

**ВОЕННО–МЕДИЦИНСКАЯ АКАДЕМИЯ**

**имени С.М. Кирова**

**Кафедра биологической и медицинской физики**

## **ЛЕКЦИЯ № 3**

по дисциплине «Физика, математика»

на тему: «**Механические свойства сред**»

для курсантов и студентов I курса ФПВ,  
ФПиУГВ, спецфакультета

- **Механика** (от греч. *techanike* – искусство построения машин) - наука о механическом движении материальных тел (т. е. изменении с течением времени взаимного положения тел или их частей в пространстве) и взаимодействиях между ними.

- **МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА**

материалов определяют их поведение под действием механической нагрузки.

- Большое значение для врача имеет **механика жидкостей и газов** - наука, изучающая закономерности покоя и движения жидкостей и газов.

# 1. Особенности структуры и молекулярного движения в жидкостях, газах и твердых телах.

- Основными **агрегатными состояниями** вещества считают газообразное, жидкое и твердое состояния.
- **Газы** обладают сжимаемостью. Они способны заполнять весь объем сосуда, в котором находятся.
- **Твердые тела** несжимаемы, сохраняют свою форму и размеры. Различают кристаллические и аморфные твердые тела. По своим механическим свойствам все тела делятся на упругие, пластичные и хрупкие.

- **Жидкость** - это агрегатное состояние вещества, промежуточное между твердым и газообразным.
- Одни свойства жидкостей роднят их с твердыми телами (наличие определенного объема, относительная несжимаемость, ближний порядок молекул, плотность, наличие поверхности), другие – с газами (отсутствие определенной формы).
- При этом жидкости обладают и только им присущими свойствами, например, текучестью.

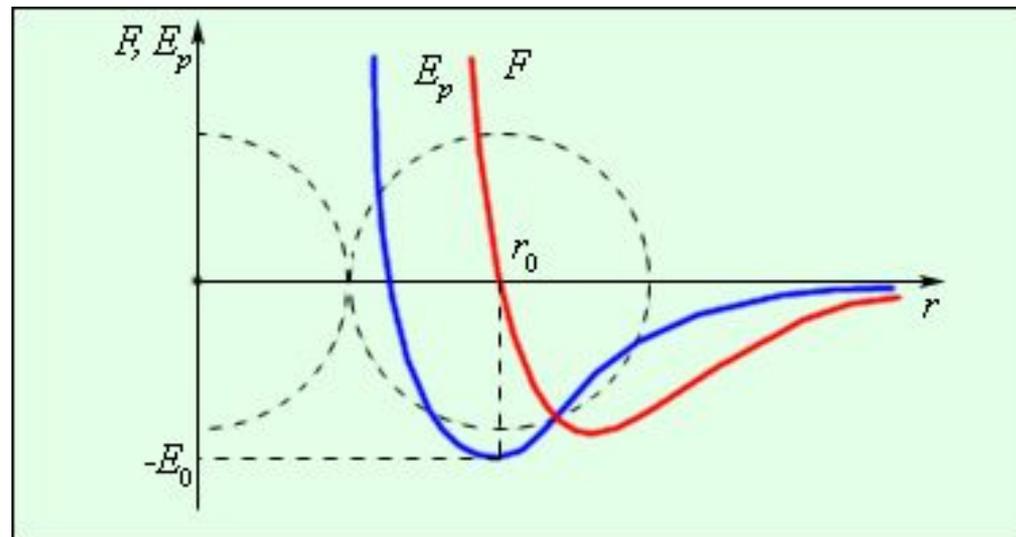
- Существование у вещества нескольких агрегатных состояний обусловлено различиями в тепловом движении его молекул/атомов и в их взаимодействии.

## Основные положения молекулярно-кинетической теории (МКТ):

- Все тела состоят из мельчайших частиц – молекул, атомов или ионов.
- Эти частицы находятся в состоянии постоянного хаотического теплового движения.
- Между молекулами действуют силы притяжения и силы отталкивания, имеющие электрическую природу.

- **Силы**, действующие между двумя молекулами, зависят **от расстояния** между ними.
- Молекулы представляют собой сложные пространственные структуры, содержащие как положительные, так и отрицательные заряды.
- Если расстояние между молекулами достаточно велико, то преобладают **силы межмолекулярного притяжения**. На малых расстояниях преобладают **силы отталкивания**.

- Зависимости результирующей силы  $F$  и потенциальной энергии  $E_p$  взаимодействия между молекулами от расстояния между их центрами качественно изображены на рисунке.



- При некотором расстоянии  $r = r_0$  результирующая сила взаимодействия обращается **в нуль**. Это расстояние условно можно принять за **диаметр молекулы**.
- Потенциальная энергия взаимодействия при  $r = r_0$  минимальна.
- Чтобы удалить друг от друга две молекулы, находящиеся на расстоянии  $r_0$ , нужно сообщить им дополнительную энергию  $E_0$ . Величина  $E_0$  называется **глубиной потенциальной ямы, или энергией связи**.

- Беспорядочное хаотическое движение молекул называется **тепловым движением**. Кинетическая энергия теплового движения растет с возрастанием **температуры**.

$$E_k = \frac{3}{2}kT$$

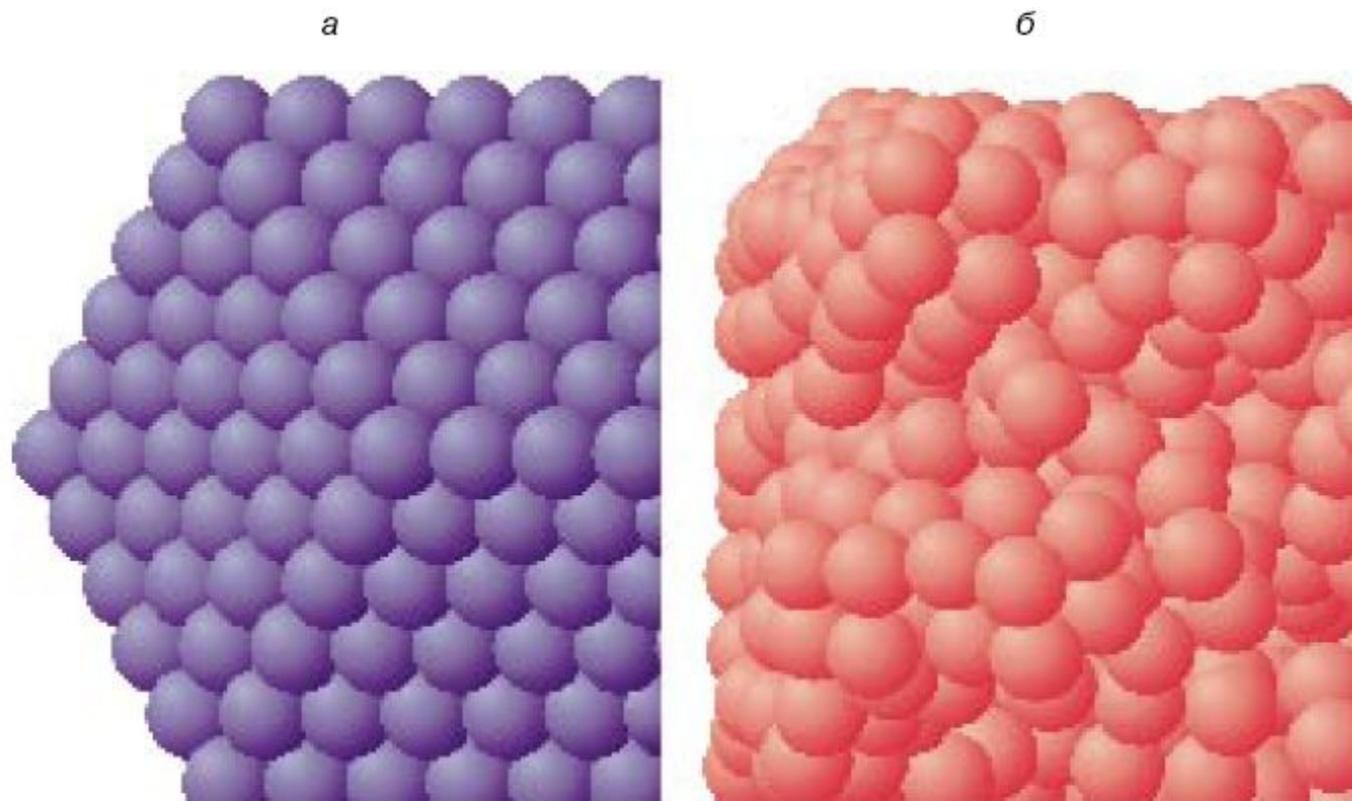
- При низких температурах средняя кинетическая энергия молекулы может оказаться меньше глубины потенциальной ямы  $E_0$ . В этом случае молекулы конденсируются в **твердое вещество**; при этом среднее расстояние между молекулами будет приблизительно равно  $r_0$ .
- При повышении температуры средняя кинетическая энергия молекулы становится больше  $E_0$ , молекулы разлетаются, и образуется **газообразное вещество**.

- В твердых телах молекулы совершают беспорядочные колебания около фиксированных центров (положений равновесия). Эти центры могут быть расположены в пространстве нерегулярным образом (**аморфные тела**) или образовывать упорядоченные объемные структуры (**кристаллические тела**).

- В жидкостях **средняя кинетическая энергия** молекул близка к глубине **потенциальной ямы**.
- Поэтому молекулы жидкости имеют значительно большую свободу для теплового движения.

- Согласно теории Я.И. Френкеля, молекулы жидкости, подобно частицам твердого тела, колеблются около положений равновесия, однако эти положения равновесия не являются постоянными.
- По истечении некоторого времени, называемого **временем оседлой жизни** (порядка  $10^{-9}$  с), за которое совершается порядка **1000** колебаний, молекула скачком переходит в новое положение равновесия на расстояние, равное среднему расстоянию между молекулами.

- Таким образом, молекулы жидкости не привязаны к определенным центрам и могут перемещаться по всему объему жидкости. Этим объясняется **текучесть** жидкостей.
- Близко расположенные молекулы жидкости также могут образовывать упорядоченные структуры, содержащие несколько молекул. Это явление называется **ближним порядком** в отличие от **дальнего порядка**, характерного для кристаллических тел.



**Рис. 3.** Компьютерные модели структуры дальнего (*a*) и ближнего (*б*) порядка

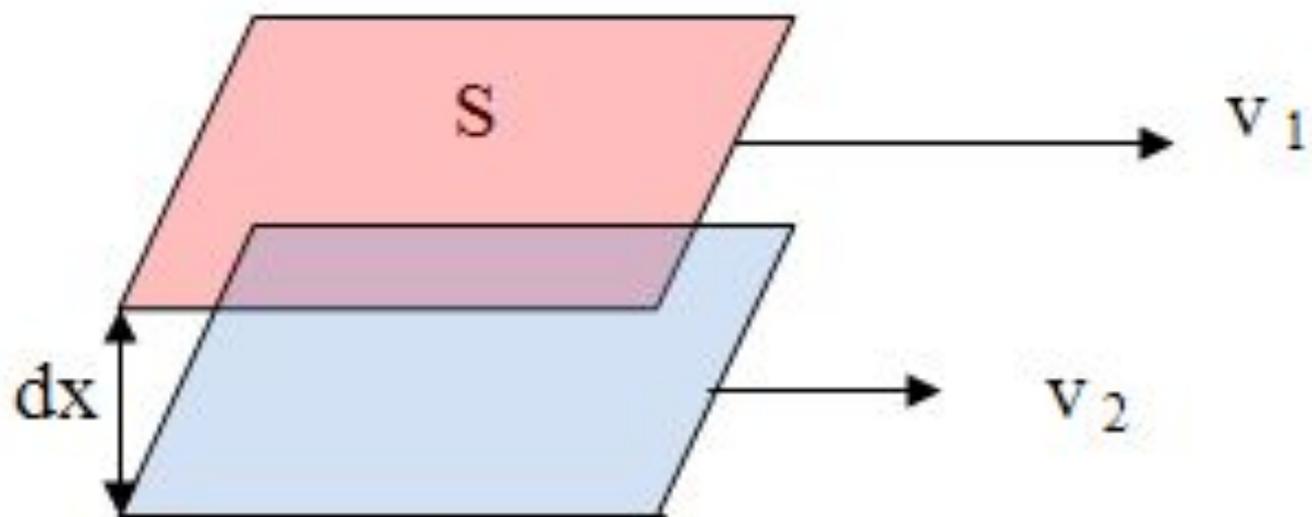
- Переход молекулы жидкости из одного положения равновесия в другое является переходом через **потенциальный барьер** высотой  $E_0$ .
- Энергию для перехода через потенциальный барьер молекула получает за счет энергии теплового движения соседних молекул.

- С повышением температуры среднее **время оседлой жизни** молекул уменьшается, так как увеличиваются **средняя кинетическая энергия** молекул и вероятность преодоления молекулами **потенциального барьера**.
- Соответственно, увеличивается **текучесть** жидкости и уменьшается ее **вязкость**.

## 2. Вязкость (внутреннее трение) жидкости. Формула Ньютона. Ньютоновские и неньютоновские жидкости.

- В реальных жидкостях всегда существуют **силы трения**.
- В отличие от твёрдых тел, где силы трения действуют между двумя разными телами, в жидкостях силы трения возникают **внутри жидкости** (между разными её слоями).
- Поэтому трение в жидкостях называют **внутренним трением** или **вязкостью**.

- Рассмотрим два слоя жидкости, движущиеся с разными скоростями  $v_1$  и  $v_2$ .
- Расстояние между слоями равно  $dx$ .
- Выделим в каждом слое площадку с площадью  $S$ .



- Исаак Ньютон показал, что сила трения между этими слоями равна:

$$F_{тр} = -\eta \cdot \frac{dv}{dx} \cdot S = -\eta \cdot grad v \cdot s$$

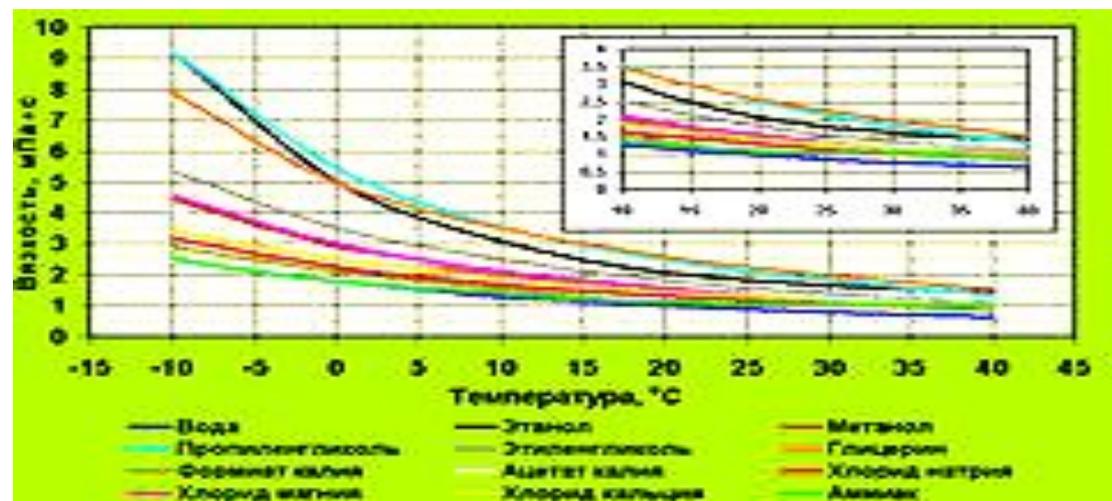
Знак „минус“ показывает, что сила трения направлена навстречу движению.

Эта формула носит название [формулы Ньютона.](#)

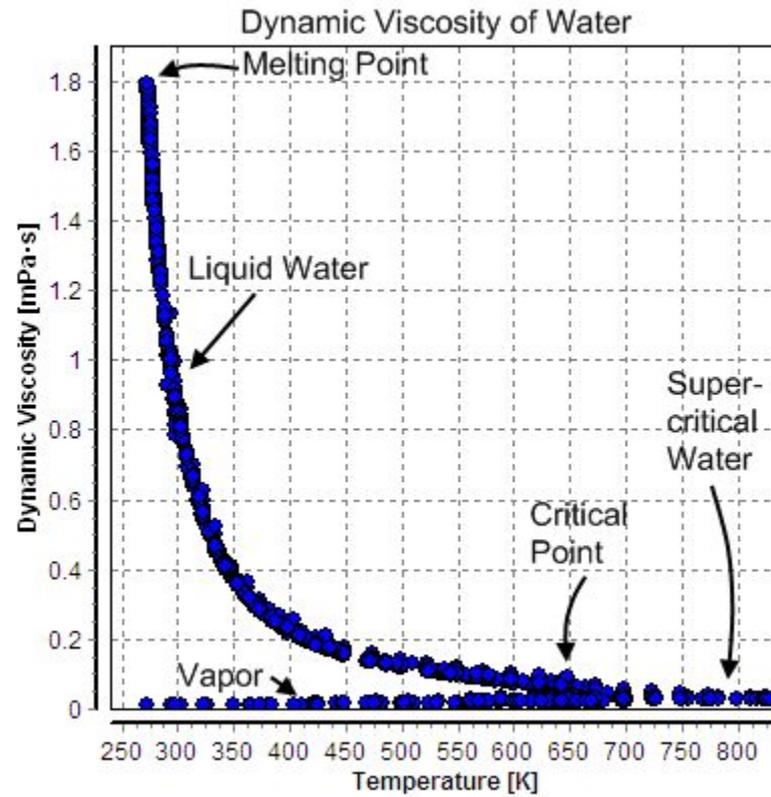
- Коэффициент  $\eta$  («э́та») называется **коэффициентом вязкости** или **динамической вязкостью** (реже говорят «коэффициент внутреннего трения»).
- Размерность коэффициента вязкости - **Па·с** (паскаль-секунда).
- В старой литературе можно встретить внесистемную единицу „пуаз" (**П**).

$$1 \text{ Па}\cdot\text{с} = 10 \text{ П}$$

- Коэффициент вязкости зависит, прежде всего, от **природы жидкости** (например, у воды вязкость относительно мала, у масла много больше).
- Кроме того, он сильно зависит от **температуры**.
- С ростом температуры вязкость сильно уменьшается по экспоненциальному закону.

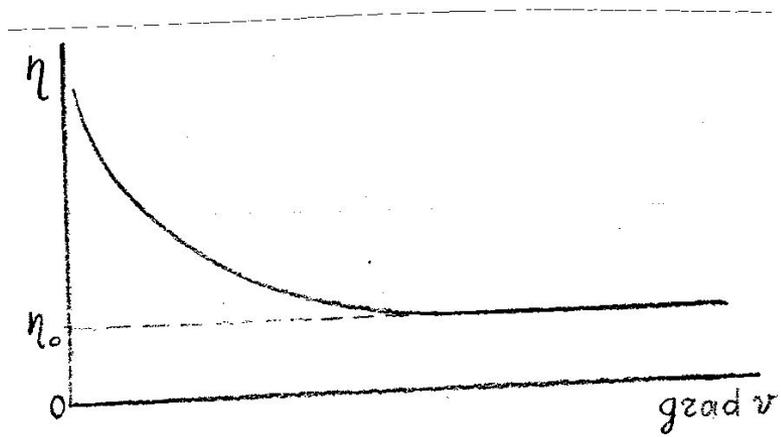


Experimental Data Points from Dortmund Data Bank



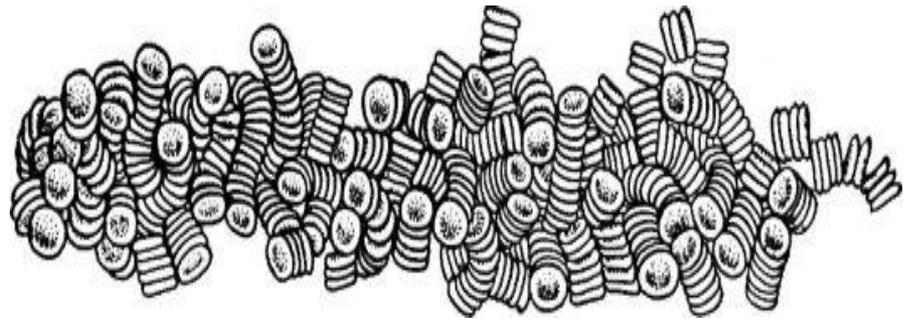
- Для большинства жидкостей коэффициент вязкости при постоянной температуре есть **постоянная величина**, зависящая только от природы жидкости и **не зависящая от её скорости** (точнее, от градиента скорости). Такие жидкости принято называть „**НЬЮТОНОВСКИМИ**“, то есть строго подчиняющимися закону Ньютона.

- Однако опыт показал, что для ряда жидкостей  $\eta \neq \text{const}$ .
- При малых градиентах скорости (что чаще всего бывает, когда сама скорость движения жидкости мала) вязкость относительно велика, но **с ростом градиента скорости вязкость уменьшается**, приближаясь к некоторому, сравнительно малому постоянному значению.



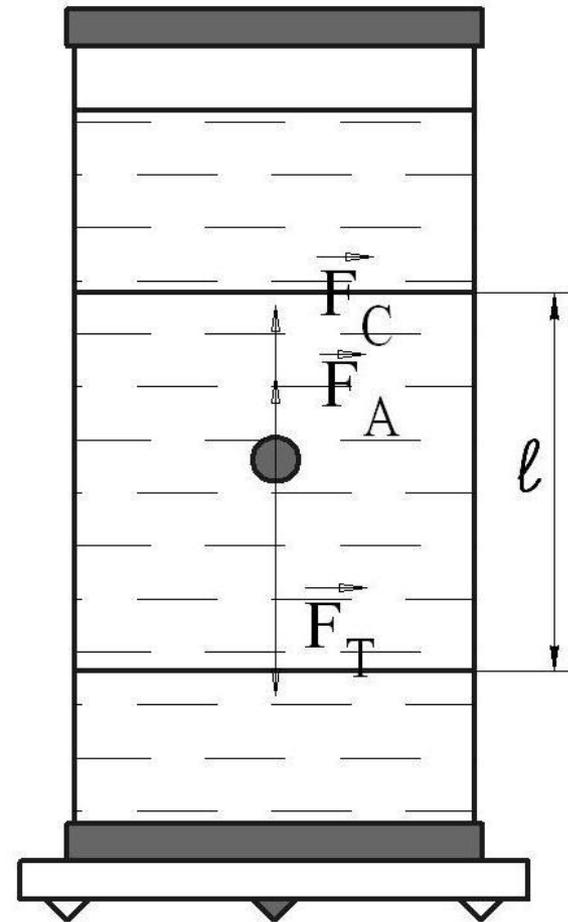
- Такие жидкости называются «**неньютоновскими**».
- К ним относятся **структурированные дисперсные системы** (суспензии, эмульсии), растворы и расплавы некоторых полимеров, многие органические жидкости и др.
- При прочих равных условиях вязкость таких жидкостей значительно больше, чем у ньютоновских жидкостей.
- Это связано с тем, что благодаря сцеплению молекул или частиц в неньютоновской жидкости образуются **пространственные структуры**, на разрушение которых затрачивается дополнительная энергия.

- Цельная кровь (суспензия эритроцитов в белковом растворе - плазме) является неньютоновской жидкостью вследствие агрегации эритроцитов.



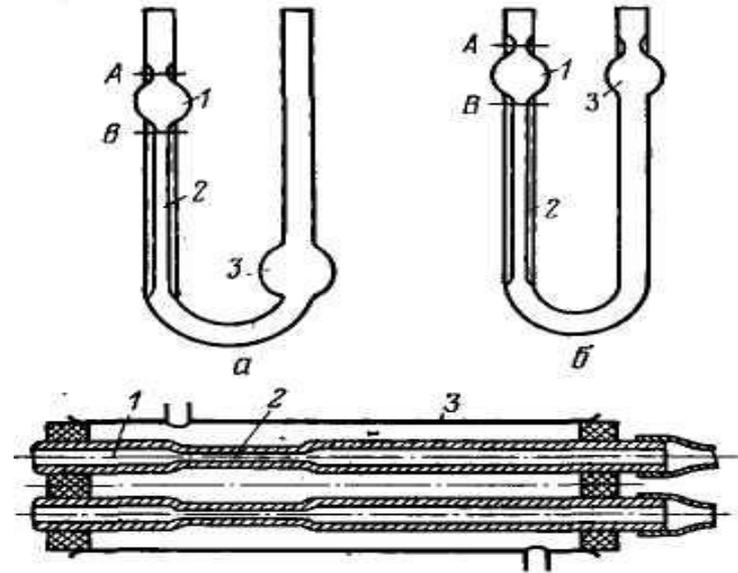
# 3. Способы измерения вязкости

- Для измерения величины  $\eta$  в жидкостях с большой вязкостью (глицерин, различные масла) удобно применять метод Стокса. Он основан на измерении скорости падения шарика в исследуемой жидкости.



# Капиллярные вискозиметры

- а) Вискозиметр Уббелоде
- б) Вискозиметр Освальда
- в) Медицинский вискозиметр ВК-4



- **Вискозиметр крови «Антарес» ВКА-0801**



## 4. Механические свойства твердых тел

- Силы притяжения и отталкивания обуславливают **механическую прочность** твердых тел. т. е. их способность противодействовать изменению формы и объема.
- **Растяжению тел** препятствуют **силы межатомного притяжения**, а **сжатию** - **силы отталкивания**.

- **Деформация** - изменение формы или объема тела под действием внешних сил.
- Деформация может быть **упругая** (после прекращения воздействия тело полностью восстанавливает первоначальную форму и размеры) или **неупругая** (после прекращения воздействия тело не восстанавливает первоначальную форму или размеры).

- Деформацию растяжения и сжатия можно охарактеризовать **абсолютной деформацией**  $\Delta l$ , равной разности длин образца после растяжения  $l$  и до него  $l_0$ :

$$\Delta l = l - l_0$$

- Отношение абсолютной деформации  $\Delta l$  к первоначальной длине образца  $l_0$  называют **относительной деформацией**:

$$\varepsilon = \Delta l / l_0$$

- Если деформация **упругая**, а относительная деформация **невелика**, то выполняется экспериментально установленный

**закон Гука:**

***Сила упругости прямо пропорциональна абсолютной деформации.***

$$F_{\text{упр.}} = -k \Delta l$$

- $k$  - коэффициент жесткости (упругости).
- Зависит от материала, формы и размеров тела.
- Единица коэффициента упругости в СИ:  
 $1 \text{ Н/м}$  .

- Физическая величина, равная отношению модуля силы упругости  $F_{\text{упр.}}$ , возникающей при деформации, к площади сечения  $S$  образца, перпендикулярного вектору силы  $F_{\text{упр.}}$ , называется **механическим напряжением**:

$$\sigma = F_{\text{упр.}}/S$$

Единица измерения: 1 Па (паскаль) = 1Н/м<sup>2</sup>.

- Отношение механического напряжения к относительному удлинению (при малых упругих деформациях растяжения и сжатия) называется модулем упругости  $E$  (модулем Юнга):

$$E = \sigma / \varepsilon$$

- Модуль Юнга  $E$  не зависит от формы и размеров предмета, изготовленных из данного материала.
- Размерность модуля Юнга - **Па**.
- Модуль Юнга показывает, какое надо создать механическое напряжение, чтобы деформировать тело в 2 раза ( $\Delta l / l_0 = 1$ ).

- Поскопъкν

$$E = \frac{\sigma}{S} = \frac{F_{\text{упр.}} l_0}{S \Delta l}$$

ТО:

$$F_{\text{упр.}} = \frac{ES \Delta l}{l_0} = k \Delta l$$

где

$$k = \frac{ES}{l_0}$$

- Получили **закон Гука**.
- Другая форма записи закона Гука:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

(Механическое напряжение прямо пропорционально модулю относительной деформации.)

# Диаграмма растяжения

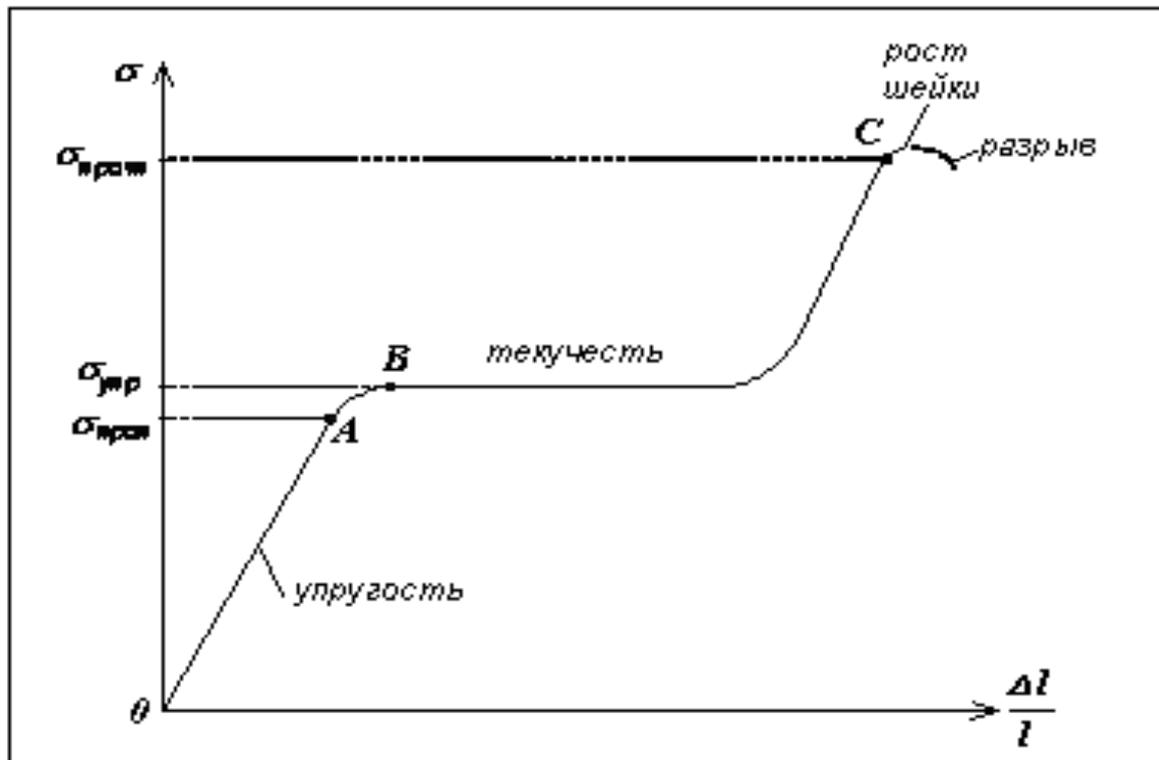
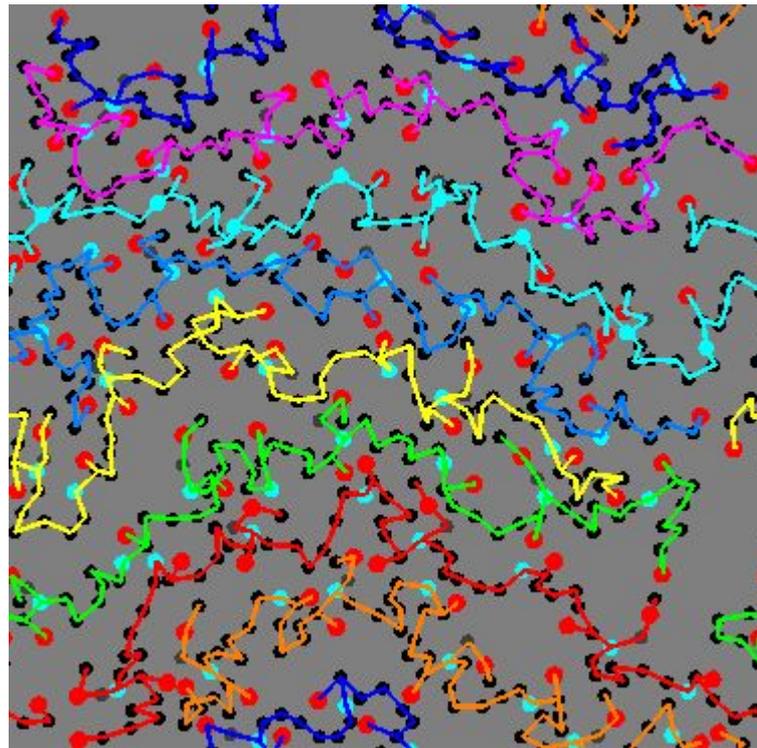


Рис. 27.2.2

- $\sigma_{\text{проп}}$  – предел пропорциональности (максимальное напряжение, при котором деформация еще остается упругой и выполняется закон Гука).
- $\sigma_{\text{упр}}$  – предел упругости (максимальное напряжение, при котором еще не возникают заметные остаточные деформации, и материал еще сохраняет упругие свойства).
- $\sigma_t$  – предел текучести (напряжение, при котором материал «течет»).
- $\sigma_{\text{прочн}}$  – предел прочности (наибольшее напряжение, которое способен выдержать образец без разрушения).

# Механические свойства полимеров

- **Полимером** называется органическое вещество, длинные молекулы которого построены из одинаковых многократно повторяющихся звеньев — **мономеров**.
- Механические свойства полимеров резко отличаются от кристаллических мономеров (например, стали).
- **Сталь** разрывается уже при растяжении на **0,3%**, **мягкие резины** можно растягивать до **300%**.



- Одна из основных особенностей полимеров состоит в том, что отдельные отрезки цепей (сегменты) могут перемещаться путем **поворота вокруг химической связи** и изменения угла.
- Такое смещение, в отличие от растяжения связей при упругой деформации истинно твердых тел, **не требует большой энергии** и происходит при невысокой температуре.

- Эти виды внутреннего движения — **смена конформаций**, несвойственные другим твердым телам, придают полимерам сходство с **жидкостями**.
- В то же время большая длина искривленных и спиралеобразных молекул, их ветвление и взаимная сшивка затрудняют смещение, вследствие чего полимер приобретает свойства **твердого тела**.

- Полимерам наряду с обычной упругой деформацией свойствен ее оригинальный вид — **высокоэластическая деформация**, которая становится преобладающей при повышении температуры.
- Например, мягкие резины можно растягивать до 300%, тогда как сталь разрывается уже при растяжении на 0,3%.

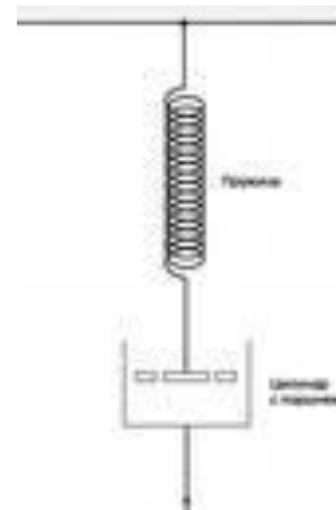
- Переход из высокоэластического состояния в **стеклообразное**, характеризующееся лишь **упругой деформацией**, называется *стеклованием*.
- Ниже температуры стеклования  $T_{ст}$  состояние полимера твердое, стекловидное, высокоупругое, выше — эластическое.

- Особенность полимеров состоит также в том, что их прочностные свойства зависят от времени, т. е. предельная деформация устанавливается не сразу после приложения нагрузки.
- Такая замедленная реакция их на механические напряжения объясняется инерционностью процесса смены конформаций.

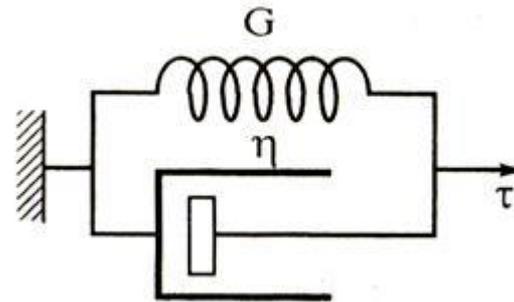
- В какой-то мере процессы, происходящие в полимерах, напоминают течение вязкой жидкости.
- Сочетание вязкого течения и высокой эластичности позволяет называть деформацию, характерную для полимеров, **вязкоупругой**.

- Упругие и вязкие свойства тел удобно моделировать.
- В качестве модели упругого тела (упругой деформации) используют **пружину**, малая деформация которой соответствует закону Гука.
- Моделью вязкого тела является **поршень с отверстиями**, движущийся в цилиндре с вязкой жидкостью.

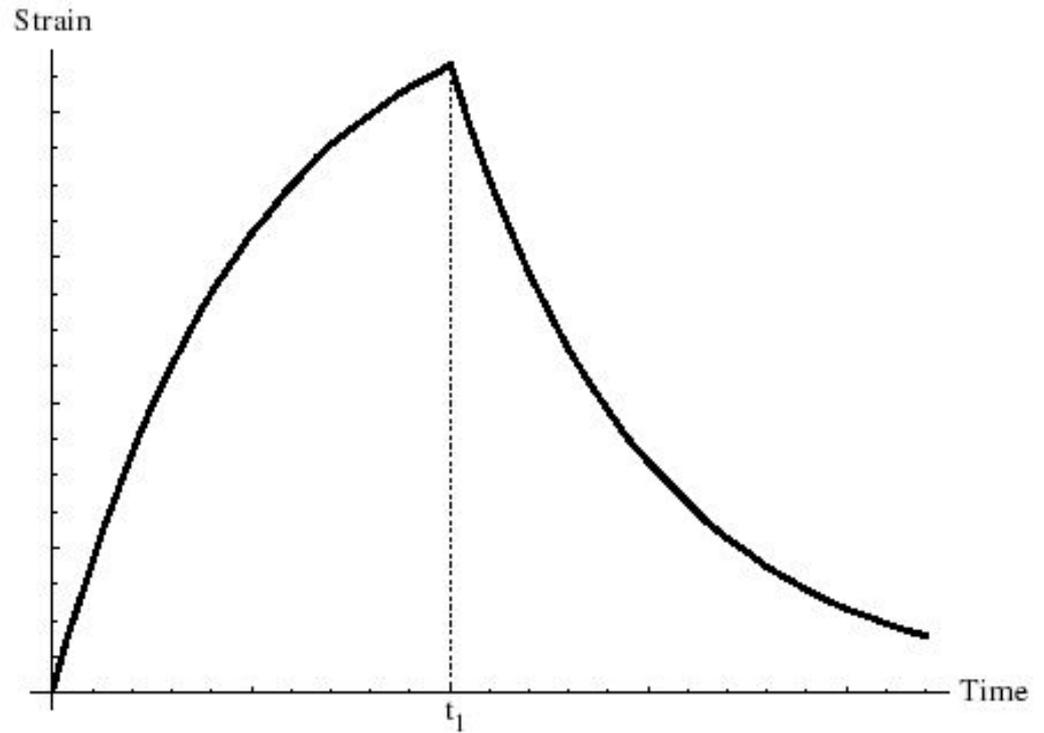
- **Вязкоупругие** свойства моделируются системами, состоящими из различных комбинаций двух простых моделей: **пружины и поршня**.
- Модель Максвелла:



Вязкоупругие  
свойства  
полимеров хорошо  
отражает модель  
Кельвина  
(параллельно  
соединенные  
пружина и  
поршень):



- В рамках модели Кельвина деформация экспоненциально возрастает со временем.
- При снятии нагрузки деформация начинает экспоненциально убывать.



- Моделирование механических свойств тел широко используется в **реологии**.
- **Реология** – это раздел физики, изучающий деформацию и текучесть вещества.
- **Биореология** исследует **течение** разнообразных биологических **жидкостей** (например, крови, синовиальной, плевральной и др.), **деформации** различных **тканей** (мышц, костей, кровеносных сосудов) у человека и животных.