{или} \quad \frac{p_1}{\rho g} = z_2 - z_1 + \frac{p_2}{\rho g} + \sum h$$

$$\frac{p_1}{\rho g} = H_{\text{расп}}$$

- располагаемый напор;

- потребный напор;

$$z_2 - z_1 + \frac{p_2}{\rho g} + \sum h = H_{\text{потр}}$$

- статический напор;

$$z_2 - z_1 + \frac{p_2}{\rho g} = \Delta z + \frac{p_2}{\rho g} = H_{\text{ст}}$$

- потери напора между сечениями 1 и 2.

$$\sum h = KQ^m$$

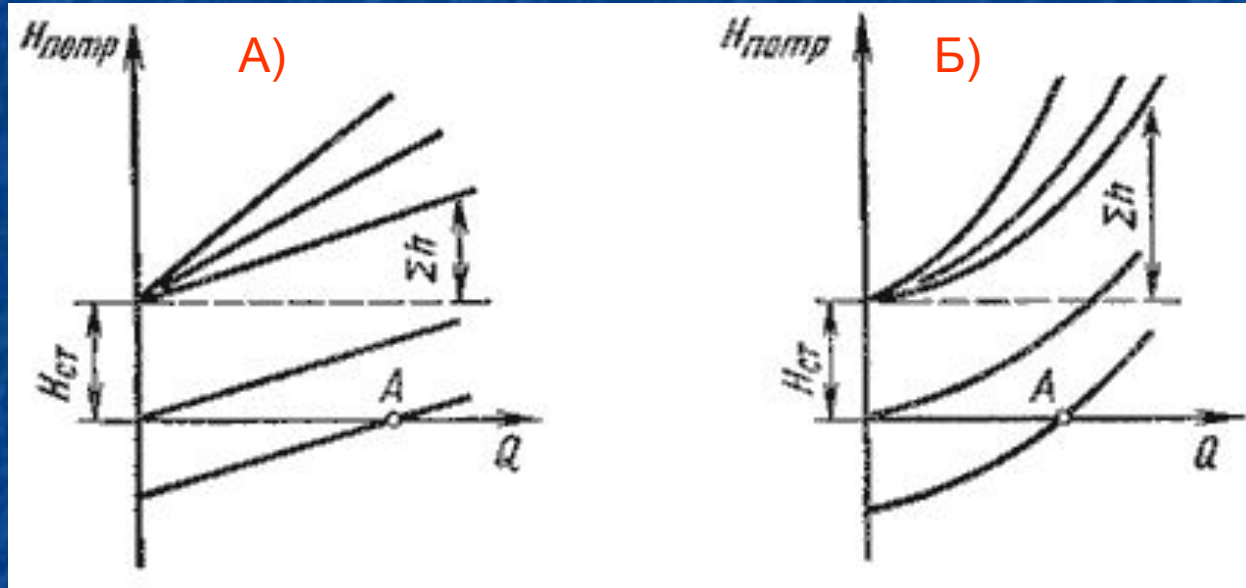
$$H_{\text{потр}} (H_{\text{расп}}) = H_{\text{ст}} + KQ^m$$

- уравнение Бернулли для простого трубопровода

Кривые потребного напора

- графическое представление уравнения Бернулли

$$H_{\text{потр}} = H_{\text{ст}} + KQ^m$$



где K - приведенный коэффициент сопротивления трубопровода;
 Q - расход жидкости;
 $m = f(Re)$ - показатель степени, зависящий от режима течения.

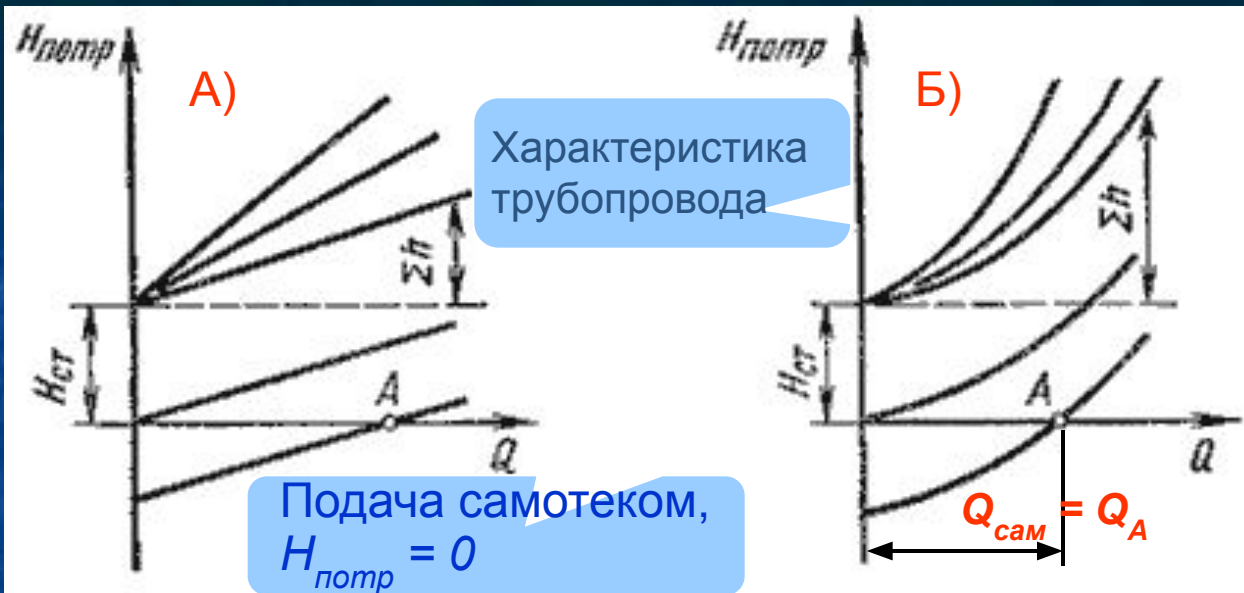
А) Ламинарный режим течения

$$K_{\text{л}} = \frac{128\nu \cdot l_{\text{расч}}}{\pi g d^4}; \quad m = 1;$$

$$l_{\text{расч}} = l + l_{\text{экв}}.$$

Б) Турбулентный режим течения

$$K_{\text{Т}} = \left(\sum \xi_m + \lambda_{\text{Т}} \frac{l}{d} \right) \frac{16}{2g\pi^2 d^4}; \quad m = 2$$



$$H_{потр} = H_{ст} + KQ^m$$

Чем больше расход Q , который надо обеспечить в трубопроводе, тем больше требуется потребный напор $H_{потр}$.

- Крутизна кривых потребного напора зависит от приведенного сопротивления трубопровода K и возрастает с увеличением длины трубопровода и уменьшением диаметра, а также с увеличением местных гидравлических сопротивлений.
- Величина статического напора $H_{ст} > 0$, когда жидкость движется вверх или в полость с повышенным давлением, и $H_{ст} < 0$ при опускании жидкости или движении в полость с пониженным давлением.
- Точка пересечения кривой потребного напора с осью абсцисс (точка А) определяет расход при движении жидкости самотеком.

Соединения простых трубопроводов

Простые трубопроводы могут соединяться между собой, при этом их соединение может быть *последовательным* или *параллельным*.

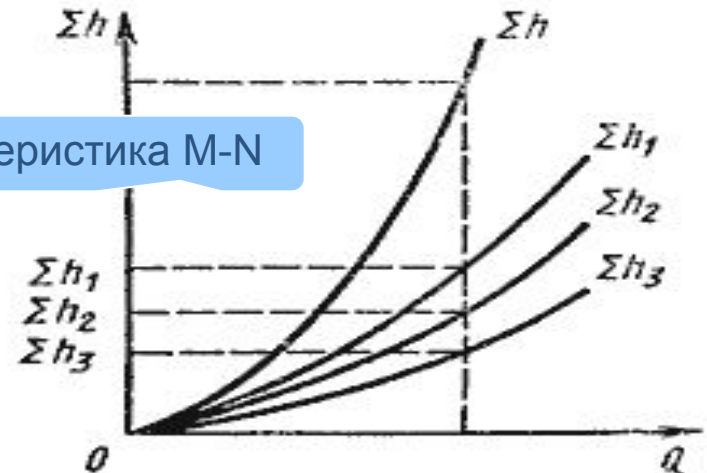
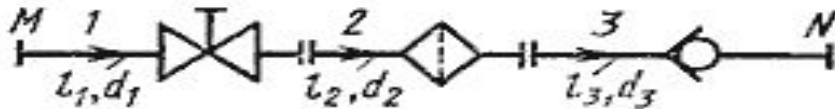
1. Последовательное соединение

а) График характеристики

$$Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q$$

$$\sum h_{M-N} = \sum h_1 + \sum h_2 + \sum h_3$$

Характеристика M-N



При подаче жидкости по составному трубопроводу от точки *M* к точке *N* расход жидкости *Q* в последовательно соединенных трубах 1, 2 и 3 будет одинаков, а полная потеря напора между точками *M* и *N* равна сумме потерь напора во всех последовательно соединенных трубах.

Правило построения характеристики трубопровода при последовательном соединении:

Если известны характеристики каждого трубопровода, то для построения характеристики всего последовательного соединения М-Н нужно сложить ординаты (Σh) всех кривых.

б) Аналитическое определение характеристики:

Так как $V_M \neq V_N$, то $H_{\text{потр}} = z_N - z_M + \frac{V_N^2 - V_M^2}{2g} + \Sigma h_{M-N} + \frac{p_N}{\rho g}$

Тогда $H_{\text{потр}} = H_{\text{ст}} + CQ^2 + KQ^m$,

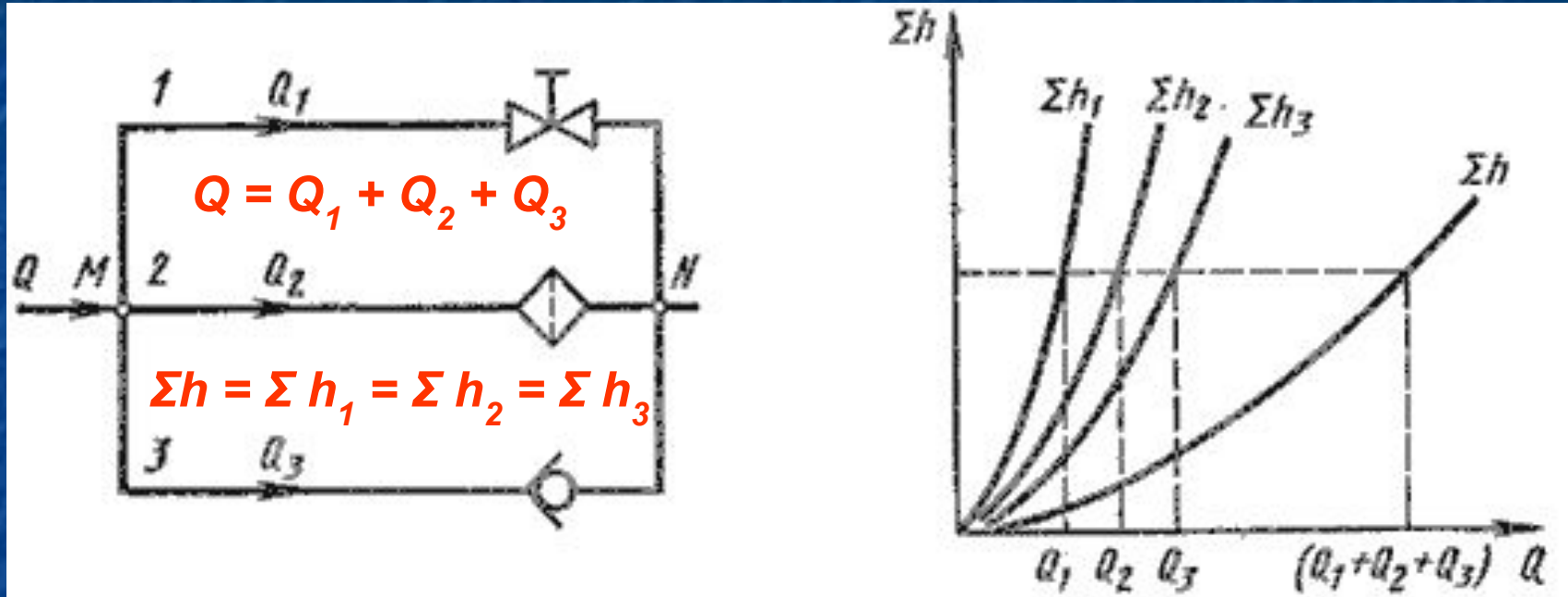
где $C = \frac{1}{2g} \left(\frac{1}{S_N^2} - \frac{1}{S_M^2} \right)$;

$H_{\text{ст}} = z_N - z_M + \frac{p_N}{\rho g}$;

K, m – аналогично простому трубопроводу.

2. Параллельное соединение.

Трубопроводы 1, 2 и 3 расположены горизонтально.



Потери
напора:

$$\Sigma h_1 = H_M - H_N = K_1 Q_1^m;$$

$$\Sigma h_2 = H_M - H_N = K_2 Q_2^m;$$

$$\Sigma h_3 = H_M - H_N = K_3 Q_3^m.$$

Таким образом:

$$K_1 Q_1^m = K_2 Q_2^m = K_3 Q_3^m$$

H_M, H_N - полные напоры в точках M и N

Потери напора в параллельных трубопроводах равны между собой

$$K_1 Q_1^m = K_2 Q_2^m = K_3 Q_3^m$$

Правило построения характеристики трубопровода при параллельном соединении:

Если известны характеристики каждого трубопровода, то для построения характеристики параллельного соединения нескольких трубопроводов следует сложить абсциссы (расходы Q) характеристик этих трубопроводов при одинаковых ординатах (Σh).

3. Разветвленное соединение

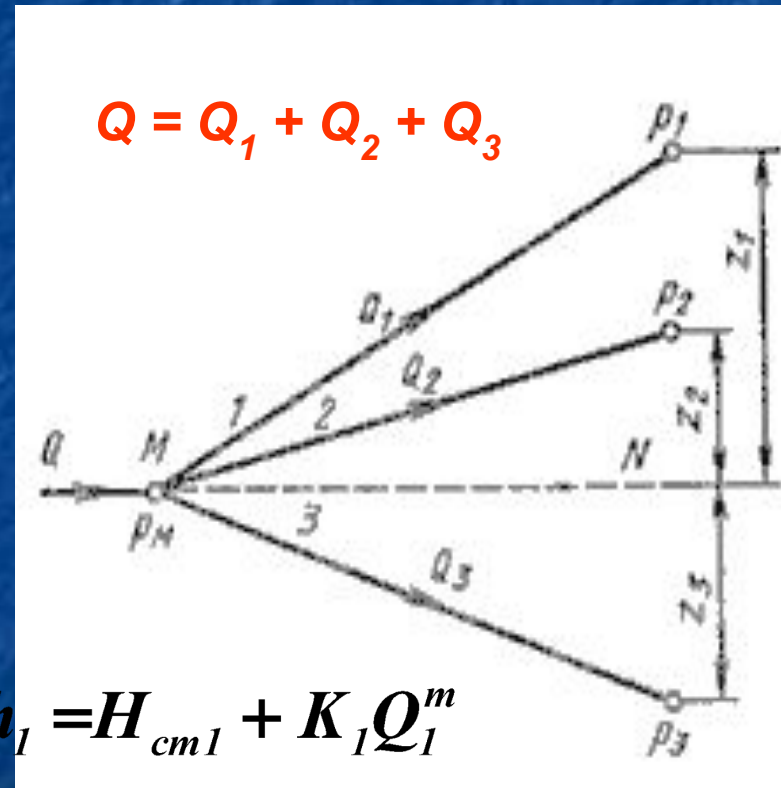
Разветвленным соединением называется совокупность нескольких простых трубопроводов, имеющих одно общее сечение - место разветвления (или смыкания) труб.

Записав уравнение Бернулли для сечения $M-M$ и конечного сечения, например первого трубопровода, получим (пренебрегая разностью скоростных высот) :

$$H_M = z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \sum h_1 = H_{cm1} + \sum h_1 = H_{cm1} + K_1 Q_1^m$$

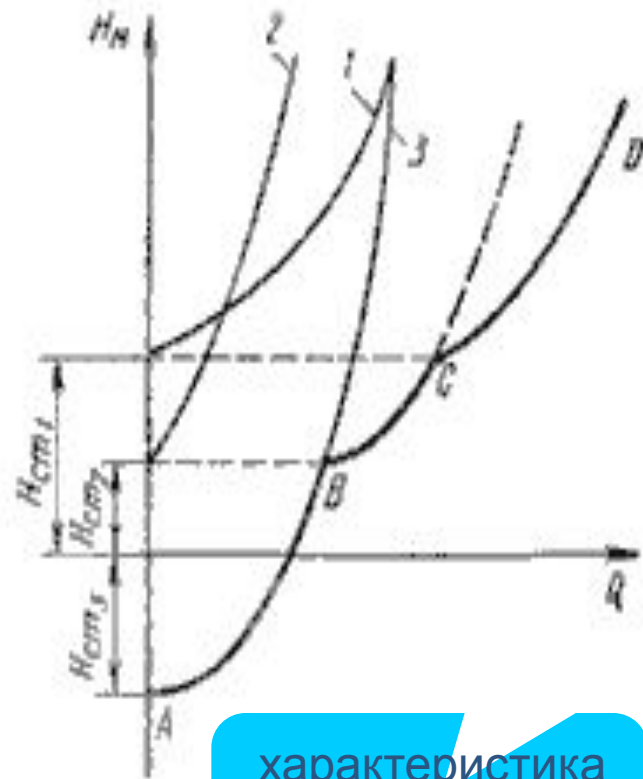
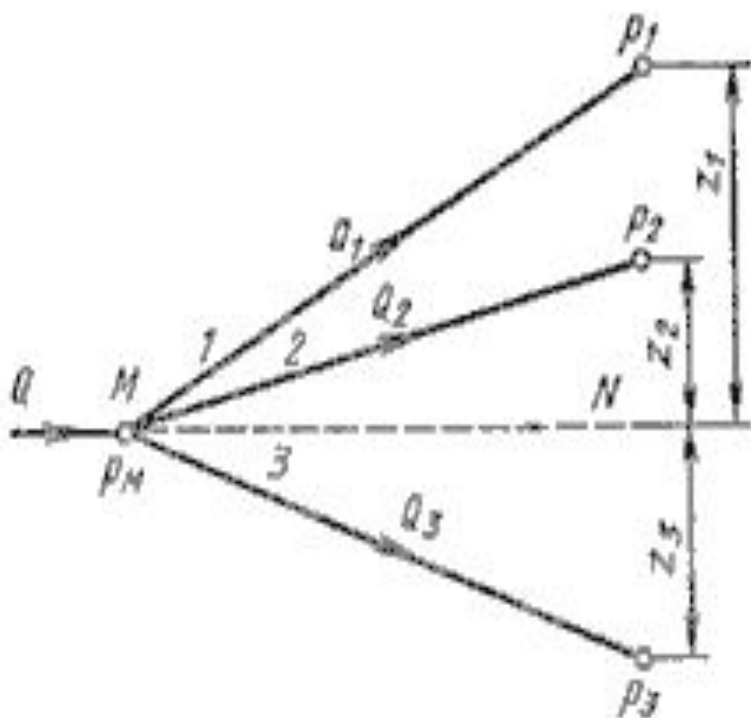
$H_M = H_{cm2} + K_2 Q_2^m$; - по аналогии для второго и третьего

$H_M = H_{cm3} + K_3 Q_3^m$. трубопроводов



Таким образом, при располагаемом напоре H_M через ветви обеспечиваются расходы Q_1, Q_2, Q_3 .

Для построения характеристики всего трубопровода их надо сложить.



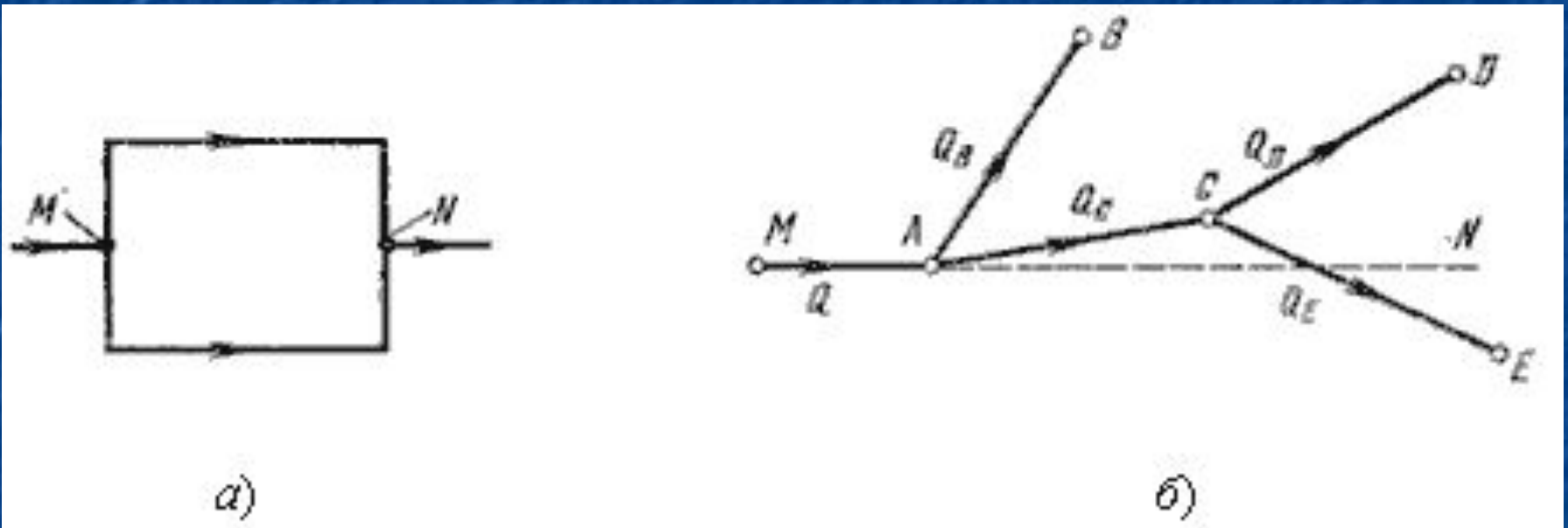
характеристика
разветвленного
трубопровода

Правило построения характеристики трубопровода при разветвленном соединении:

- Построение кривой потребного напора для разветвленного трубопровода выполняется **сложением кривых потребных напоров для ветвей по правилу сложения характеристик параллельных трубопроводов** - сложением абсцисс (Q) при одинаковых ординатах (H_M).
- Условием подачи жидкости во все ветви является неравенство $H_M > H_{cm1}$.

Сложные трубопроводы

Сложный трубопровод м.б. составлен из простых трубопроводов с последовательным и параллельным их соединением (а) или с разветвлениями (б).



Расчет сложных трубопроводов обычно выполняют **графоаналитическим способом**, т.е. с применением кривых потребного напора и характеристик трубопроводов.

Кривую потребного напора для сложного трубопровода строят следующим образом:

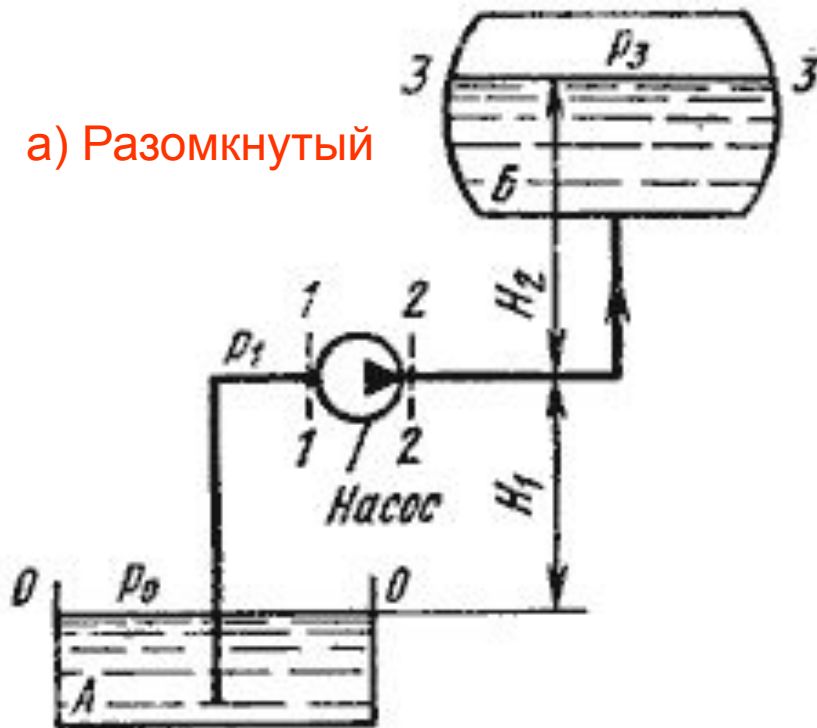
- 1) сложный трубопровод разбивают на ряд простых;
- 2) строят кривые потребных напоров для каждого из простых трубопроводов;
- 3) складывают кривые потребных напоров для ветвей (и параллельных линий, если они имеются) по правилу сложения характеристик параллельных трубопроводов;
- 4) полученную кривую складывают с характеристикой последовательно присоединенного трубопровода по соответствующему правилу (см. ранее).

Таким образом, при расчете идут от конечных точек трубопровода к начальной точке, т.е. против течения жидкости.

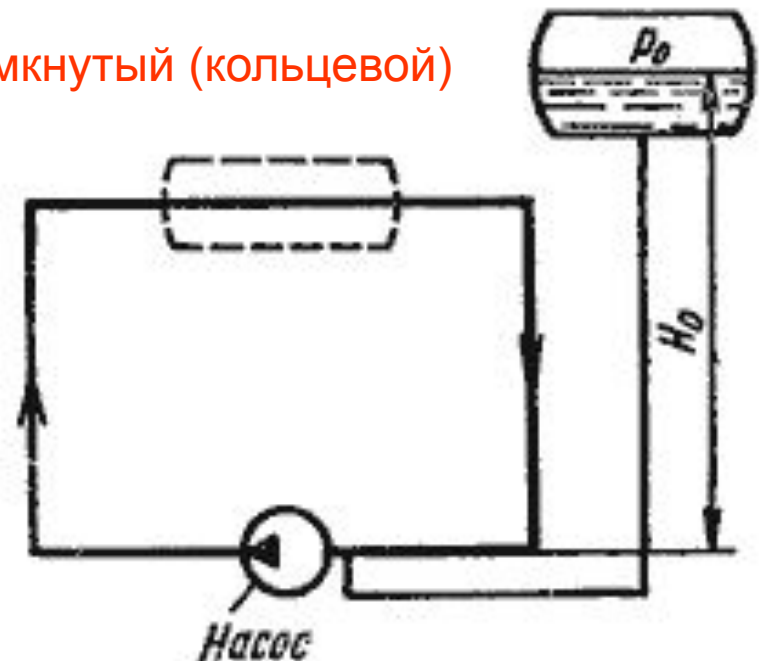
Трубопроводы с насосной подачей жидкости

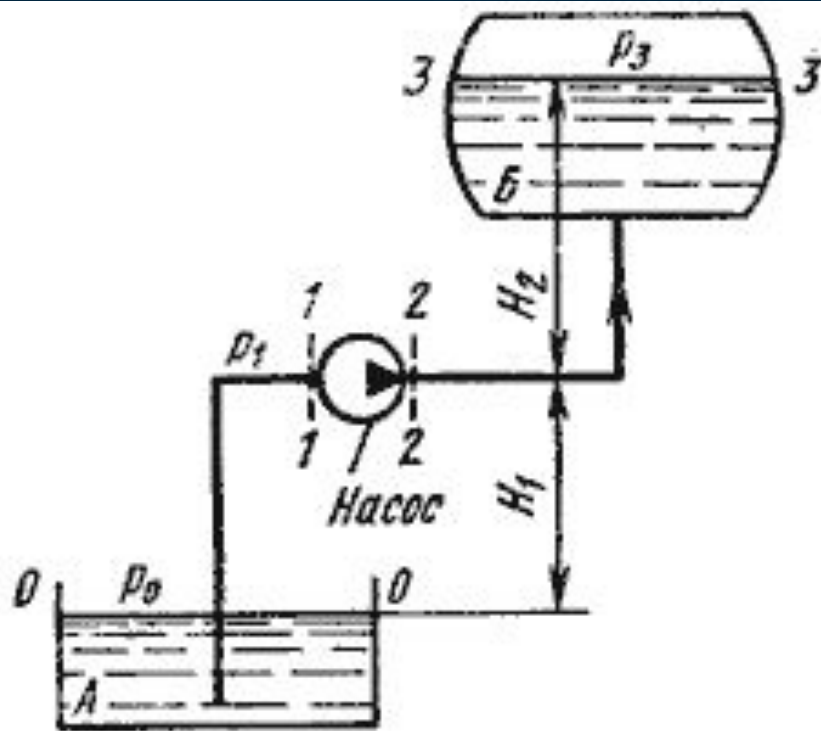
Перепад уровней энергии, за счет которого жидкость течет по трубопроводу, часто создается работой насоса. Рассмотрим совместную работу трубопровода с насосом и принцип расчета трубопровода с насосной подачей жидкости.

а) Разомкнутый



б) Замкнутый (кольцевой)





H_1 - высота расположения оси насоса - **геометрическая высота всасывания**, Трубопровод, по которому жидкость поступает к насосу - **всасывающий трубопровод (линия всасывания)**.

H_2 - высота расположения конечного сечения трубопровода - **геометрическая высота нагнетания**. Трубопровод, по которому жидкость движется от насоса - **напорный трубопровод (линия нагнетания)**.

Составим уравнением Бернулли для потока рабочей жидкости **во всасывающем трубопроводе**, т.е. для сечений 0-0 и 1-1, принимая $\alpha = 1$:

$$\frac{P_0}{\rho g} = H_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + \sum h_{0-1}$$

Запишем уравнение Бернулли для **напорного** трубопровода, т.е. для сечений 2-2 и 3-3:

Энергия на выходе насоса

$$\frac{p_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} = H_2 + \frac{p_3}{\rho g} + \sum h_{2-3}$$

Энергия на входе насоса

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{p_0}{\rho g} - H_1 - \sum h_{0-1}$$

Приращение энергии жидкости, проходящей через насос = энергия, сообщаемая жидкости насосом - **напор насоса** $H_{нас}$

$$H_{нас} = \left(\frac{p_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} \right) - \left(\frac{p_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} \right) = H_1 + H_2 + \frac{p_3 - p_0}{\rho g} + \sum h_{0-1} + \sum h_{2-3}$$

$$H_{нас} = \Delta z + \frac{p_3 - p_0}{\rho g} + K \cdot Q^m = H_{ст} + K \cdot Q^m$$

где $\Delta z = H_1 + H_2$ - полная геометрическая высота подъема жидкости;

KQ^m - сумма гидравлических потерь;

P_3 и P_0 - давление в верхней и нижней емкости соответственно.

Получаем уравнение:

$$H_{\text{нас}} = H_{\text{потр}}$$

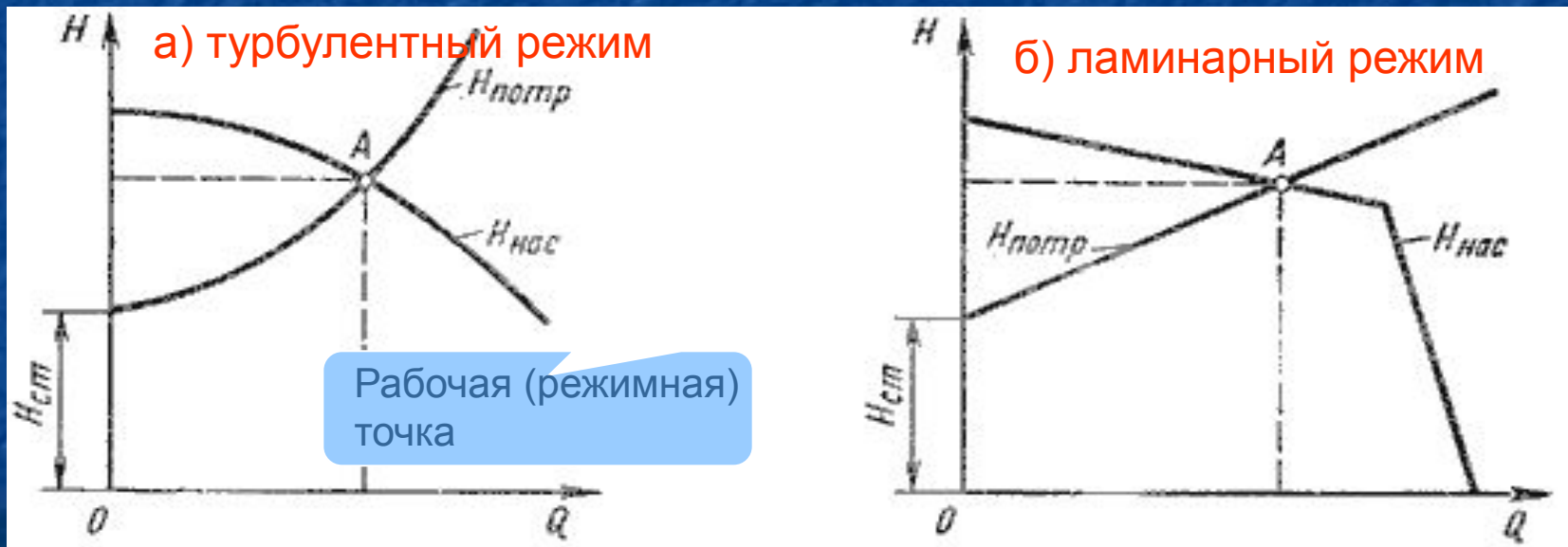
Правило устойчивой работы насоса:

при установившемся течении жидкости в трубопроводе насос развивает напор, равный потребному.

Графический расчет трубопровода с насосной подачей жидкости

- заключается в совместном построении в одном и том же масштабе и на одном графике двух кривых:

напора $H_{потр} = f_1(Q)$ и характеристики* насоса $H_{нас} = f_2(Q)$ и в нахождении их точки пересечения A .



* Характеристикой насоса называется зависимость напора, создаваемого насосом, от его подачи (расхода жидкости) при постоянной частоте вращения вала насоса.

Чтобы получить другую рабочую точку, необходимо:

- изменить открытие регулировочного крана (изменить характеристику трубопровода);
- или изменить частоту вращения вала насоса.

