

# Гидродинамика

Руководитель проекта:  
**Рыбакова Людмила  
Григорьевна,**  
преподаватель КФДГПК

В производственных процессах технологии машиностроения используются и перемещаются разнообразные жидкости: эмульсии, нефтепродукты, вода, минеральные масла по различным гидросистемам.



Озвучивала: Симанова О. , гр. 124  
Веб - режиссёр : Гребенников Д. гр. 024

# Гидродинамика

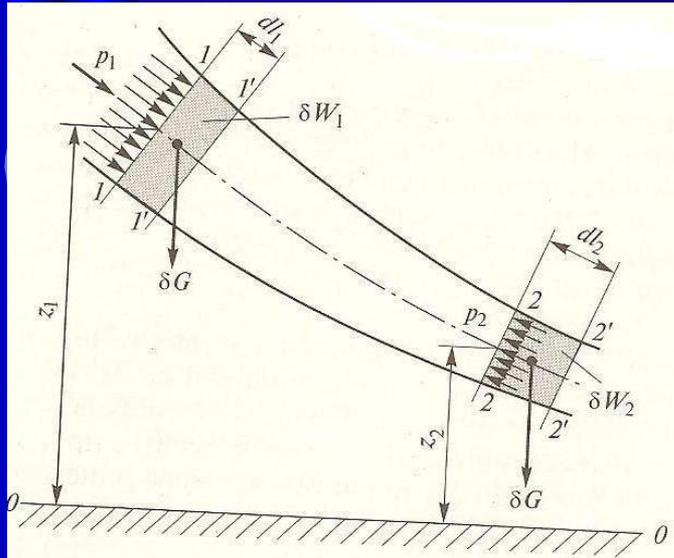


Схема струйки  
идеальной жидкости

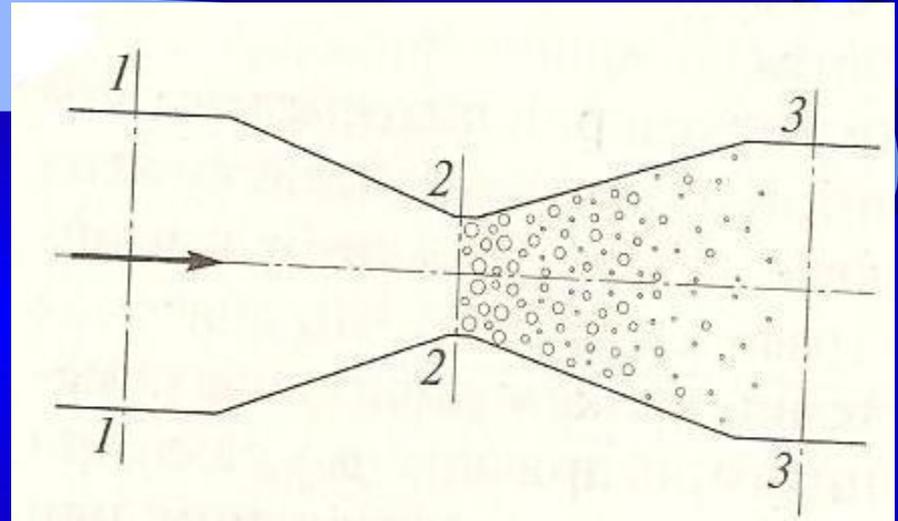
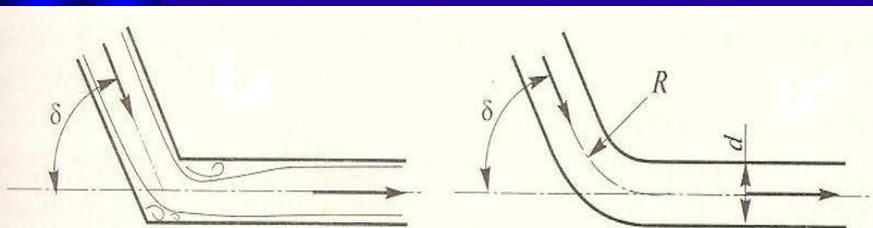
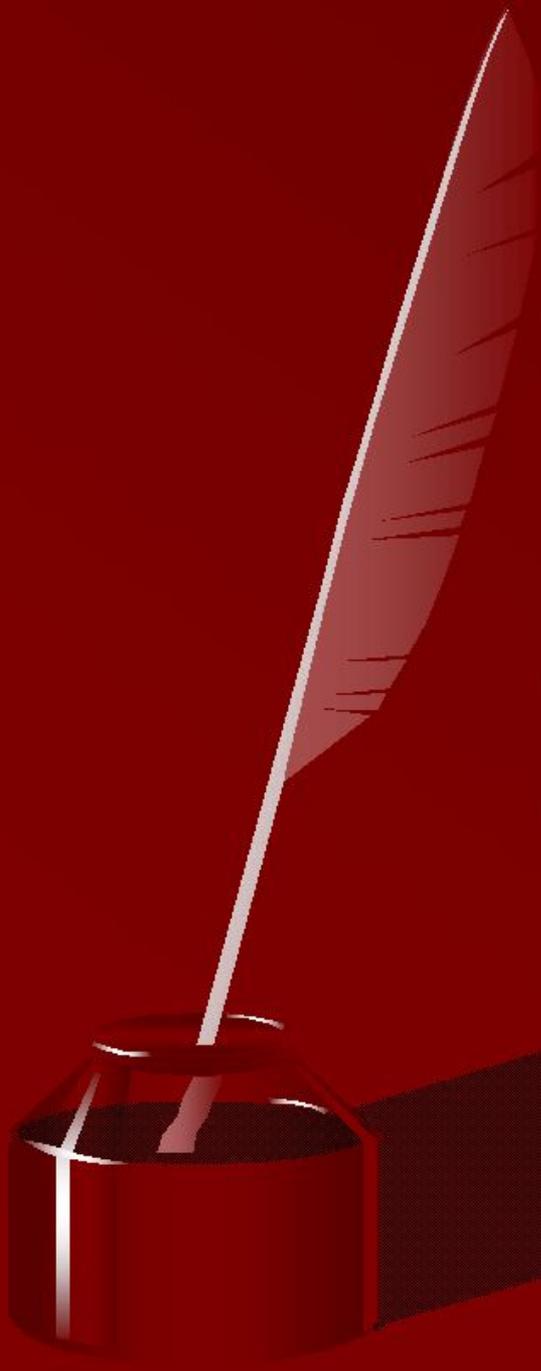


Схема кавитации в местном  
сопротивлении



Местное  
сопротивление

A quill pen is shown in an inkwell on the left side of the image. The quill is white with a dark tip and is positioned diagonally. The inkwell is a dark, rounded container. The background is a solid dark red color with a subtle gradient and a dark, curved shadow-like shape at the bottom.

Гидродинамика – это  
раздел гидравлики в  
котором изучается  
движение жидкости под  
действием  
приложенных к ней  
внешних сил.



# Введение в гидродинамику

**Поток жидкости** – это движение массы жидкости, ограниченной полностью или частично какими – либо поверхностями.

# Тема. Виды движения жидкости:

Установившееся



Неустановившееся



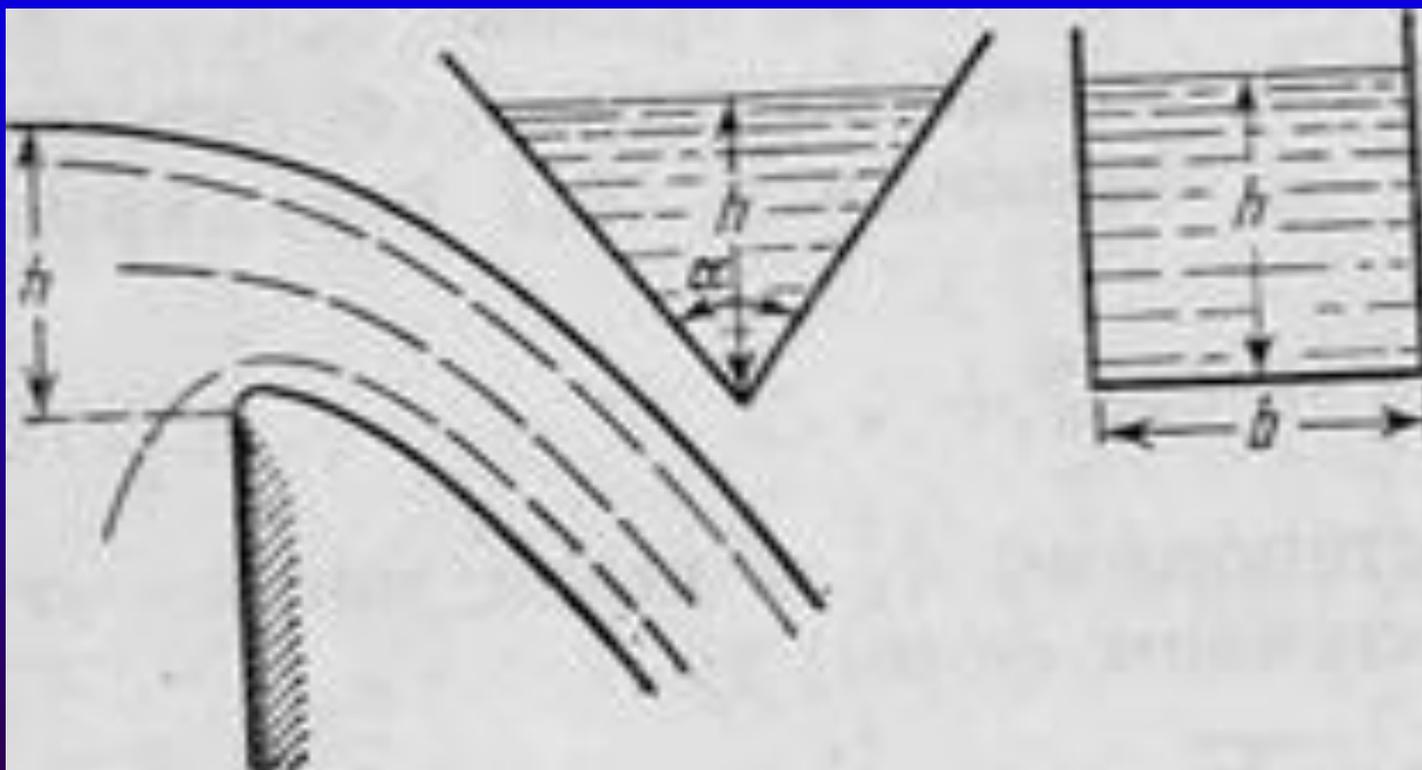
Установившееся движение – это движение, при котором скорость движения и давление потока жидкости в заданном сечении не изменяется с течением времени.

Наблюдается при постоянном напоре или уровне жидкости

$$h = \text{const}, \text{ т.е.}$$

КОЛИЧЕСТВА ПОСТУПАЮЩЕЙ В ЕМКОСТЬ И ВЫТЕКАЮЩЕЙ ИЗ НЕГО ЖИДКОСТИ ОДИНАКОВЫ.

# Схема установившегося ДВИЖЕНИЯ

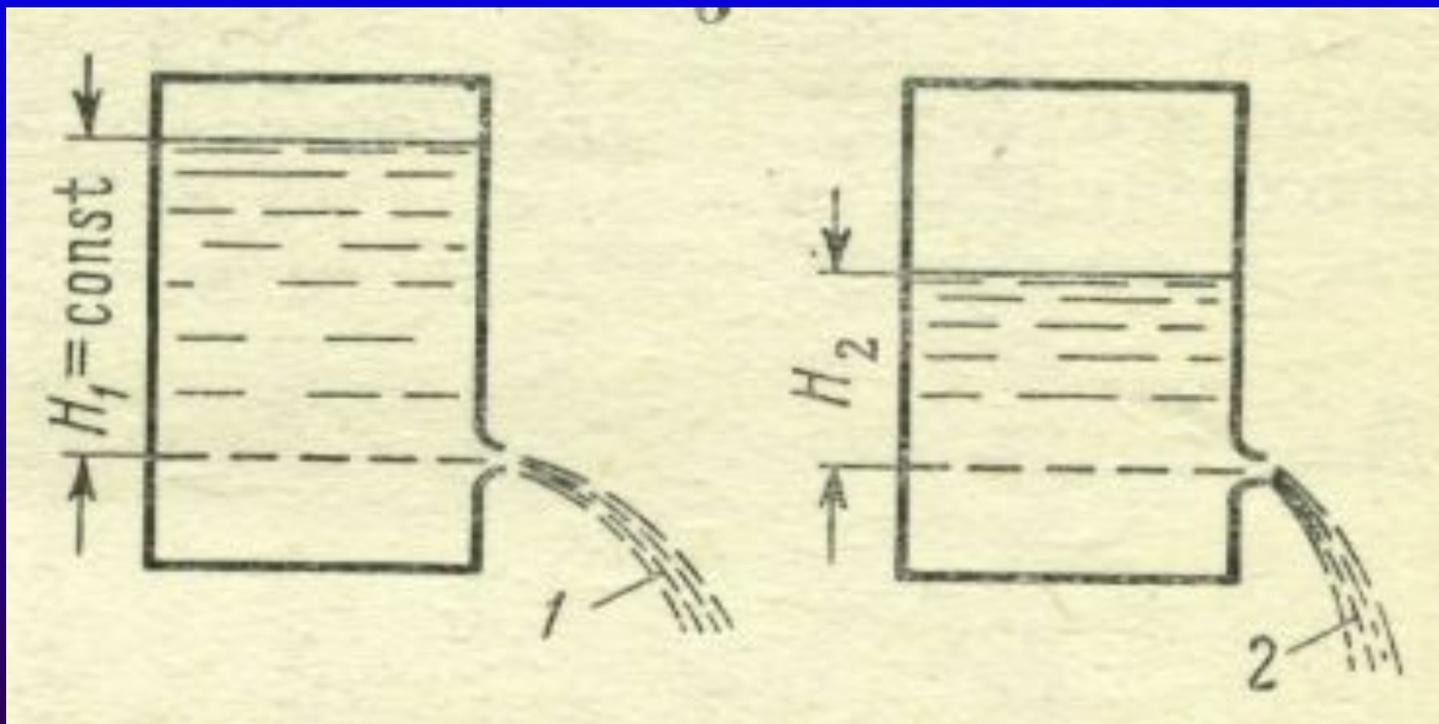


A fountain pen nib is shown in the upper left, pointing downwards. Below it is a glass inkwell. The background is a dark red gradient with a subtle pattern of horizontal lines. The text is in a bright yellow, bold font.

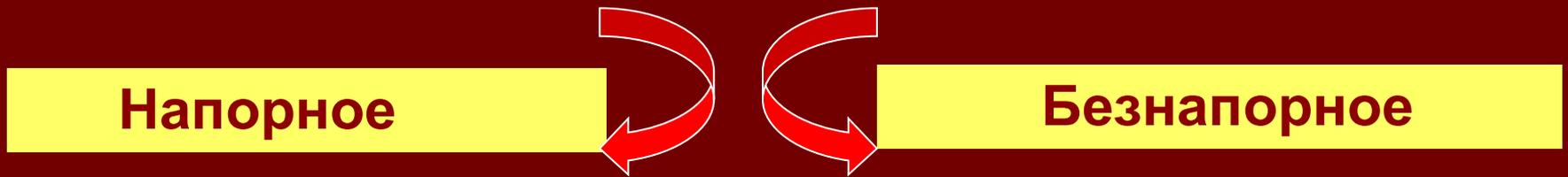
**Неустановившееся движение – это движение при котором скорость движения и давление в заданном сечении изменяются с течением времени.**

**Такое движение будет в том случае, если уровень жидкости в емкости с течением времени будет изменяться, например понижаться по мере вытекания жидкости (H2)**

# Схема неустановившогося ДВИЖЕННЯ



# Течения жидкости:



**Напорным называется течение жидкости в закрытых руслах без свободной поверхности. Это течение в трубопроводах, гидросистемах.**



**Безнапорным** называется течение со свободной поверхностью. Это течение в реках, открытых каналах, водоёмах.



# Движение жидкости может быть:

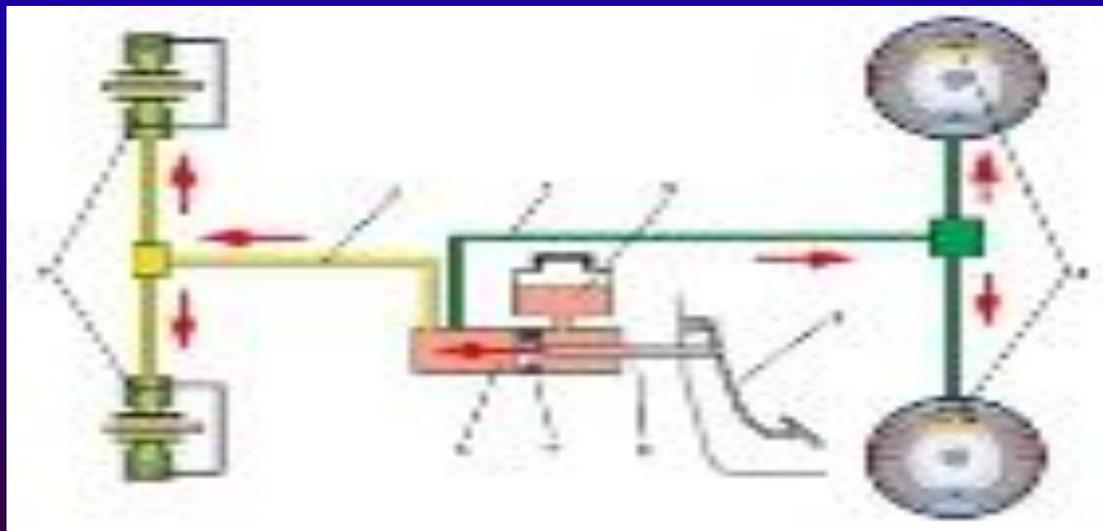
**Равномерным**



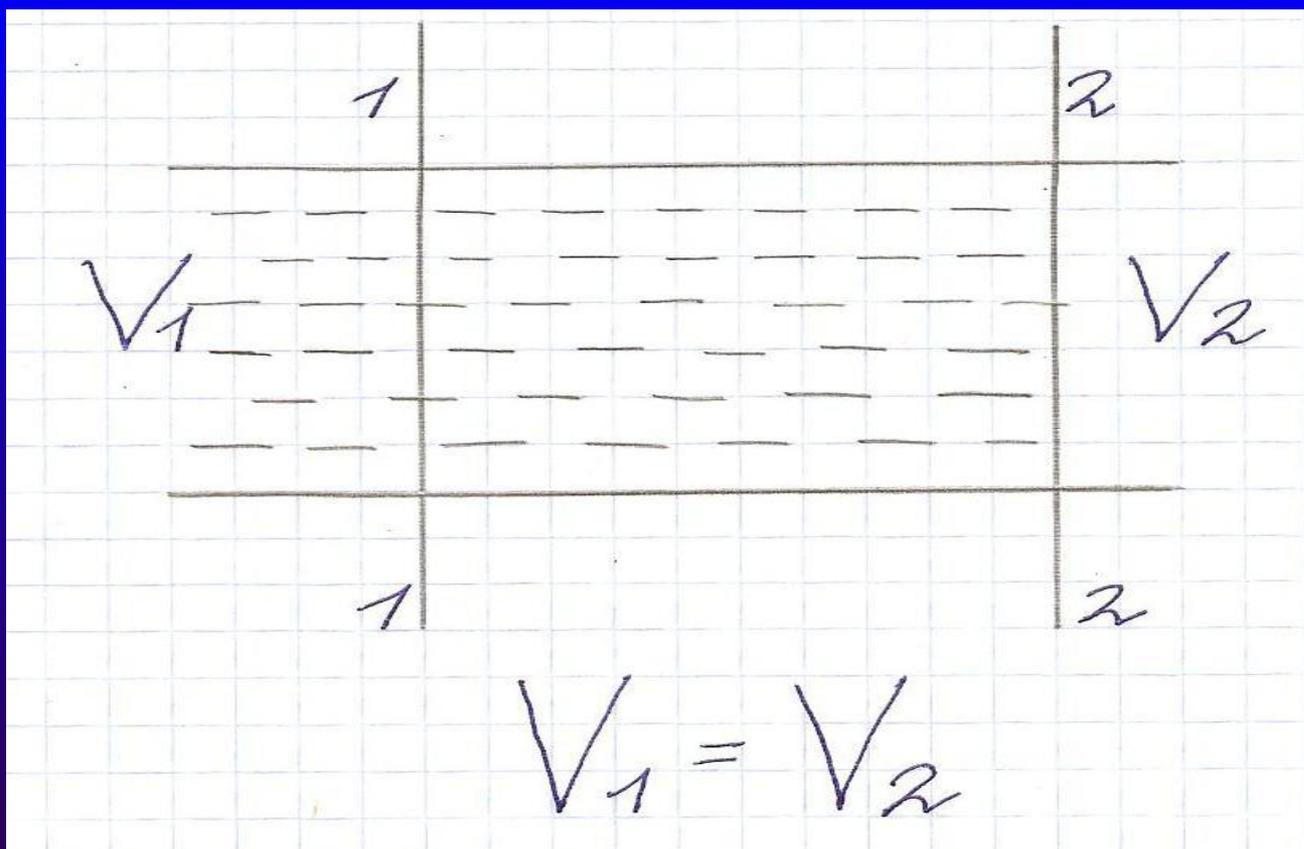
**Неравномерным**



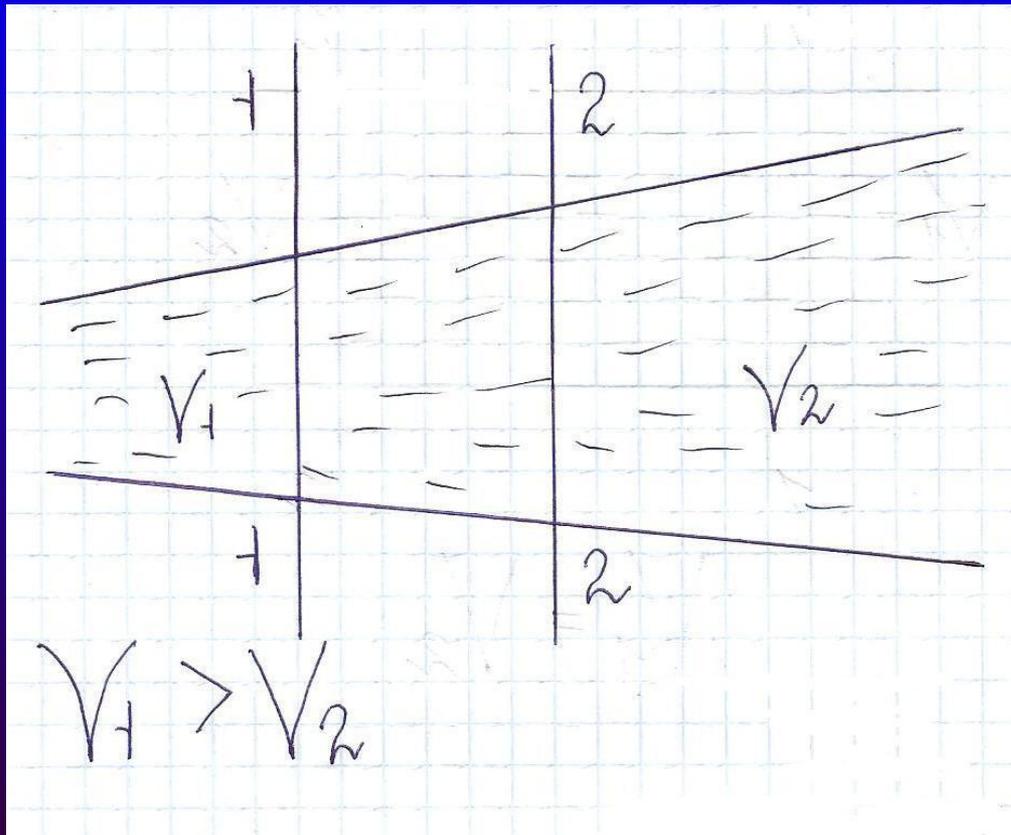
Равномерное движение – то движение, при котором скорости движения в двух смежных сечениях потока жидкости равны между собой.  
Это движение жидкости по цилиндрическому трубопроводу.



# Схема равномерного движения



В противном случае движение будет неравномерным.



Такое движение характерно для движения через коническую трубку.

# Тема. Режимы течения жидкости

Предположение о существовании двух режимов течения жидкости было высказано русским учёным

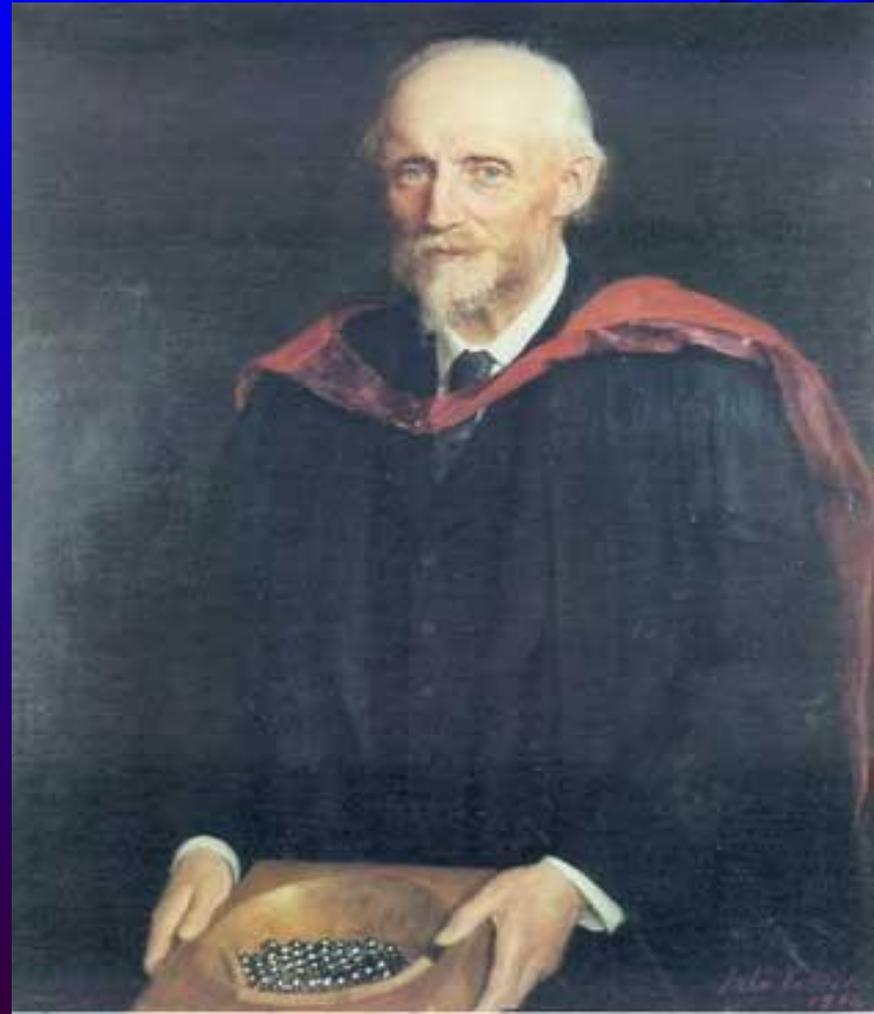
Д.М. Менделеевым в 1880 г.

В 1883 г. это было экспериментально подтверждено английским учёным гидромехаником Осборном Рейнольдсом. Его исследования показали, что режим течения жидкости зависит от скорости движения жидкости, вязкости и размеров потока жидкости.



# РЕЙНОЛЬДС, ОСБОРН (Reynolds, Osborne) (1842–1912)

- Английский инженер и физик. Родился в Белфасте 23 августа 1842 в семье священнослужителя.
- С 18 лет работал в механической мастерской, поступил в Кембриджский университет, где изучал математику и механику

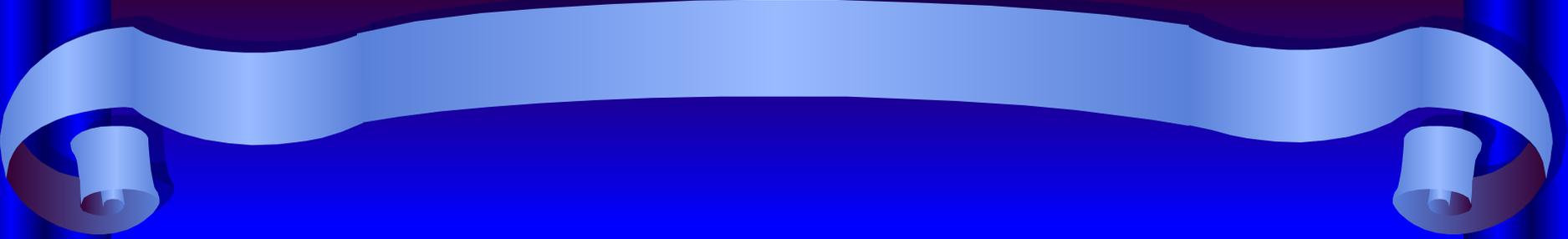




Окончил университет в 1867.  
С 1868 по 1905 – профессор  
кафедры строительной механики  
Манчестерского университета.  
Работы Рейнольдса посвящены  
механике, гидродинамике, теплоте,  
электричеству, магнетизму.

В 1883 Рейнольдс установил, что ламинарное течение переходит в турбулентное, когда введенная им безразмерная величина (число Рейнольдса) превышает критическое значение.

Число Рейнольдса широко используется при решении задач гидро- и аэродинамики в случае малых и средних дозвуковых скоростей.

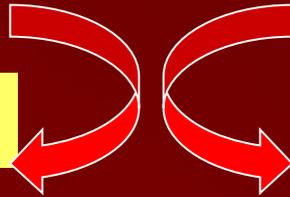


Сконструировал ряд турбин и  
центробежных насосов.

Умер Рейнольдс в Уотчете (графство  
Сомерсет) 21 февраля 1912 года.

# Режимы течения жидкости:

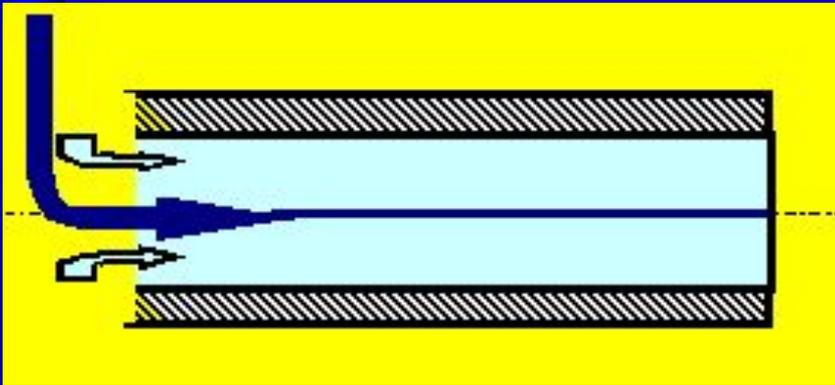
Ламинарное



Турбулентное



Ламинарный режим – это режим, при котором слои жидкости движутся параллельно не перемешиваясь друг с другом.



Струйка краски параллельна оси трубы. Слои жидкости не перемешиваются.

**Ламинарное движение** (от латинского lamina – слой)

Турбулентный режим – частицы жидкости

движутся беспорядочно по не определённым траекториям, а само движение сопровождается как продольным, так и поперечным перемещением слоёв жидкости.



Струйка краски распалась на отдельные вихри. Слои жидкости перемешиваются в поперечном направлении.  
**Турбулентное движение** (от латинского *turbulentus* – хаотический, беспорядочный)

# Число Рейнольдса Re

Число Рейнольдса Re – безразмерное соотношение, которое определяет ламинарный или турбулентный режим течения жидкости или газа.

$$Re = \frac{v \cdot d \cdot \rho}{\eta} = \frac{v \cdot d}{\nu}$$

Число (критерий) Рейнольдса.

$\eta$  - динамический коэффициент вязкости

$\nu = \frac{\eta}{\rho}$  - кинематический коэффициент вязкости

**Резюме. Режим течения жидкости зависит от скорости движения, вязкости и размера потока жидкости.**

# Критическое число Рейнольдса

$Re_{кр}$

Число Рейнольдса, при котором ламинарный режим сменяется турбулентным

$Re_{кр} = 2300$

Если число  $Re > Re_{кр}$

Режим  
турбулентный

Если число  $Re < Re_{кр}$

Режим  
ламинарный

# Тема. Гидравлический удар в трубопроводе

Явление гидравлического удара открыл в  
1898г. Н.Е. Жуковский.

На основании  
экспериментальных и  
теоретических исследований Н.  
Е. Жуковский вывел формулу  
для расчета увеличения  
давления при гидравлическом  
ударе.

# Николай Егорович Жуковский

5 [17] января 1847, с. Орехово (ныне Владимирской области) — 17 марта 1921, с. Орехово (ныне Владимирской области) — 17 марта 1921 1847, с. Орехово (ныне Владимирской области) — 17 марта 1921, Москва 1847, с. Орехово (ныне Владимирской области) — 17 марта 1921, Москва) — русский учёный, создатель аэродинамики как науки.

Заслуженный



**Гидравлический удар** - скачок  
давления в гидросистеме ,  
вызванный мгновенным  
изменением скорости потока  
жидкости за очень малый  
промежуток времени.

# Вредное влияние гидроудара

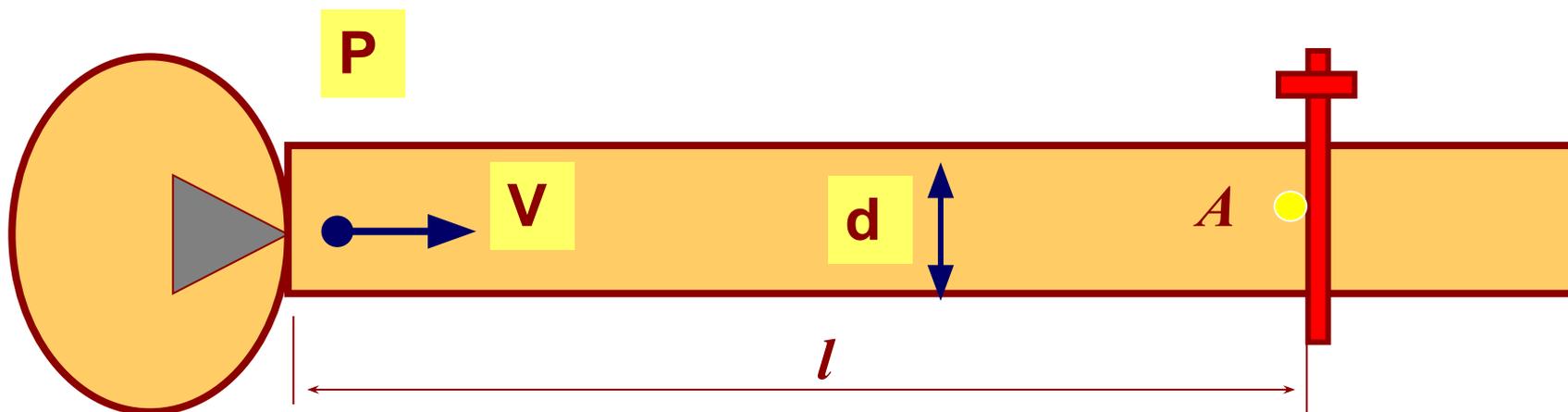
**Гидравлический удар способен:**

- **вызывать образование продольных трещин в трубах, что может привести к их расколу;**
- **приводить к повреждению мест соединений отдельных труб (стыки, фланцы, раструбы);**

# продолжение

- **разрыву стенок трубопровода;**
- **повреждению насосов или других элементов трубопровода.**
- **особенно опасен для длинных трубопроводов;**

# Сущность гидроудара



**Гидравлический удар – резкое увеличение давления в трубопроводе при внезапной остановке движущейся в нем жидкости.**

При этом сначала остановится слой жидкости непосредственно у крана. Вследствие перехода кинетической энергии в потенциальную давление в этом слое увеличится. Так как жидкость сжимаема, то остановки всей её массы в трубопроводе не происходит мгновенно.

Гидроудар представляет собой затухающий колебательный процесс чередования резкого повышения и понижения давления.

# Стадии гидроудара

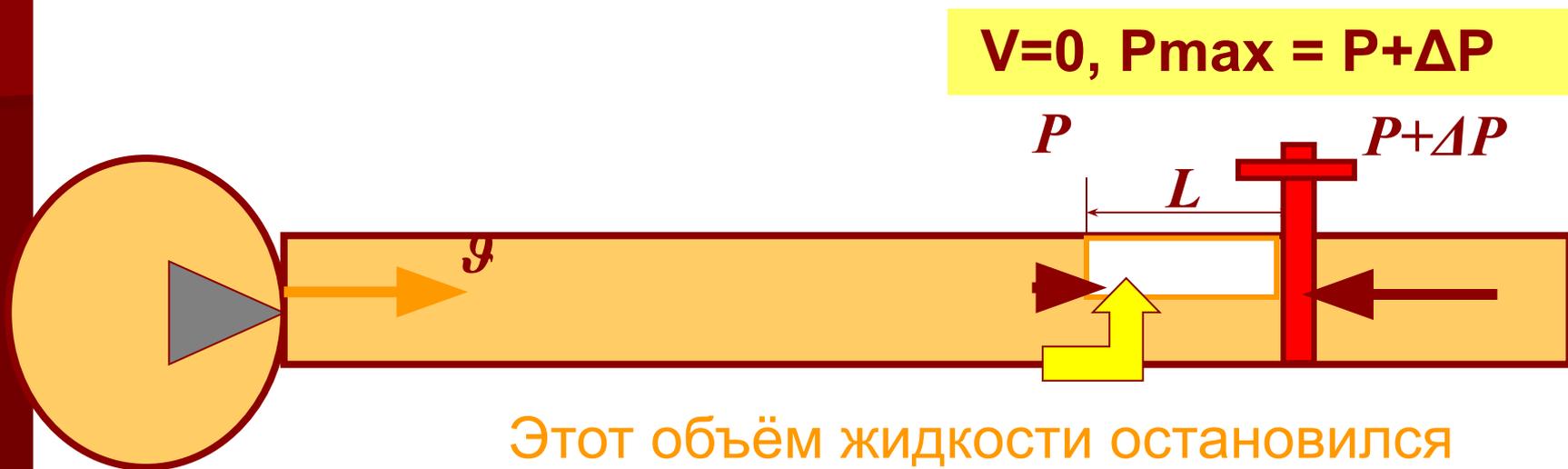
Полный гидроудар

Прямой гидроудар

Обратный гидроудар

Отраженная волна пониженного давления

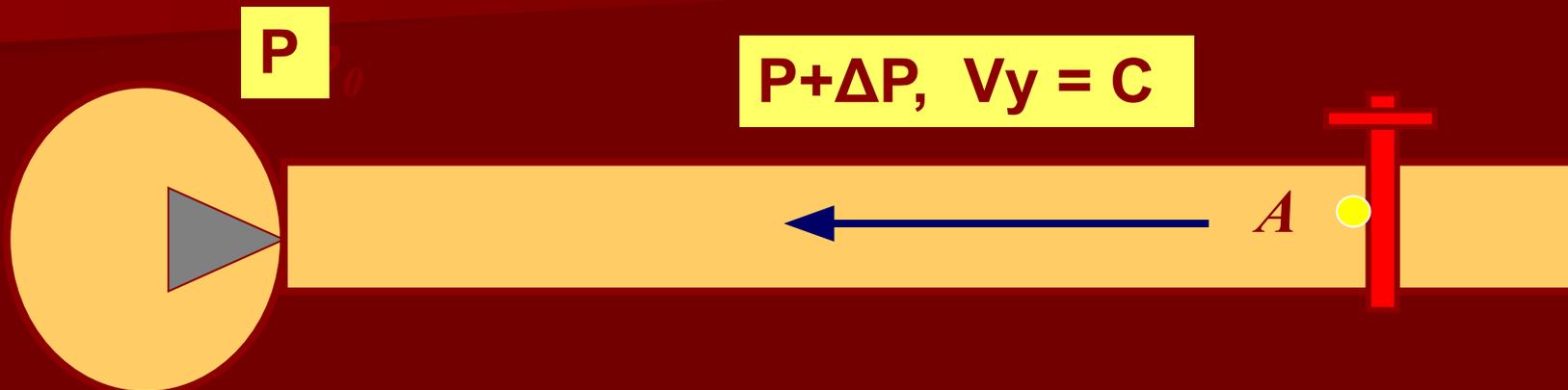
# Полный гидравлический удар



Этот объём жидкости остановился за время  $t$

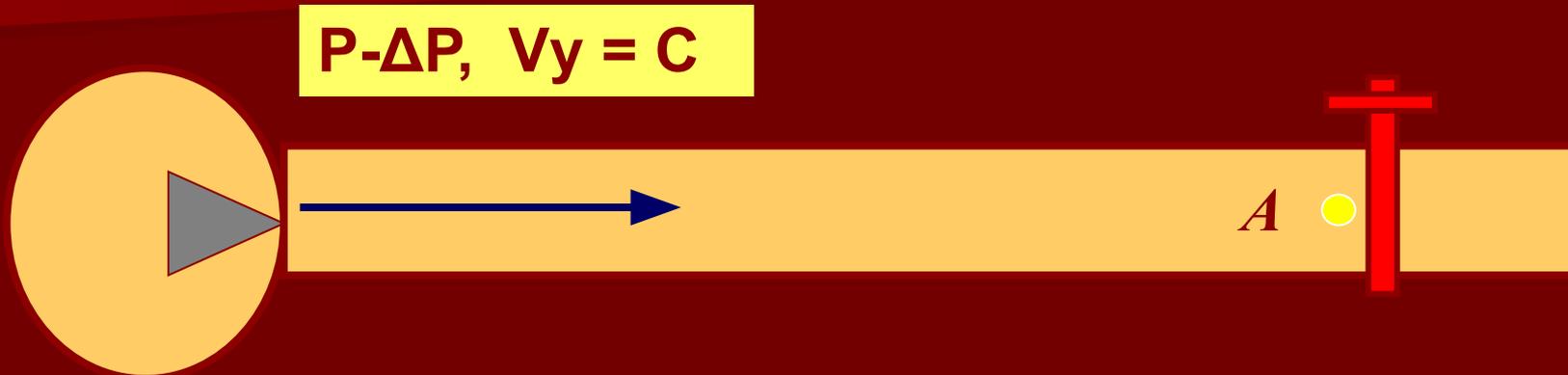
Максимальное увеличение давления при внезапной остановке жидкости у задвижки,  $V=0, P_{\max} = P+\Delta P$ . Кинетическая энергия движения жидкости преобразуется в потенциальную энергию давления.

# Прямой гидравлический удар



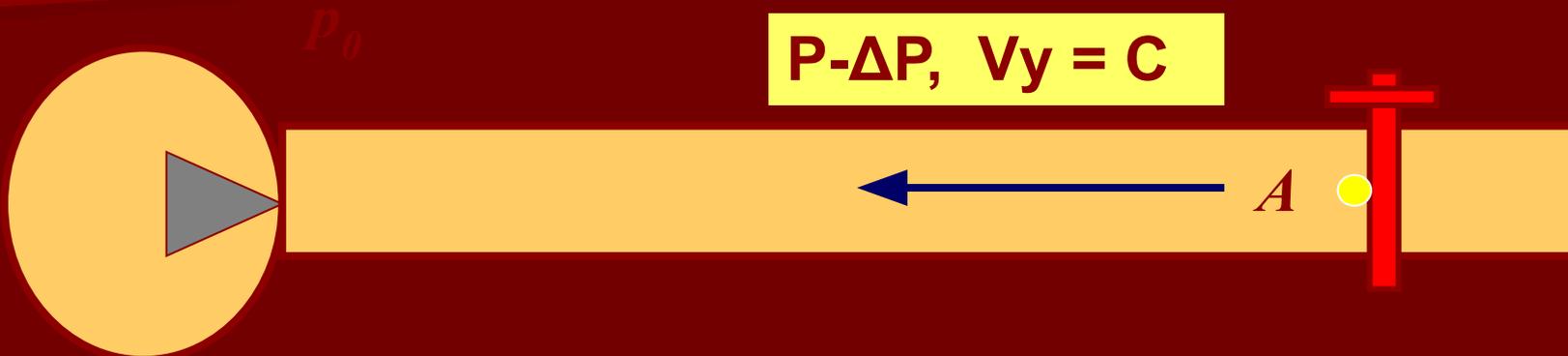
Распространение ударной волны  
повышенного давления от задвижки  
к началу трубопровода со скоростью  
распространения ударной волны

# Обратный гидравлический удар



Распространение ударной волны пониженного давления от насоса к задвижке со скоростью распространения ударной волны.

# Отраженная волна пониженного давления



Распространение ударной волны пониженного давления от задвижки к насосу со скоростью распространения ударной волны.

# Резюме

1. Гидроудар сопровождается резким скачком давления у крана при быстром его закрытии.
2. Гидроудар – затухающий колебательный процесс чередования резкого повышения и понижения давления, который благодаря вязкости жидкости и местного сопротивления трубопроводов быстро затухает.

# Скорость распространения ударной волны

$$\tilde{N} = \frac{l}{t_0}$$

$$c_{\text{зв.}} = 10^3 \text{ м/с}$$

Скорость ударной волны равна  $\approx$  скорости распространения звука в жидкости (для воды 1200 м/с)

$$t_0 = \frac{l}{c}$$

Скорость распространения ударной волны

Скорость звука

Время, за которое волна повышенного давления достигнет начала трубопровода от задвижки

# Фаза гидравлического удара

Фаза гидроудара – время, за которое ударная волна дойдет до насоса (емкости) и вернется обратно.

$$T = 2t_0 = \frac{2l}{c}$$

Фаза гидроудара

# Повышение давления при гидроударе

$$\Delta p = \rho \cdot c \cdot v$$

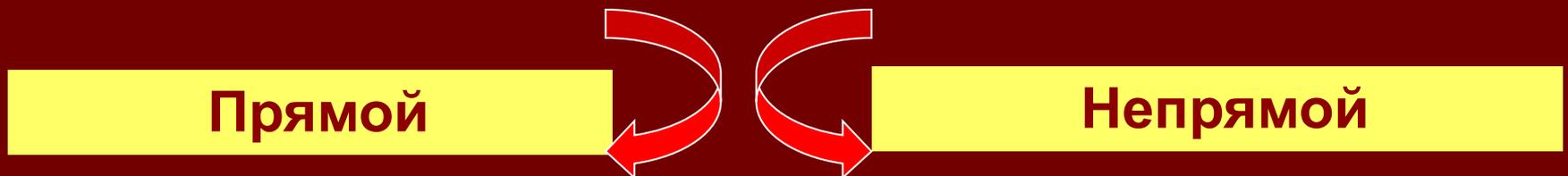
Формула Н.Е. Жуковского

Пример. Если скорость движения жидкости (воды) равна  $V=5$  м/с

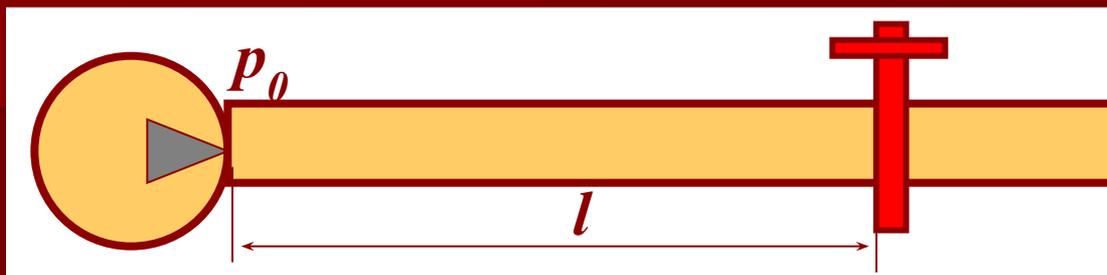
$$\Delta p = 1000 \cdot 1200 \cdot 5 = 6 \cdot 10^6 \text{ Па} = 6 \text{ МПа}$$

# Виды гидравлических ударов

В зависимости от времени распространения ударной волны т.е. времени перекрытия задвижки (заслонки, клапана, иного местного сопротивления)  $t$ , в результате которого возник гидроудар, можно выделить 2 вида ударов:



# Прямой гидроудар



$$t_{\text{з}} < T$$

$$t_{\text{кр}} < T$$

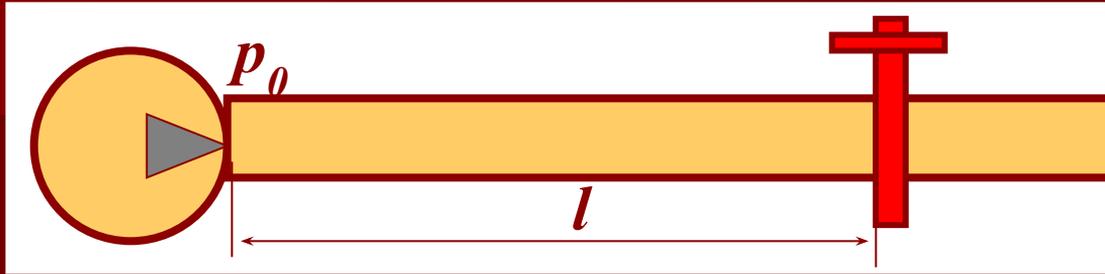
Время закрытия крана

Прямой гидроудар (волна дошла до насоса, вернулась, а кран уже закрыт)

$$\Delta p = \rho \cdot \tilde{v} \cdot \vartheta$$

Максимальное повышение давления

# Непрямой гидроудар



Время закрытия крана

$t_{\text{эд}}$

$t_{\text{кр}} > T$

Непрямой гидроудар (волна дошла до насоса, вернулась, а кран еще не закрыт)

$$\Delta p = \rho \cdot c \cdot g \frac{T}{t_{\text{кр}}} = \frac{2l \cdot \rho \cdot g}{t_{\text{кр}}}$$

Повышение давления меньше, чем при полностью закрытом кране

# Резюме

Формула Н.Е. Жуковского показывает, что гидравлический удар зависит:

- от скорости закрытия вентиля;
- плотности жидкости;
- скорости потока жидкости;
- длины трубопровода;

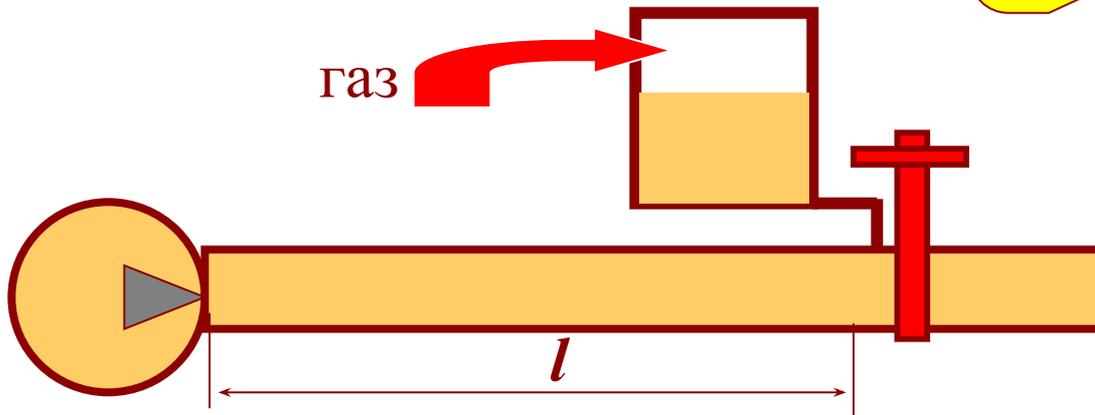
# Причины возникновения гидроудара

- Резкое закрытие крана
- Внезапная остановка насоса
- Пуск насоса при открытом кране на насосной линии

# Меры борьбы с гидроударом

Применение воздушно-гидравлических колпаков – гасителей ударов

Воздушно-гидравлический колпак



При закрытии крана повышение давления одинаково распространяется на жидкость в трубе и в гидравлический колпак. Так как газ легко сжимается, он и воспринимает это увеличение давления, а повышение давления в жидкости оказывается незначительным. Когда по трубе идет волна пониженного давления, газ отдает накопленную энергию.

Превращение прямого удара в непрямой – медленное закрытие крана

Кран устанавливать в начале трубы

Уменьшать скорость движения жидкости за счет увеличения внутреннего диаметра трубы при заданном расходе

# Контрольные вопросы

- Определение гидравлического удара
- Сущность гидроудара
- Вредное влияние гидроудара
- Стадии гидравлического удара
- Полный гидроудар
- Прямой гидроудар
- Обратный гидроудар
- Отраженная волна гидроудара

# Продолжение

- Фаза гидроудара
- Формула Н.Е. Жуковского
- Виды гидроударов
- Прямой гидроудар
- Непрямой гидроудар
- Зависимость между временем закрытия вентиля и фазой гидроудара

# Продолжение

- От чего зависит гидроудар ?
- Причины возникновения гидроудара
- Меры борьбы с гидроударом

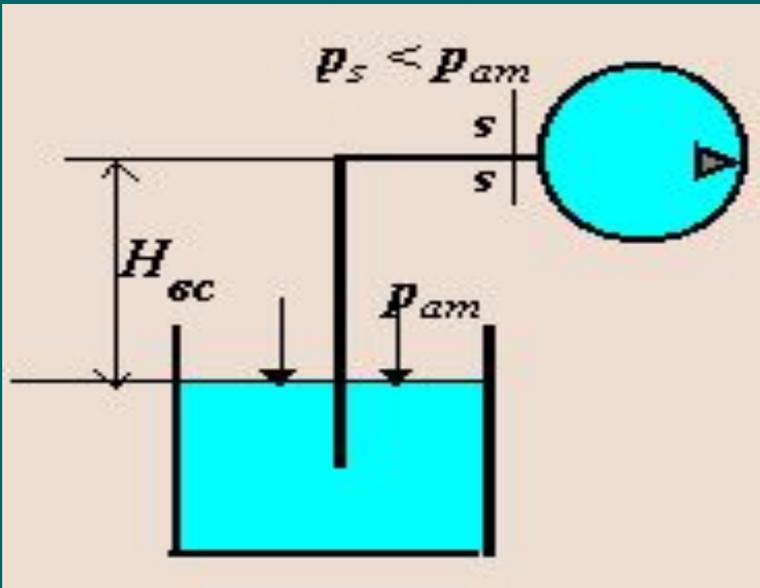
# Использованная литература

- А.В. Лепешкин, А.А. Михайлин «Гидравлические и пневматические системы», М. 2007г., стр. 81.
- Е.З. Рабинович «Гидравлика», М. 1977г., стр.243.
- О.В. Черняк, Г.Б. Рыбчинская «Основы теплотехники и гидравлики», М. 1979г., стр. 51.

# Кавитация

**Кавитация** — образование в жидкости полостей (кавитационных пузырьков, или каверн), заполненных газом, паром или их смесью. Кавитация возникает в результате местного понижения давления в жидкости, которое может происходить при увеличении её скорости (гидродинамическая кавитация), существуют и другие причины возникновения эффекта. Перемещаясь с потоком в область с более высоким давлением, кавитационный пузырек схлопывается, излучая при этом ударную волну.

# Кавитация



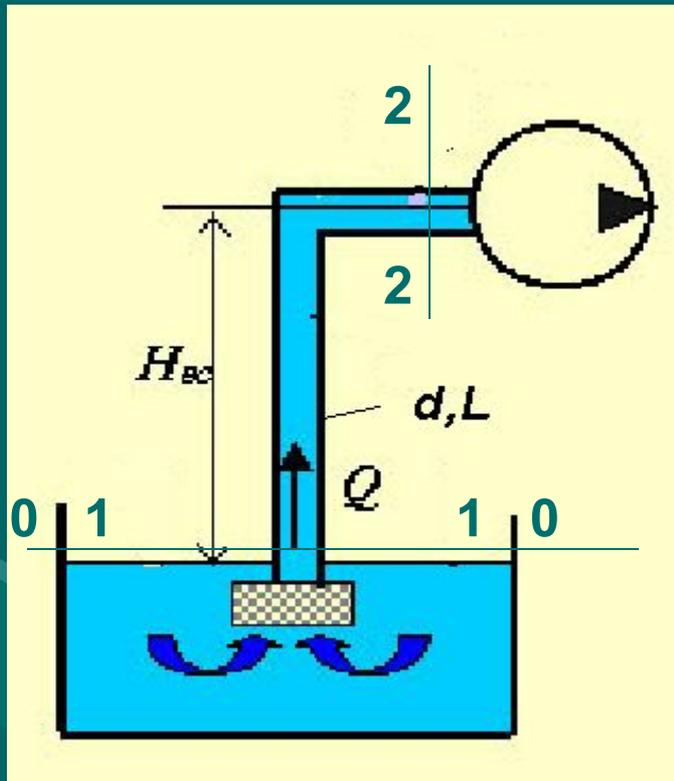
$$p_s < p_{ат}$$

Условие появления  
кавитации

**Кавитация** – явление кипения жидкости при нормальных температурах ( $10^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $30^\circ$ , ...), при давлениях меньших атмосферного и равных давлению насыщенного пара.

**В закрытых объёмах** кавитация сопровождается схлопыванием пузырьков в областях повышенного давления

# Кавитация

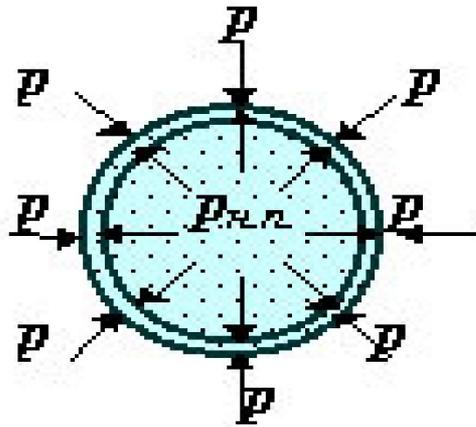


$p_2 \geq p_{н.п.} \Rightarrow$  условие  
отсутствия кавитации

# Сущность кавитации

Образование пузырька

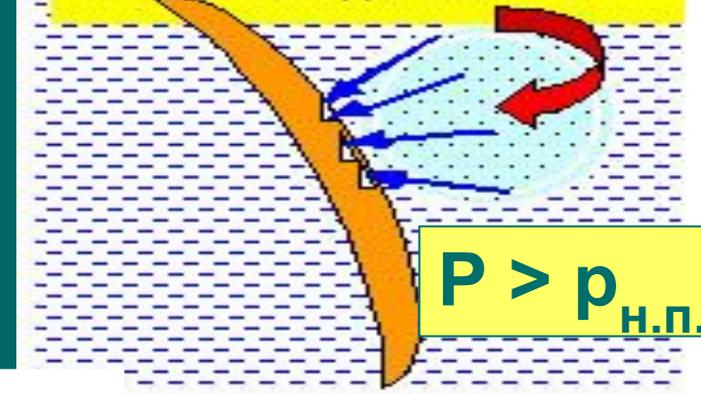
$$- p = p_{\text{н.п.}}$$



Есть связи между молекулами

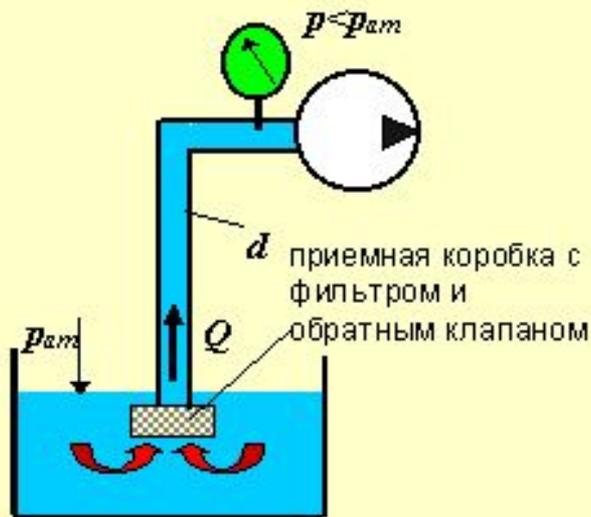
Схлопывание пузырька на лопатке насоса

гидроудары - давление возрастает до 100 МПа

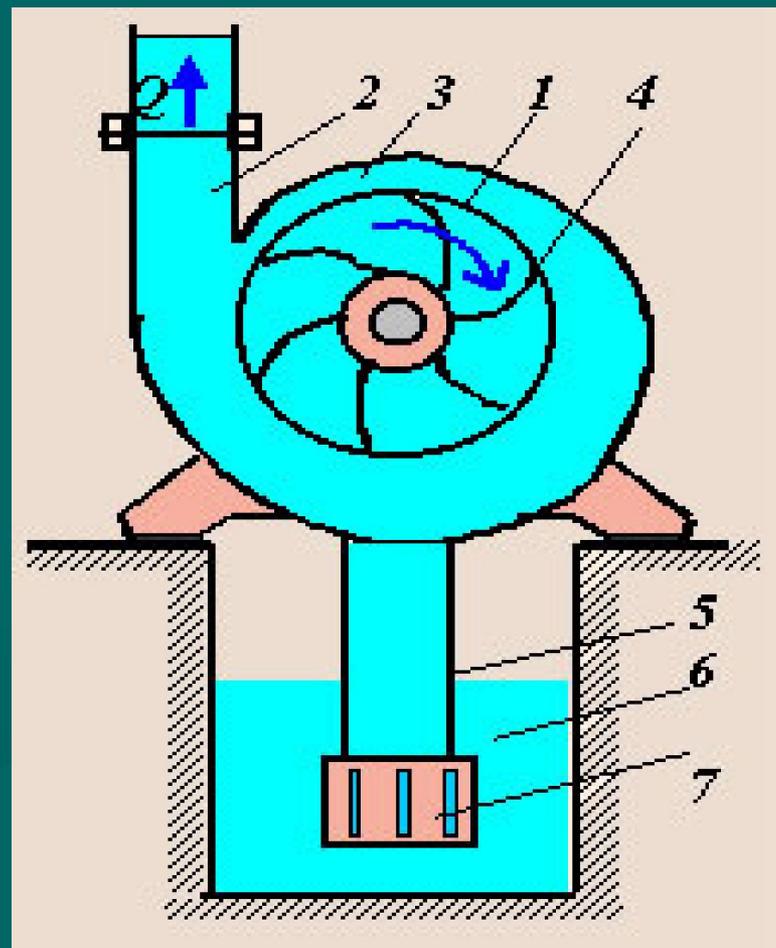


Пузырек разрывает межмолекулярные связи и процесс всасывания в насос прекращается

# Кавитация и центробежный насос



- 1-рабочее колесо;
- 2-нагнетательная линия;
- 3- спиральная камера;
- 4- криволинейные лопатки;
- 5- всасывающий трубопровод;
- 6- резервуар; 7-приёмная коробка



# Вредные последствия

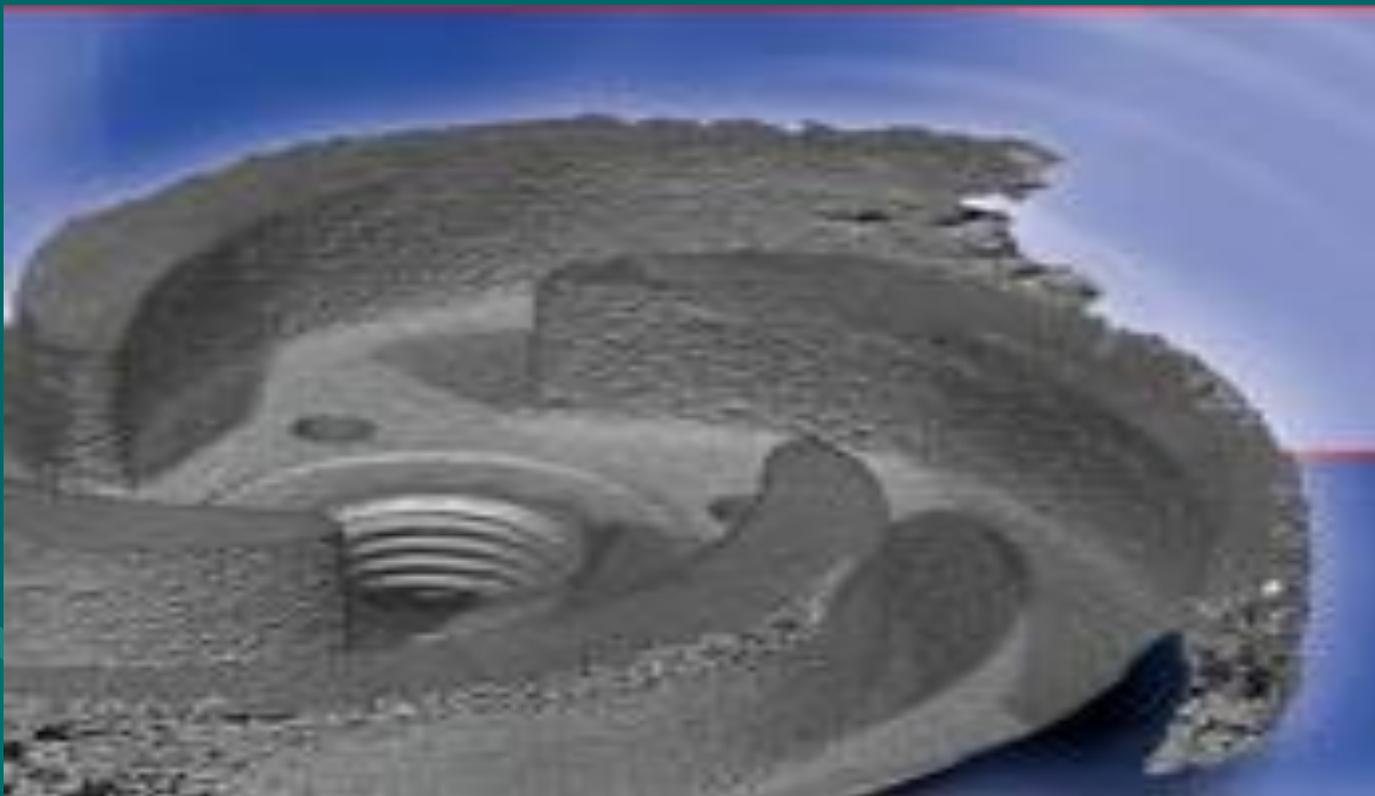
- Кавитация во многих случаях нежелательна. Например, она вызывает разрушение гребных винтов судов, рабочих органов насосов, гидротурбин и т.п.
- Кавитация вызывает шум, вибрации и снижение эффективности работы гидросистем.
- Когда разрушаются кавитационные пузыри, энергия жидкости сосредотачивается в очень небольших объемах. Тем самым, образуются места повышенной температуры и возникают ударные волны, которые являются источниками шума. Шум, создаваемый кавитацией, является особой проблемой на подводных лодках (субмаринах), так как из-за шума их могут обнаружить.

# Вредные последствия



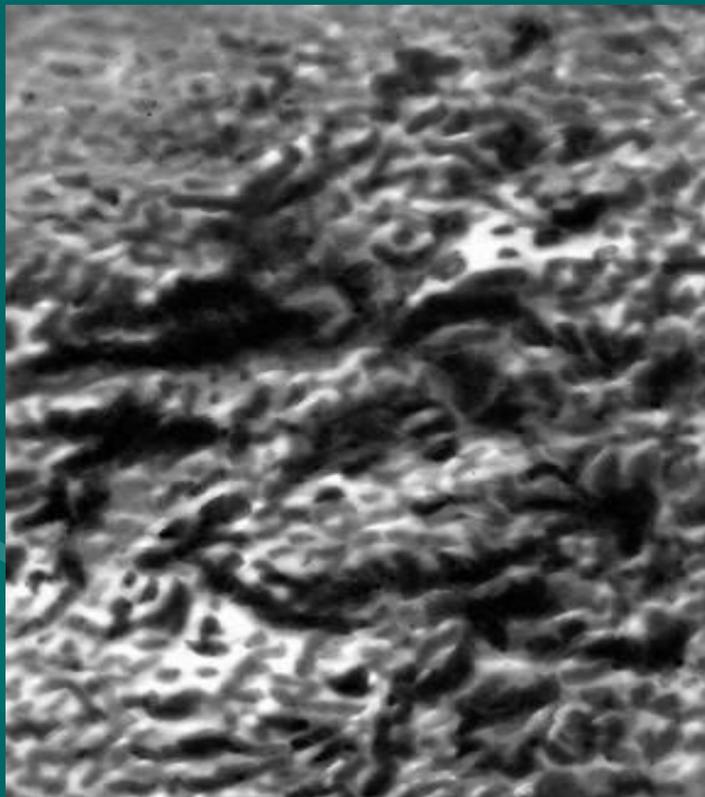
**повреждения наносимые эффектом  
кавитации (часть насоса)**

# Вредные последствия

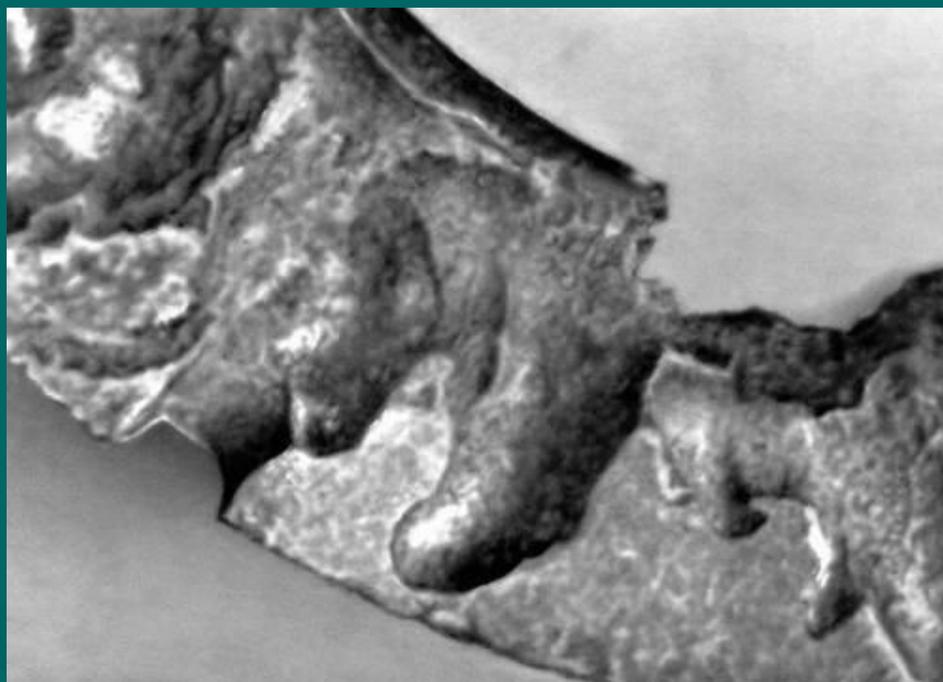


**повреждения наносимые эффектом  
кавитации (часть насоса)**

# Вредные последствия



**Участок разрушенной поверхности гребного винта.**



**Всасывающий патрубок насоса, выполненный из чугуна, со следами кавитационной эрозии.**

# КАК ИСПРАВЛЯТЬ КАВИТАЦИЮ

- Чтобы избежать кавитации при всасывании, надо подсчитать общий динамический напор.
- Для коррекции кавитации на напорной линии может потребоваться уменьшение напора или увеличение подачи жидкости.
- В некоторых случаях может помочь уменьшение или увеличение скорости движения жидкости.

**Даниил БЕРНУЛЛИ**

**Daniel Bernoulli, 1700–1782**

Швейцарский математик, физик и физиолог. Родился в Гронингене (Нидерланды) в семье потомственных математиков и интеллектуалов.

Первоначально получил медицинское образование, и в 1725 году принял приглашение Петербургской академии наук и занял пост профессора кафедры физиологии.



# Продолжение биографии

- Обнаружив в этой области множество нерешенных задач из области теоретической физики и, в частности, динамики движения жидкости (крови) в сосудах, вернулся к математическому описанию физических процессов и в 1730 году возглавил кафедру чистой математики Петербургской академии.

# Продолжение биографии

- В 1733 году вернулся на родину в Базель, где возглавил кафедру анатомии и ботаники местного университета, а с 1750 года — кафедру экспериментальной физики, которой и руководил до своей смерти.
- В результате изучения гидродинамических зависимостей сформулировал так называемый принцип Бернулли и на столетие предвосхитил зарождение молекулярно-кинетической теории газов.

# Виды энергии

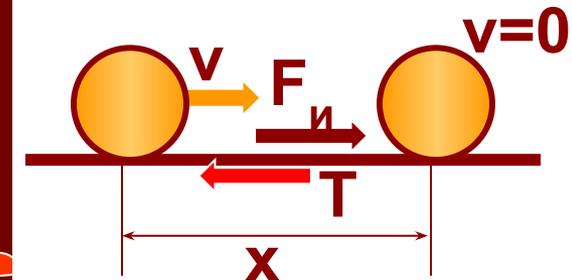
## Энергия жидкости

потенциальная

кинетическая

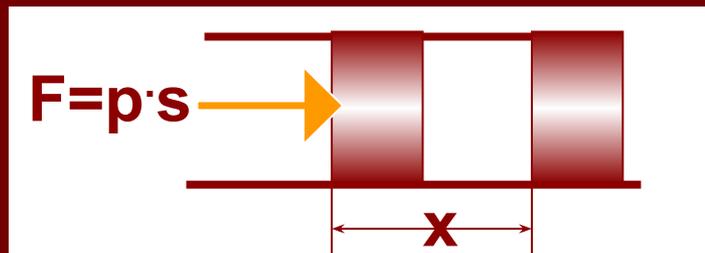
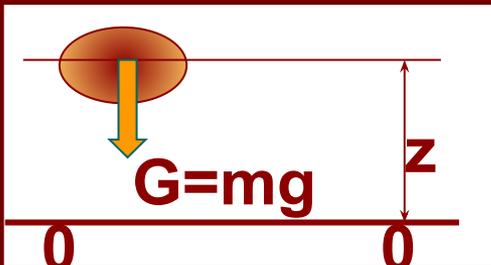
положения  $E_z$

давления  $E_p$



$$E_z = mgz$$

$$E_p = Fx = p \cdot s \cdot x = pW = mp/\rho$$



$$E_k = T \cdot x = F_{и} \cdot x \\ = m a \cdot x = m \cdot v/t \cdot \\ v/2 \cdot t = mv^2/2$$

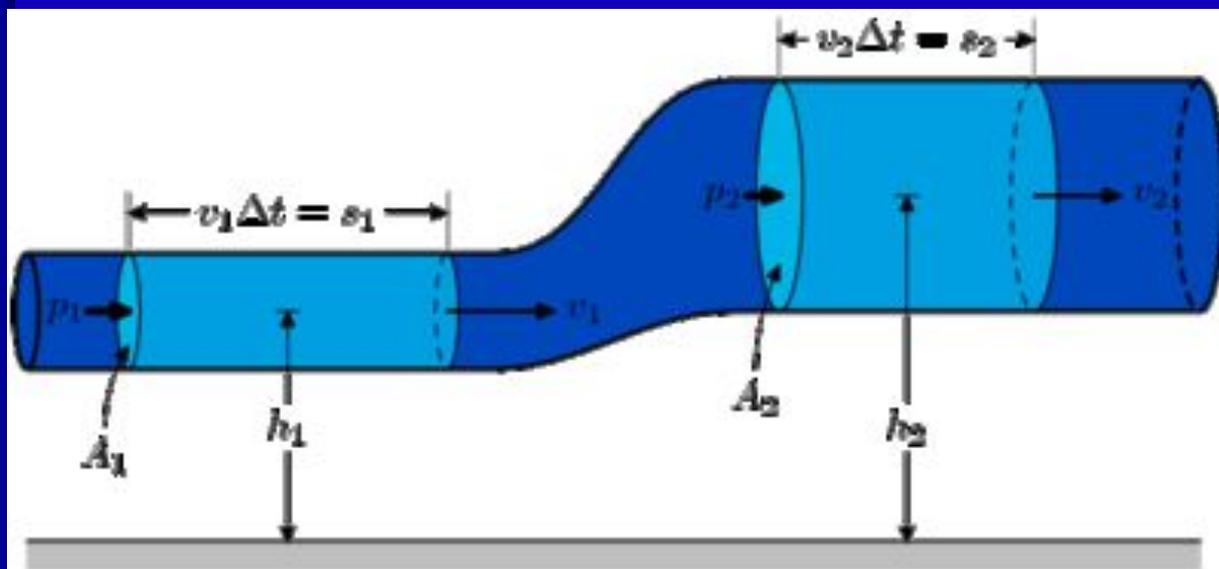
# Закон сохранения энергии

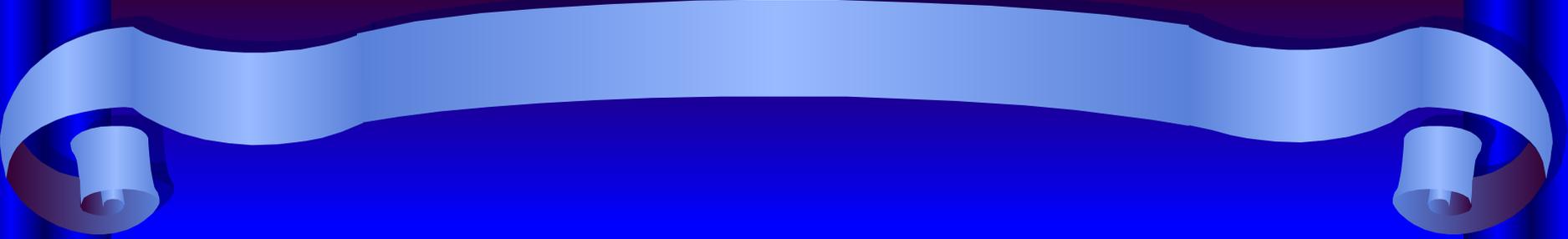
- **Механическая энергия движущегося потока жидкости при установившемся движении, представляет собой сумму потенциальной энергии положения, давления и кинетической энергии и является величиной постоянной.**

$$Z + \frac{P}{\rho \cdot g} + \frac{v^2}{2g} = \text{const}$$

# Уравнение Бернулли

$$Z + \frac{P}{\rho \cdot g} + \frac{v^2}{2g} = \text{const}$$





**Уравнение Бернулли  
представляет собой запись  
закона сохранения  
механической энергии  
движущегося потока  
жидкости при  
установившемся движении.**