

# ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И АППАРАТЫ

## Общие положения

- Гидромеханика — это наука о движении жидкостей и газов. Законы гидромеханики и их практические приложения изучаются в гидравлике, состоящей из двух разделов — гидростатики, рассматривающей законы равновесия и состояние покоя, и гидродинамики, рассматривающей законы движения жидкостей и газов.

- При выводе основных закономерностей в гидравлике вводят понятие об **идеальной жидкости**, которая в отличие от **реальной (вязкой) жидкости** абсолютно несжимаема под действием нагрузки, не изменяет плотности при изменении температуры и не обладает вязкостью. Реальные жидкости подразделяются на капельные и упругие. **Капельные жидкости** практически несжимаемы и незначительно изменяются в объеме при изменении температуры. Плотность их  $\rho = m/V$ .

# Среднее гидростатическое давление

- Рассмотрим площадку  $\Delta A$ , на которую действует сила  $\Delta P$ . Отношение  $\Delta P/\Delta A$  представляет собой «напряжение», т. е. силу, приходящуюся на единицу площади. Предел этого отношения при  $\Delta A \rightarrow 0$  называют **давлением в данной точке**.
- *Давление в любой точке жидкости одинаково по всем направлениям, иначе бы также происходило перемещение жидкости внутри занимаемого ею объема.*

# Вязкость и закон внутреннего трения Ньютона

- При движении реальной жидкости в ней возникают силы внутреннего трения, препятствующие этому движению. Свойство жидкости оказывать сопротивление сдвигу называется **вязкостью**.
- Отношение  $\Delta v/\Delta y$ , характеризующее относительный сдвиг, называется **градиентом скорости**.

$$\tau = -\eta(dv/dy)$$

- Это уравнение называют **законом внутреннего трения Ньютона** или просто **вязкостью**, а коэффициент пропорциональности  $\eta$  — **динамическим коэффициентом вязкости** [Па\*с]
- Иногда вязкость жидкостей характеризуют **кинематическим коэффициентом вязкости** [м<sup>2</sup>/с], или **кинематической вязкостью**

$$\nu = \eta/\rho$$

# Гидростатика и вывод дифференциальных уравнений равновесия Эйлера

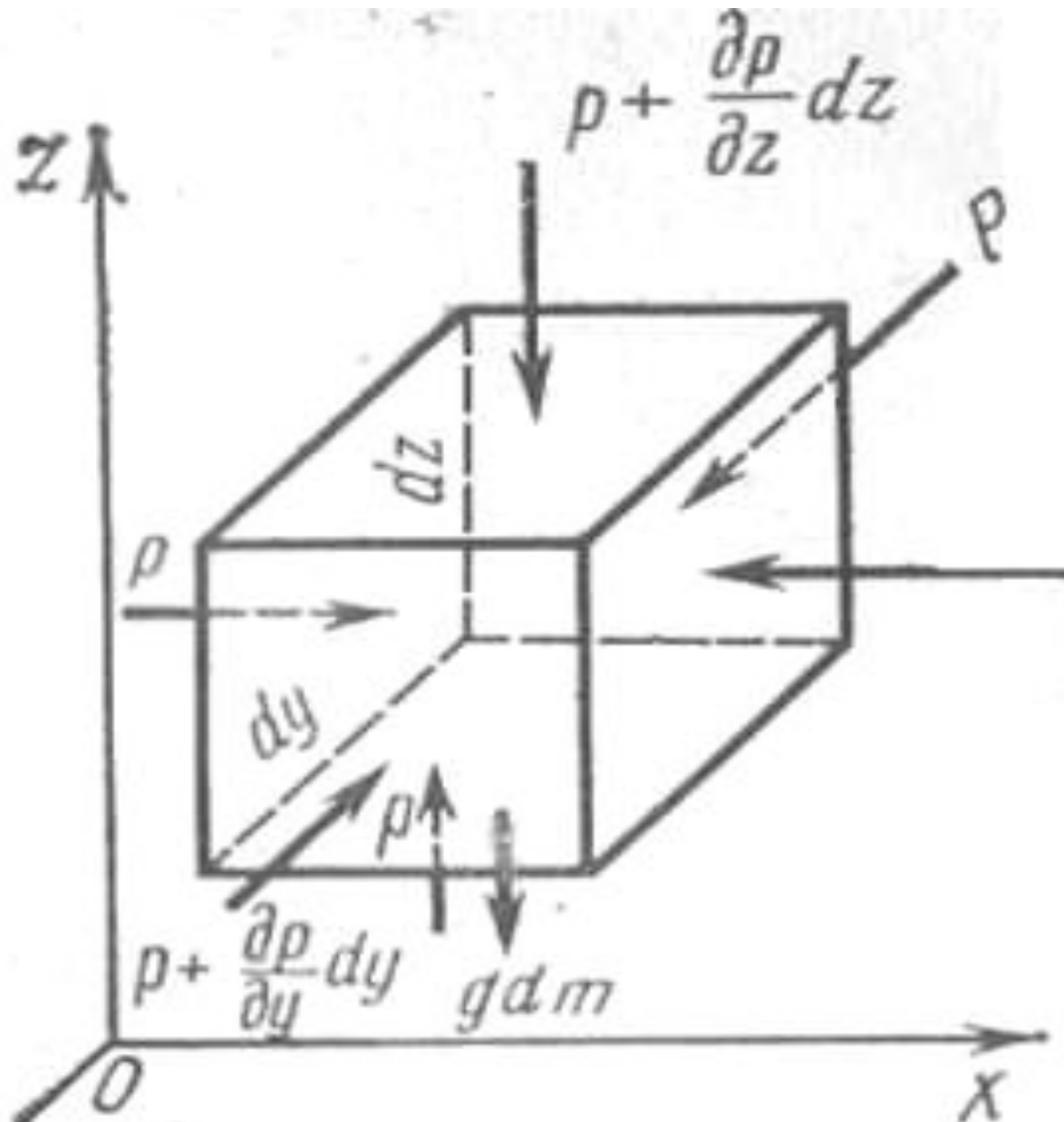
Условия равновесия элементарного параллелепипеда выражаются системой уравнений (**Уравнения Эйлера**):

$$-\frac{\partial p}{\partial x}=0;$$

$$\frac{\partial p}{\partial y}=0;$$

$$-\rho g - \frac{\partial p}{\partial z}=0$$

Из дифференциальных уравнений равновесия следует, что давление в жидкости, находящейся в состоянии покоя, изменяется **только по вертикали**.



$$\begin{aligned} -\partial p / \partial x &= 0; \\ \partial p / \partial y &= 0; \\ -\rho g - \partial p / \partial z &= 0. \end{aligned}$$

После интегрирования уравнений получим  $z + p / (\rho g) = \text{const} \equiv z_1 + p_1 / (\rho g) = z_2 + p_2 / (\rho g)$ .

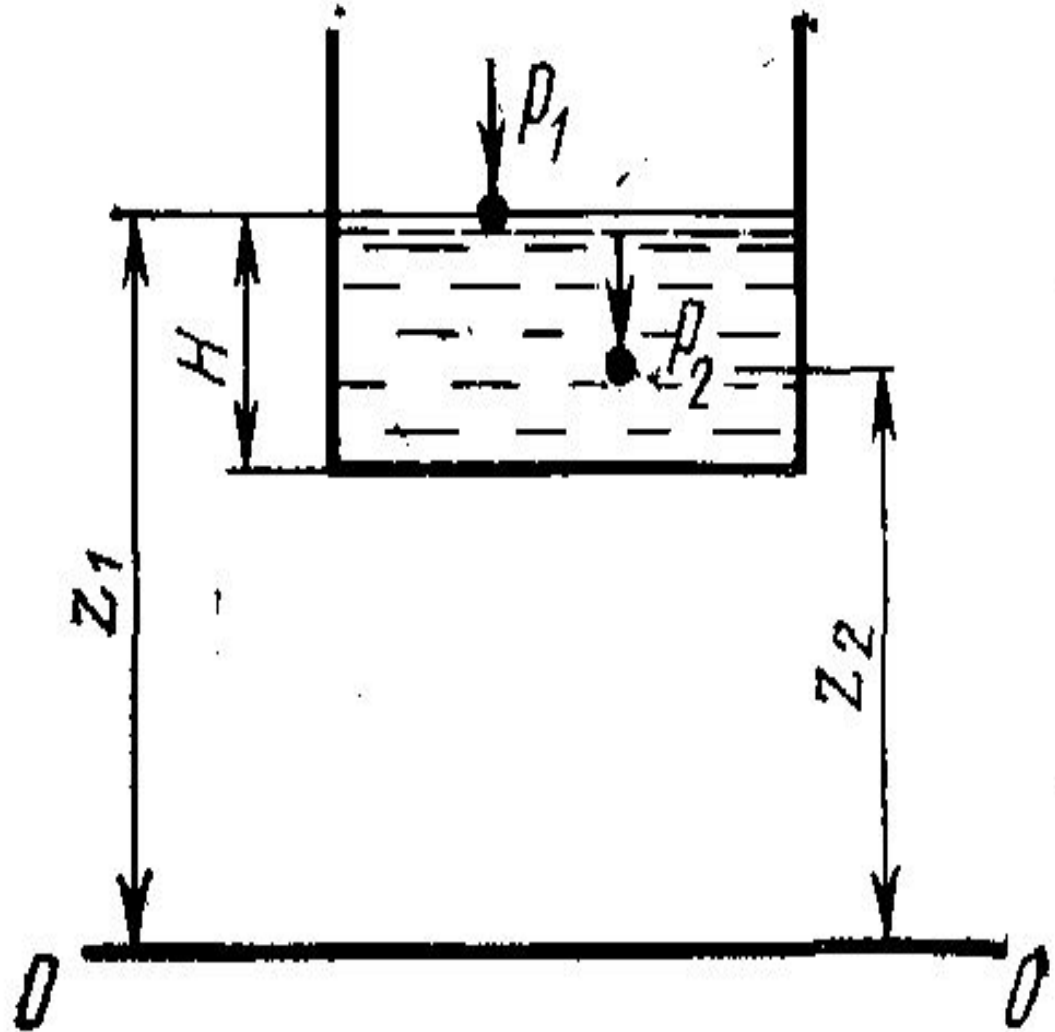
Это уравнение называют *основным уравнением гидростатики*. Величину  $z$  называют *нивелирной высотой*, а  $p / (\rho g)$  — *статическим*, или *пьезометрическим напором*. Следовательно, основное уравнение гидростатики можно сформулировать следующим образом: для каждой точки покоящейся жидкости сумма нивелирной высоты и статического напора постоянна.

$$z_1 + p_1 / (\rho g) = z_2 + p_2 / (\rho g)$$

$Z$  характеризует **удельную потенциальную энергию положения** данной точки над плоскостью сравнения 0-0 и поэтому называется **геометрическим напором**, а  $p / (\rho g)$  — **удельную потенциальную энергию давления** в этой точке и называется **статическим напором**.

Сумма указанных энергий представляет общую потенциальную энергию, приходящуюся на единицу массы жидкости.

Следовательно, основное уравнение гидростатики является частным случаем закона сохранения энергии.

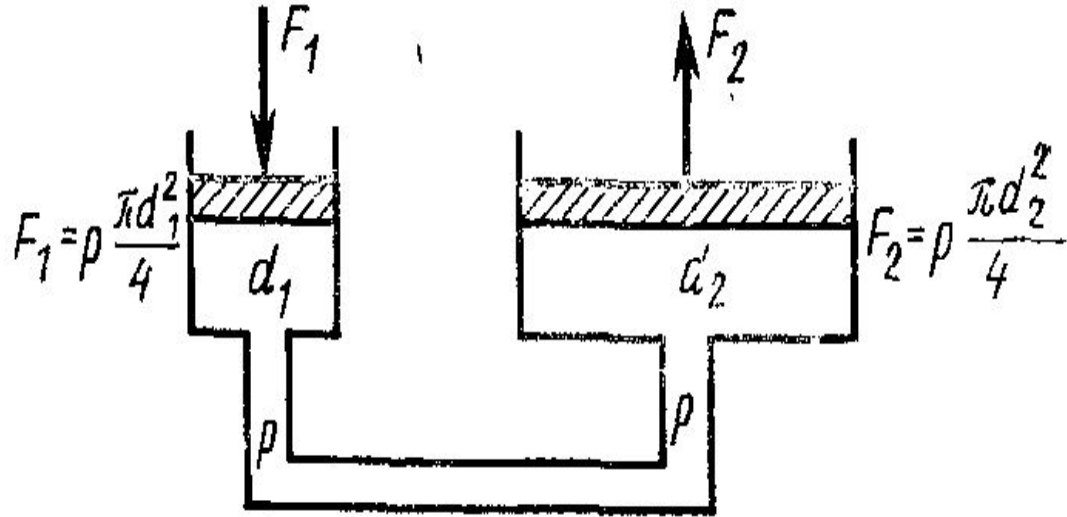


# схема гидравлического пресса

Предыдущее  
уравнение можно  
записать в виде:

$$p_1 + \rho g z_1 = p_2 + \rho g z_2$$

Полученное  
уравнение  
представляет собой  
закон Паскаля,  
согласно которому  
давление,  
создаваемое в любой  
точке несжимаемой  
жидкости, передается  
одинаково всем  
точкам ее объема.





# Гидродинамика. Определения.

- Основным объектом изучения в гидродинамике является поток жидкости, т. е. движение массы жидкости между ограничивающими поверхностями.
- **Движущей силой потока** является разность давлений.
- Различают два вида движения жидкости: **установившееся** (при котором скорость жидкости в любой точке занятого ею пространства не изменяется с течением времени) и **неустановившееся** (скорость жидкости изменяется по величине или направлению с течением времени).
- **Живым сечением потока** называется сечение в пределах потока, нормальное к направлению движения жидкости.
- **Средняя скорость  $v$**  представляет собой отношение объемного расхода жидкости ( $V$ ) к площади живого сечения потока ( $S$ ):

$$v=V/S$$

- Массовая скорость жидкости

$$W = \rho v;$$

- Массовый расход жидкости

$$M = \rho v S, \text{ где } \rho - \text{плотность жидкости.}$$

- Различают безнапорные (свободные) и напорные потоки. **Безнапорным** называют поток, имеющий свободную поверхность, например поток воды в канале, реке. **Напорный поток**, например поток воды в водопроводной трубе, не имеет свободной поверхности и занимает все живое сечение канала.

- Под **гидравлическим радиусом**  $R_r$  [м] понимают отношение площади живого сечения потока к смоченному периметру проводного канала

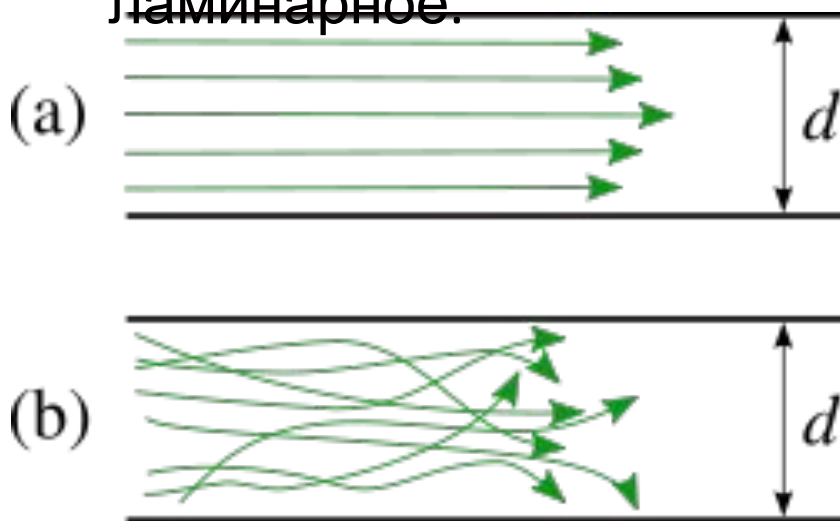
$$R_r = S/P, \text{ где}$$

$S$  — площадь живого сечения жидкости, [м<sup>2</sup>];

$P$  — смоченный периметр канала, [м].

# Ламинарный и турбулентный режимы движения жидкостей

- Экспериментально установлено, что в природе существуют два различных вида движения потока — **ламинарное** (a), при котором отдельные слои жидкости скользят друг относительно друга, и **турбулентное** (b), когда частицы жидкости движутся по сложным, все время изменяющимся траекториям. Вследствие этого затрата энергии на турбулентное движение потока больше, чем на ламинарное.

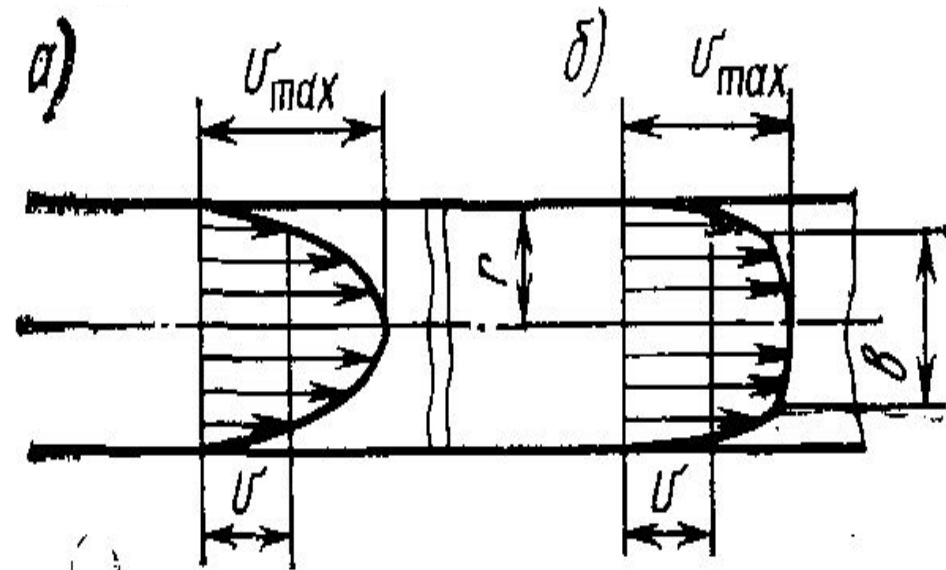


Основываясь на результатах опытов, Рейнольдс установил, что режим движения жидкости зависит от скорости потока, плотности и вязкости жидкости, диаметра трубы. Эти величины входят в безразмерный комплекс — критерий Рейнольдса

## Распределение скоростей и расход жидкости в потоке.

В турбулентном потоке условно различают центральную зону с развитым турбулентным движением, называемую **ядром потока**, и пограничный слой, где происходит переход от турбулентного движения к ламинарному.

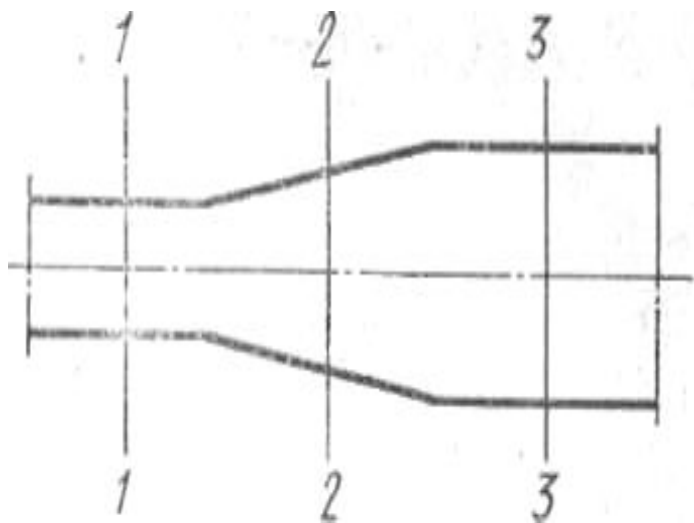
У самой стенки трубы, где силы вязкости оказывают преобладающее влияние на характер движения жидкости, режим потока в основном становится ламинарным. Ламинарный подслой в турбулентном потоке имеет очень малую толщину, которая уменьшается с возрастанием турбулентности. Однако явления, происходящие в нем, оказывают значительное влияние на величину сопротивления при движении жидкости, на протекание процессов **тепло- и массообмена.**



## Уравнение неразрывности потока.

Для капельной жидкости  
 $P = \text{const}$ , следовательно,

$$v_1 S_1 = v_2 S_2 = v_3 S_3, \text{ и } V_1 = V_2 = V_3.$$



Эти выражения представляют собой уравнение неразрывности установившегося потока.

Можно сделать вывод, что при установившемся движении через каждое поперечное сечение трубы при его полном заполнении проходит одинаковое количество жидкости в равные промежутки времени.

# Связь критериев Рейнольдса, Эйлера, Лагранжа и критерия гомохронности.

- Отношение сил давления к силам инерции дает **критерий Эйлера** (если вместо абсолютного давления  $p$  ввести разность давлений  $\Delta p$  между двумя точками):

$$\frac{\Delta p / l}{\rho v^2 / l} = \frac{\Delta p}{\rho v^2}$$

- Отношение силы инерции  $\rho v^2 / l$  к силе трения дает **критерий Рейнольдса**:

$$\frac{\rho v^2 / l}{\eta v / l^2} = \frac{v l \rho}{\eta} = Re$$

- **Критерий гомохронности** характеризует влияние нестационарности движения на скорость

$$\frac{\rho v^2 / l}{\rho v / t} = \frac{v t}{l} = Ho \quad \text{эт вид:}$$

- Произведение критерия Эйлера на критерий Рейнольдса дает **критерий Лагранжа**:

$$\frac{\Delta p}{\rho v^2} \frac{v l \rho}{\eta} = \frac{\Delta p l}{\eta v}$$

# Уравнение Бернулли.

$$v^2/(2g) + p/(\rho g) + z = \text{const}$$

- Данное выражение является **уравнением Бернулли** для идеальной жидкости. Для любых двух сходственных точек потока можно написать:

$$z_1 + p_1/(\rho g) + v_1^2/(2g) = z_2 + p_2/(\rho g) + v_2^2/(2g)$$

- Величина  $z + p/(\rho g) + v^2/(2g)$  называется полным гидродинамическим напором, где  $z$  — **геометрический напор** ( $H_r$ ), представляющий удельную потенциальную энергию положения в данной точке;  $p/(\rho g)$  — **статический напор** ( $H_{cm}$ ), характеризующий удельную потенциальную энергию давления в данной точке;  $v^2/(2g)$  — **динамический напор** ( $H_{дин}$ ), представляющий удельную кинетическую энергию в данной точке.
- На преодоление возникающего гидравлического сопротивления будет расходоваться часть энергии потока, носящей название **потерянного напора** ( $H_{пот}$ )

# Гидравлические сопротивления в трубопроводах

$$H_{\text{пот}} = (z_1 - z_2) + [p_1/(\rho g) - p_2/(\rho g)] + [v_1^2/(2g) - v_2^2/(2g)]$$

На горизонтальном участке трубы ( $z_1 = z_2$ ) постоянного диаметра при равномерном движении потока ( $v_1 = v_2$ ) потери напора:

$$H_{\text{пот}} = \Delta p/(\rho g) = H_{\text{тр}}$$

Потери напора, возникающие в результате резкого изменения конфигурации границ потока, называют местными потерями  $H_{\text{мс}}$  или потерями напора на **местные сопротивления**. Таким образом общие потери напора при движении жидкости складываются из потерь напора на трение и потерь на местные сопротивления:

$$H_{\text{пот}} = H_{\text{тр}} + H_{\text{мс}}$$

Установлено, что потери напора на трение прямо пропорциональны длине трубы и скорости потока и обратно пропорциональны диаметру трубы:

$$H_{\text{тр}} = \lambda \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g}$$

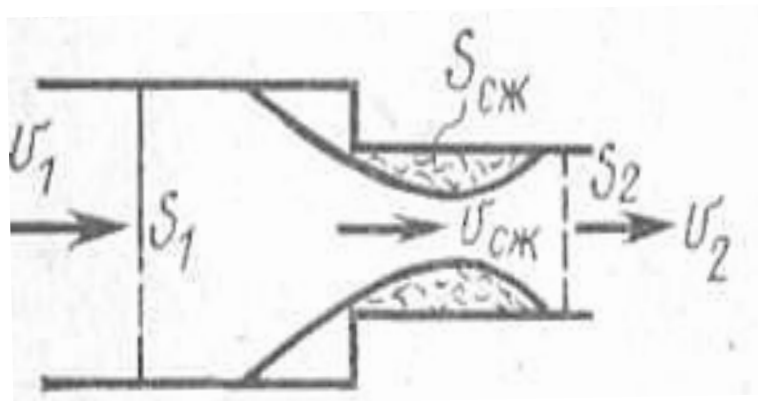
$\lambda$  – коэффициент трения



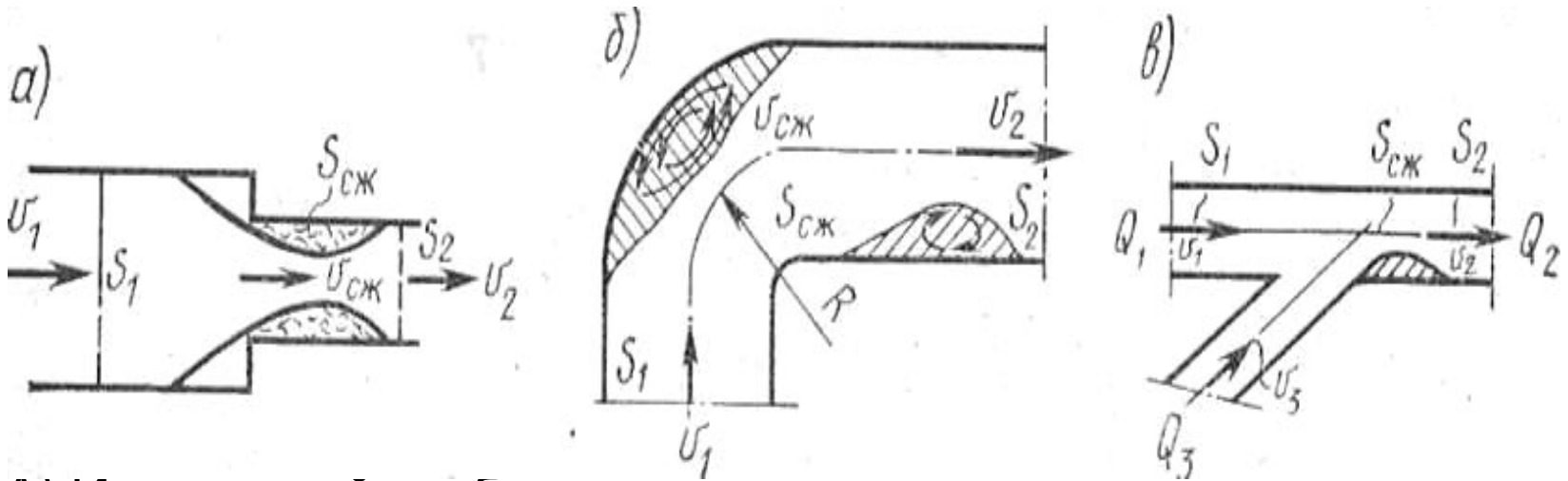
# Местные сопротивления

$$H_{\text{мс}} = \xi v^2 / (2g),$$

где  $\xi$  — коэффициент местного сопротивления;  $v$  — скорость потока после прохода местного сопротивления.



# Схемы движения потока при изменении сечения или направления потока.



А) Из широкой трубы в узкую

Б) при плавном повороте

В) при слиянии потоков

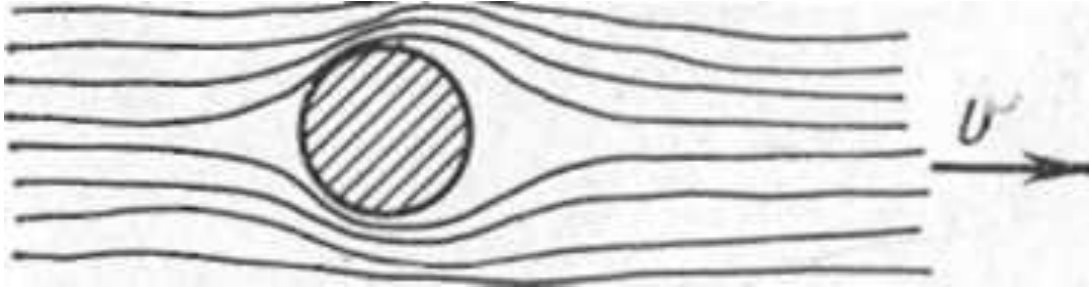
$v_1, S_1, Q_1$  — соответственно скорость, площадь сечения потока и расход жидкости перед препятствием;  $v_2, S_2, Q_2$  — то же, после препятствия;  $v_{сж}, S_{сж}$  — скорость и площадь сечения потока в момент прохождения препятствия;  $v_3, Q_3$  — скорость и расход жидкости в сливающемся потоке.

# Внешняя задача

## Гидродинамики.

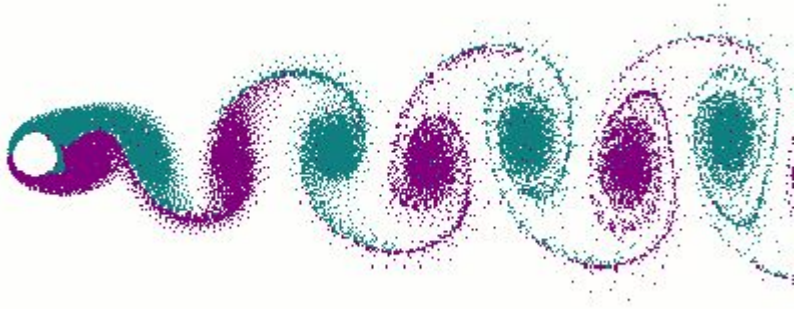
- Законы движения твердых тел в жидкости (или обтекание жидкостью твердых тел) имеют важное значение для расчета многих аппаратов, применяющихся при производстве строительных материалов. Знание этих законов позволяет не только более полно представить физическую сущность явлений, происходящих, например при транспортировании бетонной смеси по трубопроводам, перемешивании различного рода масс, движении частиц при сушке и обжиге во взвешенном состоянии, но и более правильно и экономично сконструировать технологические агрегаты и установки, применяемые для этих целей.

# Обтекание жидкостью твердого тела



## Ламинарный режим

- При обтекании неподвижной частицы потоком жидкости возникают гидродинамические сопротивления, зависящие в основном от режима движения и формы обтекаемых частиц. При небольших скоростях и малых размерах тел или при высокой вязкости среды режим движения ламинарный, тело окружено пограничным слоем жидкости и плавно обтекается потоком. Потеря давления в этом случае связана главным образом с преодолением сопротивления трения.



## Турбулентный режим

С развитием турбулентности все большую роль начинают играть силы инерции. Под действием их пограничный слой отрывается от поверхности, что приводит к понижению давления непосредственно за телом, образованиям в этой области завихрений. В результате возникает дополнительная сила сопротивления направленная навстречу потоку. Поскольку она зависит от формы тела, ее называют ***сопротивлением формы.***

Вес шара в неподвижной жидкой среде:

$$G = 1/6 \cdot 3,14 \cdot d^3 (\rho_{\text{ТВ}} - \rho_{\text{Ж}}) g$$

Уравнение равновесия:

$$cS \rho_{\text{Ж}} \frac{v^2}{2} = \frac{\pi d^3}{6} (\rho_{\text{ТВ}} - \rho_{\text{Ж}}) g$$

Скорость витания частицы:

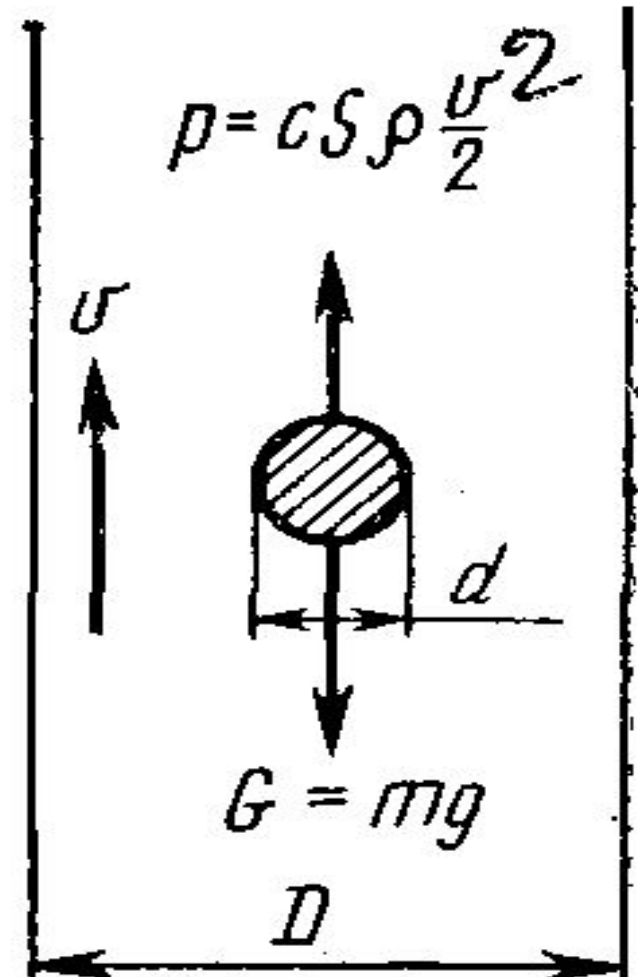
$$v_{\text{ВИТ}} = 3,62 \sqrt{\frac{(\rho_{\text{ТВ}} d)}{c \rho_{\text{Ж}}}}$$

В реальных взвесенесущих потоках необходимо вводить поправку в эти формулы для учета влияния стенок и соседних частиц

$$v_{\text{ВИТ.СТ}} = E_{\text{СТ}} v_{\text{ВИТ}}$$

Коэффициент стеснения  $E_{\text{СТ}}$  определяется опытным путем

**Осаждение частиц под действием силы тяжести.**



# Смешанная задача гидродинамики.

- Потери давления при движении жидкости через зернистый слой могут быть подсчитаны по формуле, аналогичной потерям давления на трение в трубопроводе<sup>v</sup>.

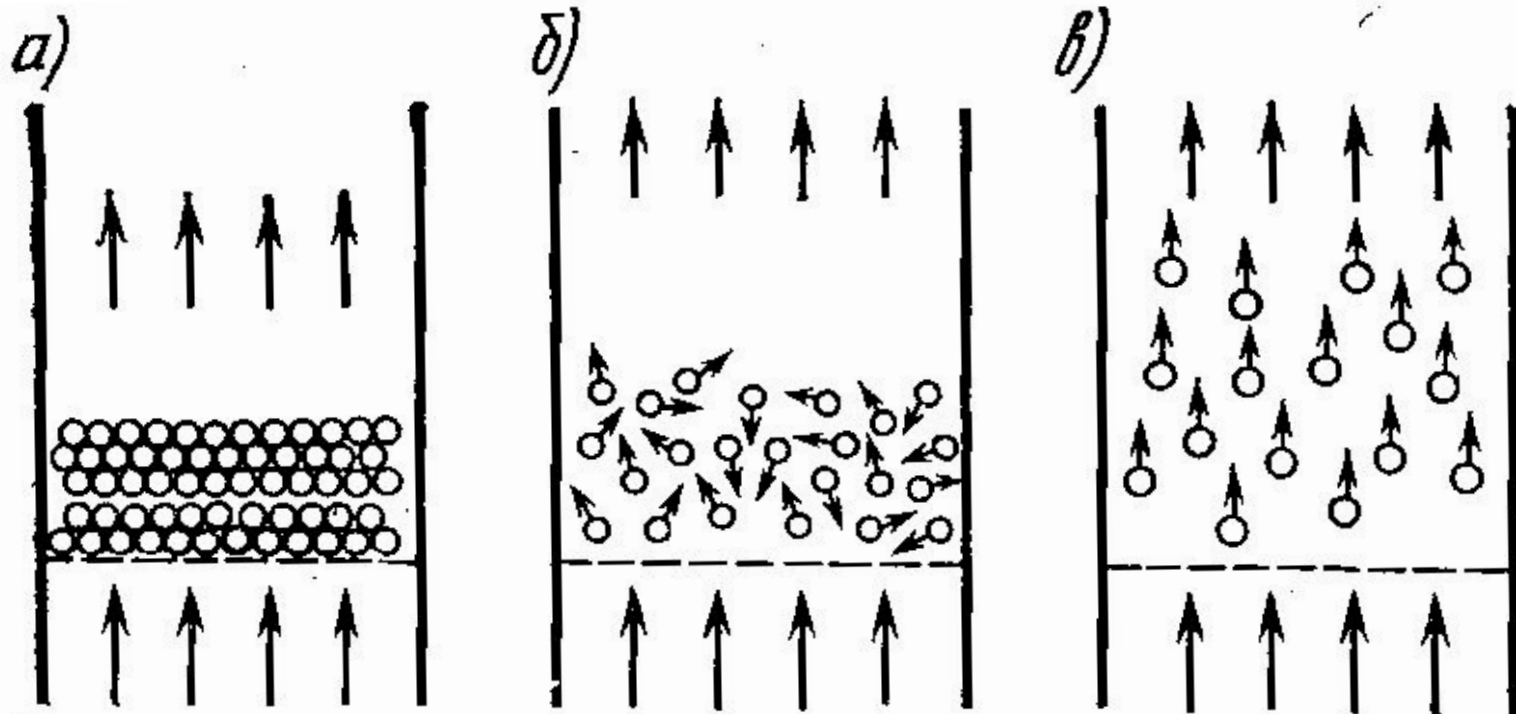
$$\Delta p_{\text{тр}} = \lambda \frac{l}{d_{\text{э}}} \frac{\rho v^2}{2}$$

# Гидродинамика взвешенного слоя.

- При малых скоростях потока жидкости или газа, проходящего через зернистый слой снизу, последний остается неподвижным, так как поток проходит по межзерновым каналам, т. е. фильтруется через слой.
- При увеличении скорости потока промежутки между частицами увеличиваются — поток как бы приподнимает их. Частицы приходят в движение и перемешиваются с газом или жидкостью. Образовавшуюся взвесь называют **взвешенным или псевдооживленным слоем**, так как масса твердых частиц в результате непрерывного перемешивания в восходящем потоке приходит в легкоподвижное состояние, напоминая кипящую жидкость.
- Слой будет оставаться неподвижным в восходящем потоке, если  $v_{\text{ВИТ}} > v$  (**фильтрация**); слой будет находиться в состоянии равновесия (витания), если  $v_{\text{ВИТ}} \approx v$  (**взвешенный слой**); твердые частицы будут двигаться в направлении потока, если  $v_{\text{ВИТ}} < v$  (**унос**).



# Схемы движения жидкости через зернистый слой

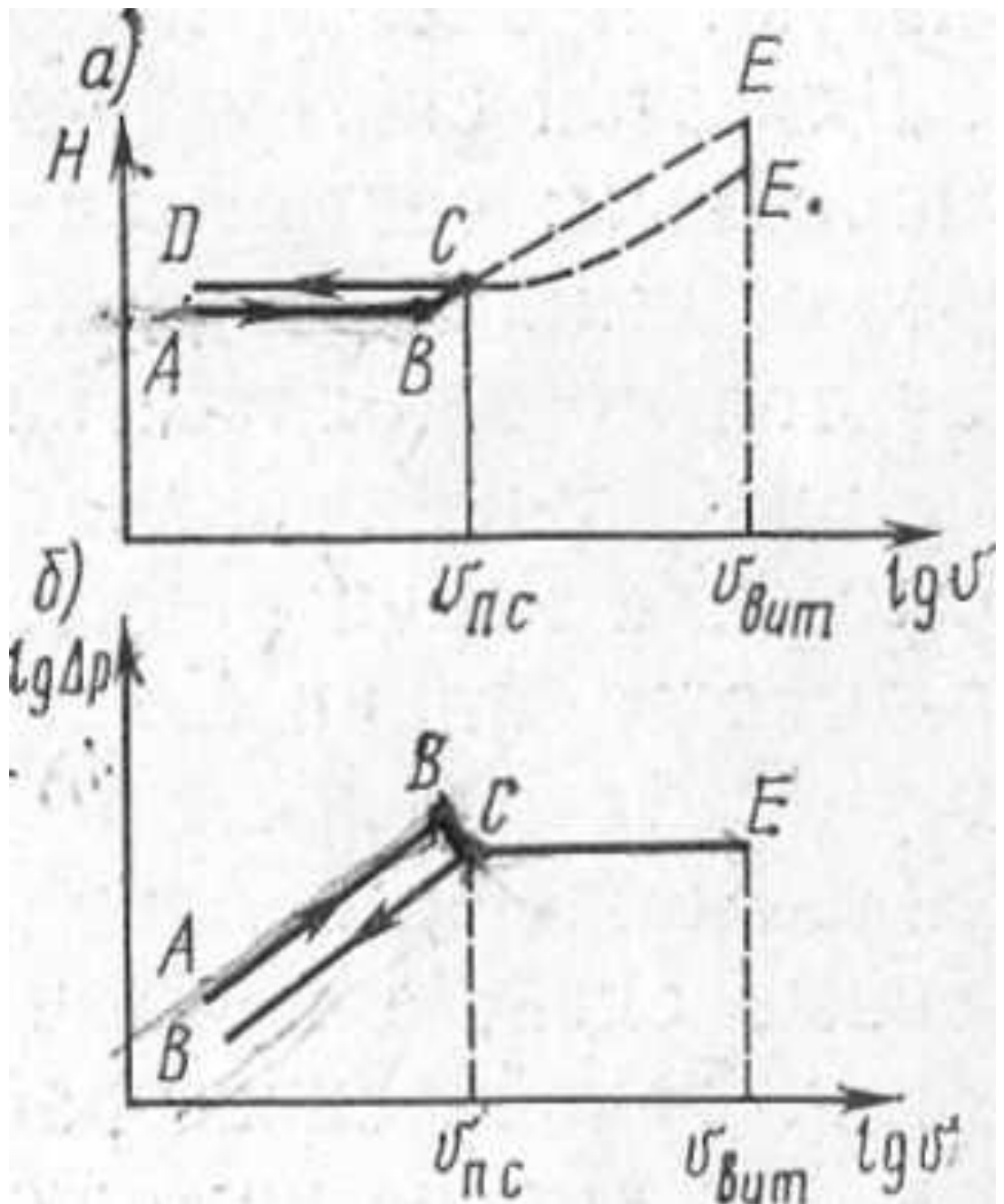


- а — неподвижный слой;
- б — кипящий псевдооживленный слой;
- в — унос частиц потоком

Зависимость высоты слоя (а) и его гидравлического сопротивления (б) от скорости потока.

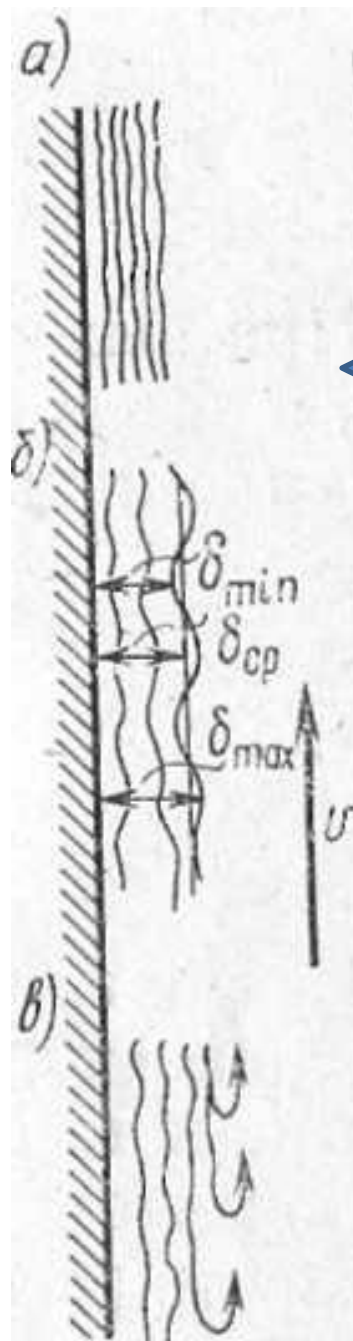
Отношение рабочей скорости  $v_0$  к скорости начала псевдооживления называют **числом псевдооживления** ( $K_v$ ):

$$K_v = v_0 / v_{пс}$$



## Пленочное течение жидкости и барботаж.

Для образования значительной поверхности контакта чаще всего прибегают к такому приему, когда жидкость заставляют стекать под действием силы тяжести по вертикальной или наклонной стенке, а газ (или пар) направляется снизу вверх. Нашли применение и такие аппараты, в которых газ проходит через слой жидкости, образуя отдельные струи, пузыри, пену и брызги. Такой процесс называется барботажем.



**Стекание пленки жидкости по вертикальной стенке:**

*а - ламинарное стекания;  
б - волновое стекание;  
в - срыв пленки (инверсия).*

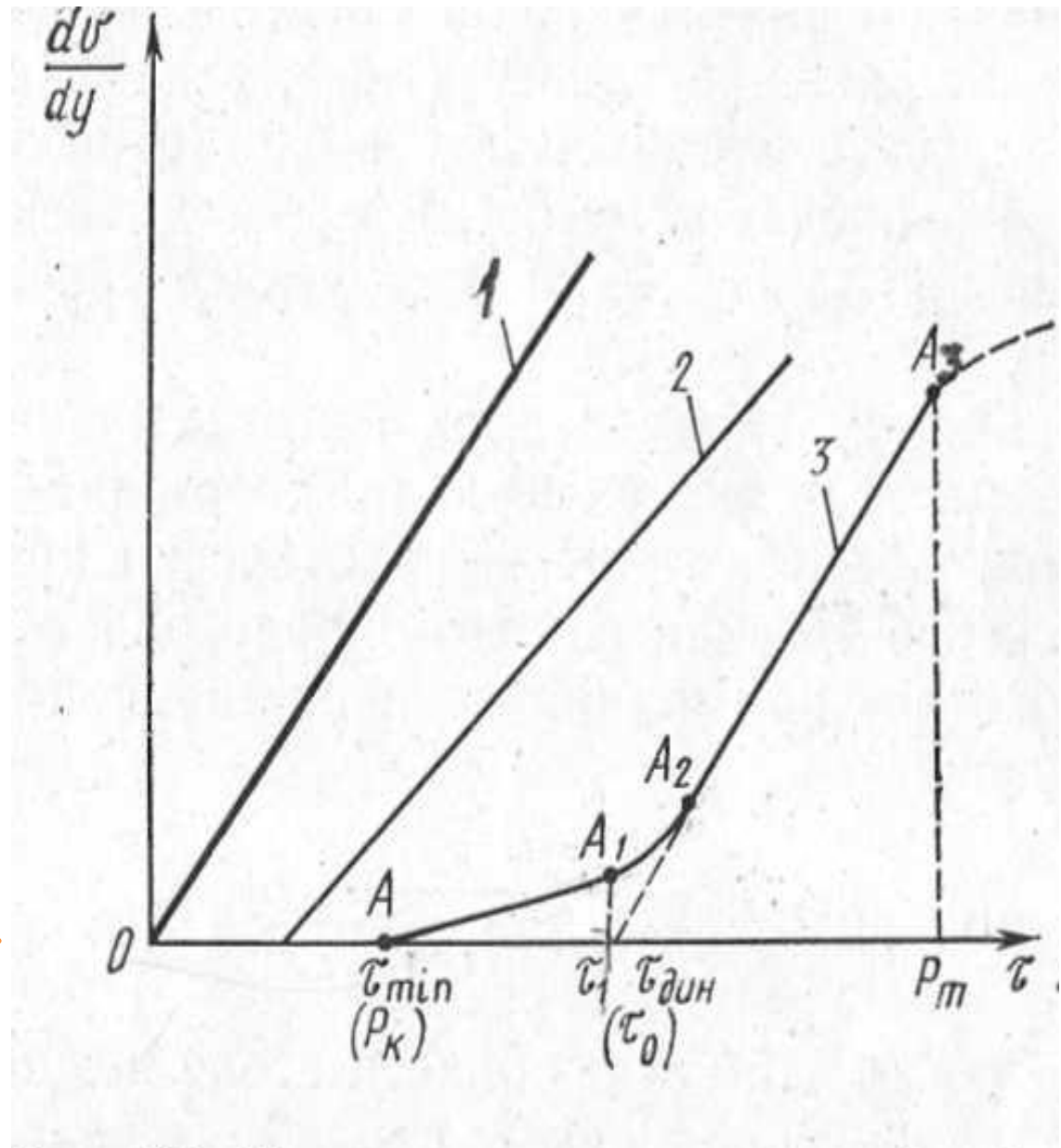
# Течение неньютоновских жидкостей.

В современной теории неньютоновские жидкости подразделяют на три класса. К первому классу относятся вязкие или стационарные неньютоновские жидкости, для которых в уравнении  $\tau=f(dv/dy)$  функция не зависит от времени. По виду кривых течения различают **бингамовские** (кривая 2), **псевдопластичные** и **дилатантные** жидкости.

Кривые течения ньютоновской и бингамовской



- 1 - ньютоновская жидкость
- 2 - бингамовская неструктурированная жидкость
- 3 - -- " -- " -- структурированная



- Течение **бингамовской жидкости** начинается только после приложения  $\tau_0 \geq \tau$  (подсчитанного по уравнению Ньютона), которое необходимо для разрушения структуры, образовавшейся в данной системе. Такое течение называют пластическим, а критическое (т. е. предельное) напряжение сдвига  $\tau_0$  – **пределом текучести**. При напряжениях, меньших  $\tau_0$ , бингамовские жидкости ведут себя как твердые тела, а при напряжениях, больших  $\tau_0$  — как ньютоновские жидкости, т. е. зависимость  $\tau_0$  от  $dv/dy$  линейна.
- Считается, что структура тела Бингама под действием предельного напряжения сдвига мгновенно и полностью разрушается, в результате чего тело Бингама превращается в жидкость, при снятии напряжения структура восстанавливается и тело возвращается к твердому состоянию.
- Уравнение кривой течения носит название **уравнения Шведова – Бинга**

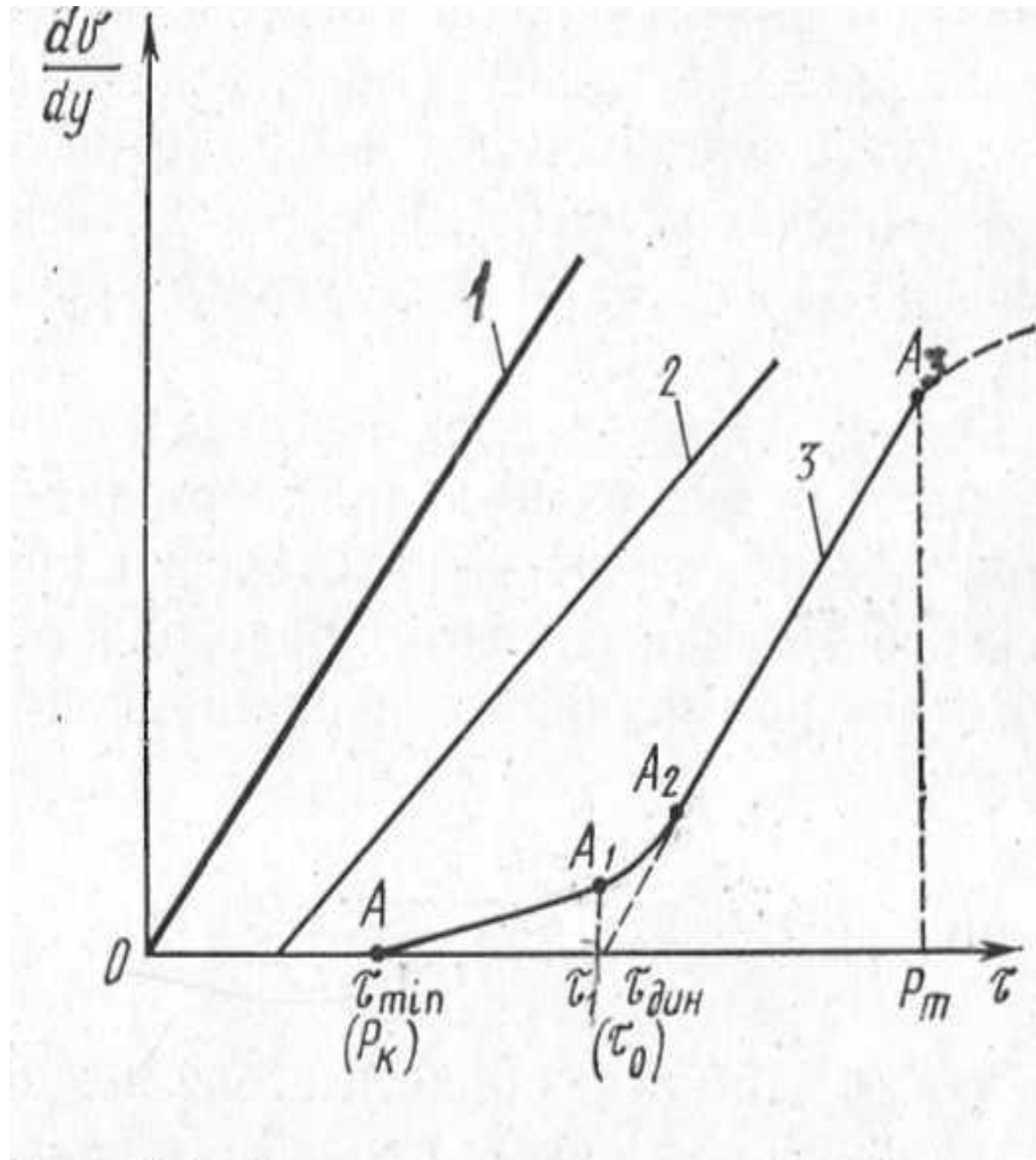
$$\tau = \tau_0 + \eta_{пл} \overline{dv/dy}$$

- **Область А—А<sub>1</sub>** — практически прямая линия, в которой пластическое течение системы происходит без заметного разрушения структуры при наибольшей постоянной пластической вязкости (шведовской)

$$\eta_{\text{пл}} = \frac{\tau - \tau_1}{\frac{dv}{dy}_{\tau \rightarrow \tau_1}}$$

- **Кривая А<sub>1</sub>—А<sub>2</sub>** — область пластического течения системы с постоянным разрушением структуры. Пластическая вязкость резко падает, вследствие чего скорость течения быстро увеличивается.

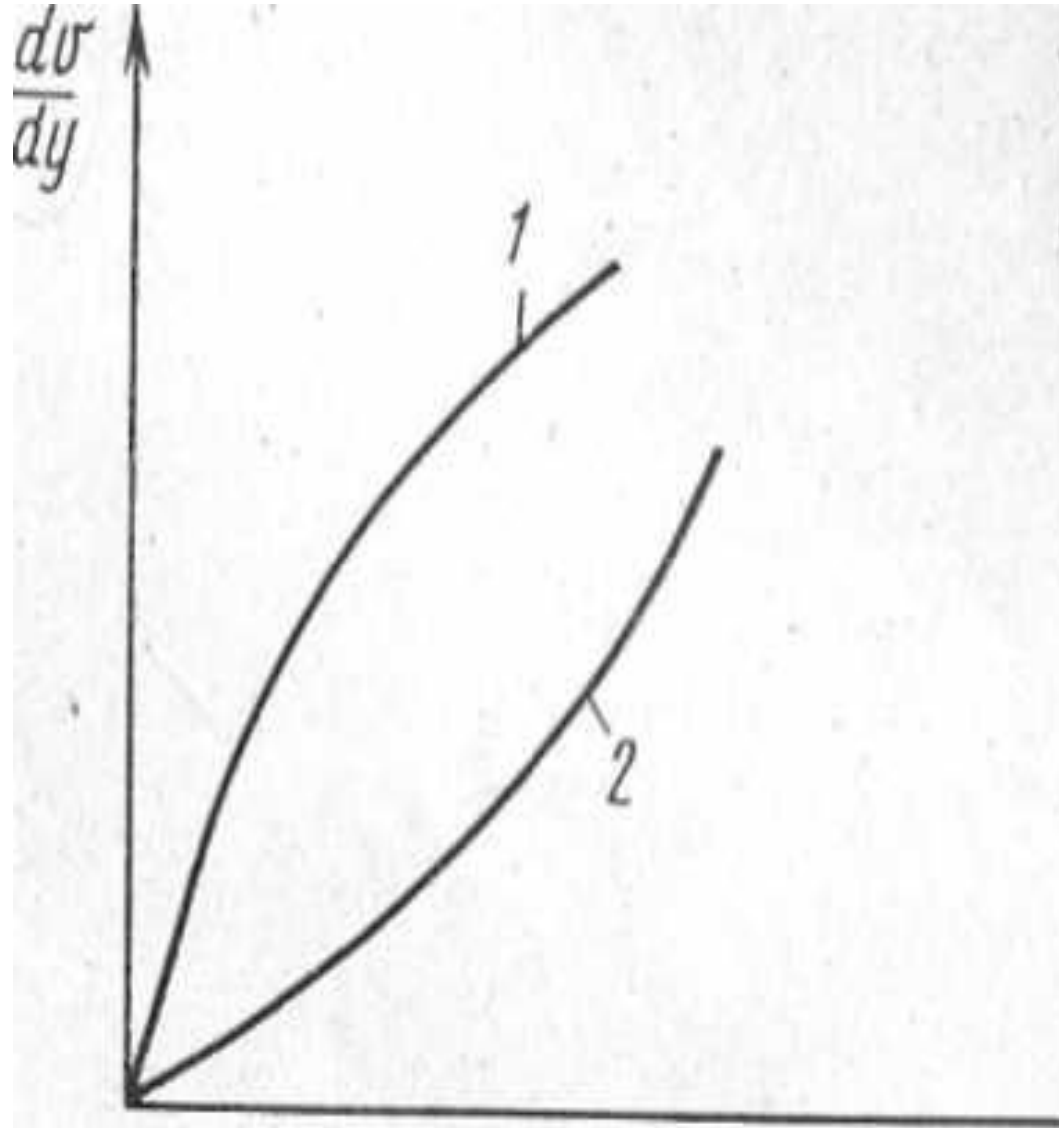
- **Участок А<sub>2</sub>—А<sub>3</sub>** — область предельно разрушенной структуры, выше которой течение происходит с наименьшей пластической вязкостью (бингамовской).



# **Кривые течения псевдопластичных и дилатантных жидкостей**

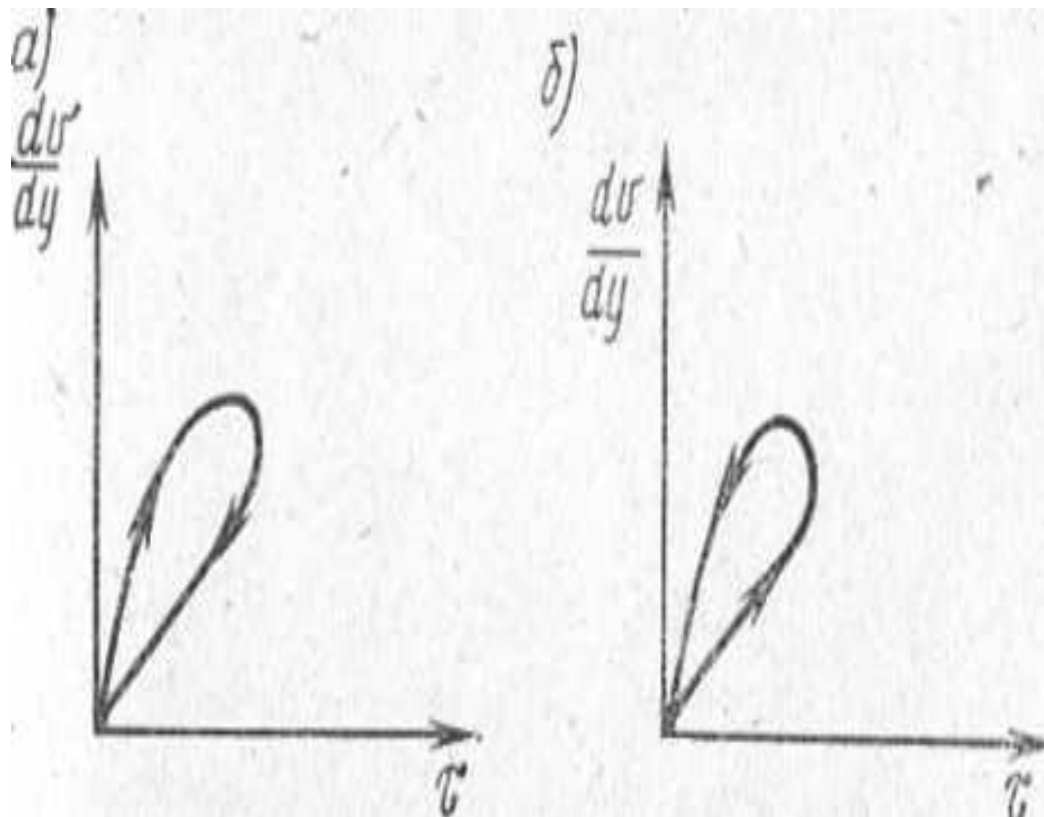
• **Псевдопластичные жидкости** (кривая 1) начинают течь уже при самых малых значениях  $\tau$ . Они характеризуются тем, что значение вязкости в каждой конкретной точке кривой зависит от градиента скорости.

• **Дилатантные жидкости** (кривая 2), в отличие от псевдопластических, характеризуются возрастанием кажущейся вязкости с увеличением градиента скорости.



# Кривые течения тиксотропных и реопектических жидкостей

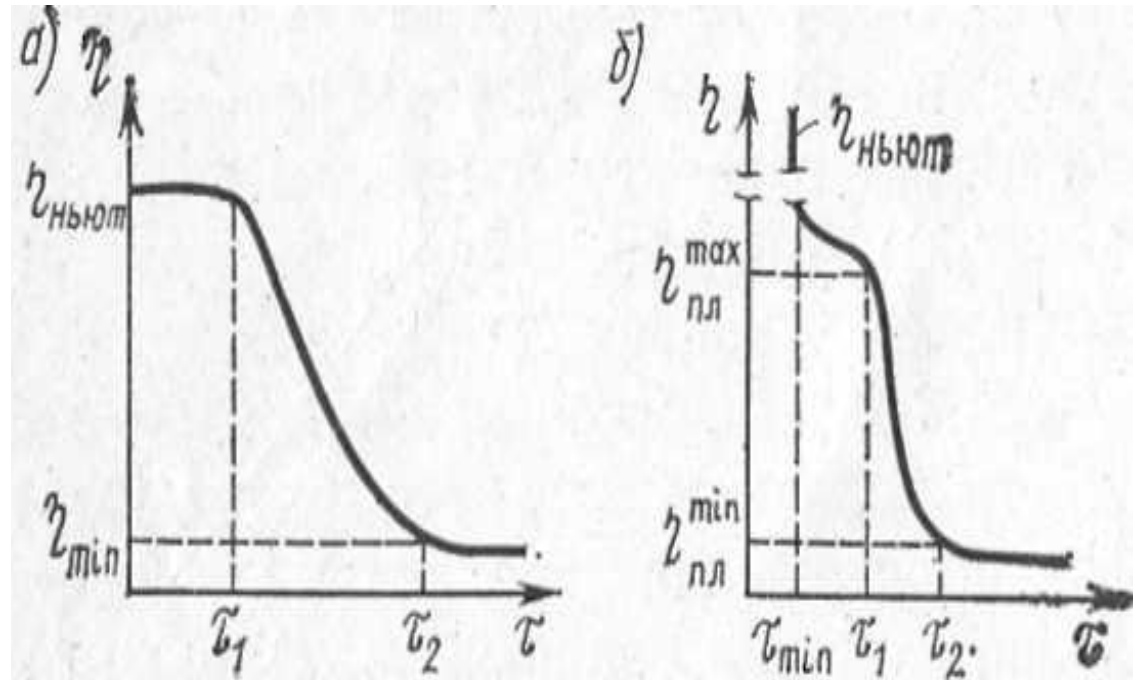
Рассмотрим жидкости, характеристики которых зависят от времени (нестационарные жидкости). Для этих структур **кажущаяся вязкость** определяется не только градиентом скорости сдвига, но и его продолжительностью. В зависимости от характера влияния продолжительности сдвига на структуру различают **тиксотропные** и **реопектантные** жидкости. У **тиксотропных жидкостей (а)** с увеличением продолжительности воздействия напряжения сдвига определенной величины структура разрушается, вязкость уменьшается, а текучесть возрастает. После снятия напряжения структура жидкости постепенно восстанавливается с увеличением вязкости. У **реопектических жидкостей (б)** с увеличением продолжительности воздействия напряжения текучесть





## Вязкоупругие жидкости.

Жидкости текут под действием напряжения  $\tau$ , но после снятия напряжения частично восстанавливают свою форму. Таким образом, эти структуры обладают двойным свойством — вязким течением по закону Ньютона и упругим восстановлением формы по закону Гука.



*Изменение вязкости в зависимости от напряжения сдвига для жидкообразных (а) и твердообразных (б) систем*