

Физико-механические свойства сырья

4 з.е., зачёт с оценкой

ст. преп. каф. «Техника и технологии пищевых производств»

Гордеева Надежда Валерьевна

ЛИТЕРАТУРА ➔ <https://ntb.donstu.ru/>

► Основная:

- ❑ **Чистяков, И.Д.**
Физико-механические свойства сырья и готовой продукции пищевых производств : Учеб. пособие. Ч.1 : Физико-механ. свойства пищевых масс / И.Д. Чистяков; ДГТУ. - Ростов н/Д. : ИЦ ДГТУ, 1999. - 77 с. : ил. - ISBN 5-7890-0088-6 : 15-00.
664(075.8) - Ч-68
- ❑ **Чистяков, И.Д.**
Физико-механические свойства сырья и готовой продукции пищевых производств : Учеб. пособие. Ч.2 : Физико-механические свойства сырья и готовой продукции мукомольно-крупяного, масличного и комбикормового производства / И.Д. Чистяков; ДГТУ. - Ростов н/Д. : ИЦ ДГТУ, 2000. - 90 с. : ил. - ISBN 5-7890-0123-8 : 17-00.
664(075.8) - Ч-68
- ❑ **Чистяков, И.Д.**
Физико-механические свойства сырья и готовой продукции пищевых производств : Учеб. пособие. Ч.3 : Молекулярное строение, химический состав и структура пищевых материалов / И.Д. Чистяков; ДГТУ. - Ростов н/Д. : ИЦ ДГТУ, 2001. - 70 с. : ил. - ISBN 5-7890-0158-0 : 23-00.
664(075.8) - Ч-68

ЛИТЕРАТУРА ➔ <https://ntb.donstu.ru/>

► Дополнительная:

- ❑ **Мусина, О.Н.**
Реология [**Электронный ресурс**] : учебное пособие / О.Н. Мусина; О.Н. Мусина. - Москва|Берлин : Директ-Медиа, 2015. - 146 с. : ил. - Книга находится в ЭБС Университетская библиотека on-line. - Библиогр. в кн. - ISBN 978-5-4475-4615-1.
- ❑ **Арет, В.А.**
Реология и физико-механические свойства пищевых продуктов [**Электронный ресурс**] : учебное пособие / В.А. Арет, С.Д. Руднев; С.Д. Руднев; В.А. Арет. - Реология и физико-механические свойства пищевых продуктов ; 2021-04-16. - Санкт-Петербург : Интермедия, 2014. - 245 с. - Книга находится в базовой версии ЭБС IPRbooks. - ISBN 978-5-4383-0075-5.
- ❑ **Калошин, Ю.А.**
Физико-механические свойства сырья и готовой продукции : учеб. пособие для вузов / Ю.А. Калошин, Ю.М. Березовский, Л.В. Верняева; под ред. Ю.А. Калошина. - М. : ДеЛи принт, 2011. - 175 с. : ил. - Рек. УМО. - ISBN 978-5-94343-228-6 : 747-01. 664(075.8) - К 17
- ❑ **Арет, В.А.**
Физико-механические свойства сырья и готовой продукции : учеб. пособие / В.А. Арет, Б.Л. Николаев, Л.К. Николаев. - СПб. : ГИОРД, 2009. - 448 с. : ил. - Рек. УМО. - ISBN 978-5-98879-066-2 : 959-20. 665 - А 80

ВВЕДЕНИЕ

При проектировании машин и аппаратов необходимо учитывать важнейшие физические свойства пищевых продуктов. Для научно обоснованного учета этих свойств в различных областях техники и технологии пищевых производств необходима систематизация данных о физико-механических характеристиках продуктов

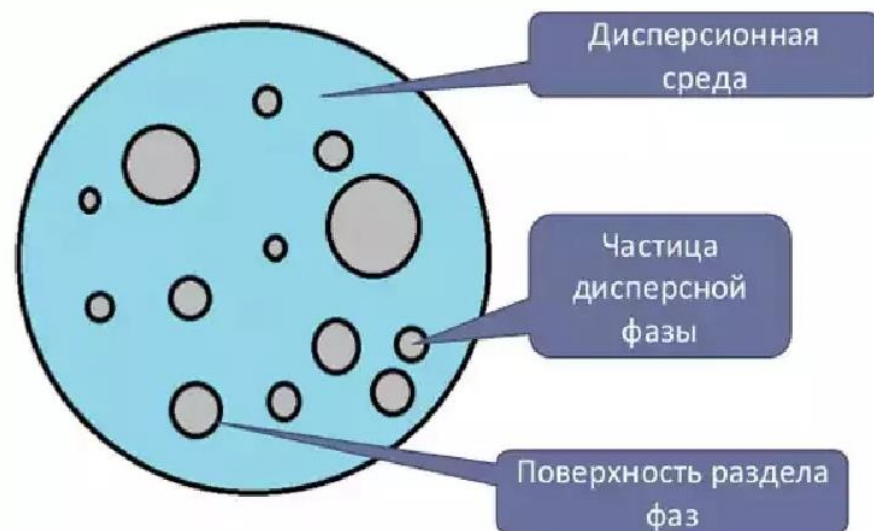
Основные *физико-механические свойства* можно классифицировать по характеру приложения к продукту внешних усилий и вызываемых ими деформациях:

- ❑ сдвиговые свойства проявляются при воздействии касательных усилий,
- ❑ компрессионные - при воздействии нормальных усилий
- ❑ поверхностные - при сдвиге или отрыве продукта от твердой поверхности

ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И ТЕЧЕНИЯ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ И СЫРЬЯ

Классическими объектами инженерной физико-химической механики являются *дисперсные системы*, состоящие из двух и более фаз.

В них дисперсионной средой является непрерывная фаза, дисперсной фазой - раздробленная фаза, состоящая из частиц, не контактирующих друг с другом.



Классификация пищевых дисперсных систем

Дисперсионная среда	Дисперсная фаза	Название системы	Примеры
Газ	Твердая	Пыль, дым, порошок	Сухой порошок (молоко, мука, какао) в воздухе
	Жидкая	Туман	Дисперсия молока в распылительной сушилке
	Газообразная	-	
Жидкость	Твердая	Суспензия	Фруктоовощные соки с мякотью, бульон, расплавленный жир с белковыми частицами, колбасный фарш, сырковая масса
	Жидкая	Эмульсия	Масло в воде, молоко при высоких температурах
	Газообразная	Пена	Крем, взбитые сливки
Твёрдое тело	Твердая	Твёрдая суспензия, сплав	Замороженная мышечная ткань
	Жидкая	Твёрдая эмульсия	Сливочное масло, нативная мышечная ткань
	Газообразная	Пористое тело	Сыр, взбитый и коагулированный меланж, кость

- ▶ При малой концентрации система является легкотекучей, жидкообразной и не имеет выраженных упруго-пластичных свойств.
- ▶ Таким образом, пищевые продукты в натуральном виде и в виде дисперсий имеют определенное строение, т. е. структуру, которая характеризуется видом связей между ее элементами и обуславливает проявление тех или иных физических свойств.

Структуры пищевых продуктов (по характеру связей между их элементами)

Коагуляционные структуры

- наличие контакта между частицами за счет сил Ван-дер-Ваальса
- контакт идёт через прослойку среды (поверхность раздела сохраняется)
- обладают способностью к самопроизвольному восстановлению после разрушения (тиксотропия)
- могут иметь твердо- и жидкообразное состояние

Конденсационно-кристаллизационные

- существует химическое взаимодействие между частицами
- частицы и прослойки среды представляют одну фазу (поверхность раздела фаз не сохраняется)
- могут образовываться из коагуляционных при удалении дисперсионной среды
- в процессе образования их прочность увеличивается
- являются необратимыми (не восстанавливаются после механического воздействия)

ФОРМА СВЯЗИ ВЛАГИ С СУХИМ ВЕЩЕСТВОМ ДС

ХИМИЧЕСКАЯ

обусловлена ионными или молекулярными взаимодействиями в точных количественных соотношениях

удаляется из продукта прокаливанием или в результате химических реакций

резко отличается по своим свойствам от свободной

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ

обусловлена адсорбцией влаги в гидратных оболочках или осмотическим удерживанием в клетках в нестрого определенных соотношениях

удаляется из материала испарением, десорбцией (адсорбционная) или вследствие разности концентраций (осмотическая)

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКАЯ

обусловлена удержанием влаги в ячейках структуры (иммобилизационная), в микро- и макрокапиллярах и прилипанием ее к поверхности частиц или тела (смачивание) в неопределенных соотношениях

удаляется из материала испарением или механическими способами (отжатие, центрифугирование и т.д.)

СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

(по виду приложения усилий)

Сдвиговые свойства

характеризуют поведение объема продукта при воздействии на него сдвиговых, касательных напряжений

Объемные свойства

определяют поведение объема продукта при воздействии на него нормальных напряжений в замкнутой форме или между двумя пластинами

Поверхностные свойства

характеризуют поведение поверхности продукта на границе раздела с другим, твердым материалом при воздействии нормальных (адгезия) и касательных (внешнее трение) напряжений

- ▶ Для решения многих задач связанных с механической переработкой различных пищевых продуктов, необходимо знать как ведут себя под нагрузками и при деформировании эти материалы.
- ▶ Изучением этих свойств занимается **инженерная реология.**
- ▶ Греческое rhios - течение, поток.
- ▶ Реология - это наука о деформации и течении различных тел.

Реология включает два раздела:

Теоретическая реология (феноменологическая реология или макрореология) может рассматриваться как часть механики сложных сред, она занимает промежуточное положение между гидромеханикой и теориями упругости, пластичности и ползучести. Аналитическим путем она устанавливает зависимости между действующими на тело механическими напряжениями, вызываемыми деформациями и их изменениями во времени. Основное внимание обращается на сложное релаксационное поведение вещества, например, когда одновременно проявляются вязкие и упругие свойства или вязкие и пластические свойства.

Экспериментальная реология (реометрия) рассматривает различные реологические свойства веществ с помощью специальных приборов и испытательных машин, определяет методы испытаний.

ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ ИНЖЕНЕРНОЙ РЕОЛОГИИ ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ

- Определение основных реологических характеристик пищевых материалов и установление их изменения от различных технологических факторов:
 - длительность механической обработки, температуры, влажности и др.
- Разработка методов и приборов для измерения реологических (структурно-механических) характеристик пищевых продуктов
- Разработка механических моделей для реальных пищевых продуктов
- Определение эталонных показателей реологических характеристик, установление связи реологических характеристик сырья и готовых продуктов
- Управление структурой и качеством продуктов
- Комплексное исследование различных физических характеристик для установления аналогии их изменения, для моделирования, прогнозирования, расчета и конструирования продуктов с заранее заданными технологическими показателями
- Разработка научно-обоснованных методов расчета оборудования

- ❑ нагнетание пищевых масс (хлебопекарное, бараночное и макаронное тесто, кондитерские массы, фарш, пасты и т.д.) различными рабочими органами (шнеками, валками, плунжерами, шестернями и т.д.);
- ❑ выпрессовывание масс через формующие отверстия матриц для придания изделиям необходимой формы, причем часто выдавливание производится одновременно через большое количество отверстий, и в этих случаях обеспечение равномерности скоростей истечения из всех отверстий по фронту матрицы является весьма важным;
- ❑ штампование упруго-пластично-вязких масс для придания изделиям требуемой формы или нанесения рельефного рисунка;
- ❑ транспортирование вязких и вязко-пластических масс по каналам различного профиля, длины и диаметра;
- ❑ смешивание двух или нескольких компонентов для получения однородных смесей;
- ❑ резание полуфабрикатов и готовых продуктов;
- ❑ дробление, сепарирование, брикетирование, штабелирование и некоторые другие процессы.

Классификация материалов пищевой промышленности

- ▶ Классификация реологических тел, предложенная Горбатовым А.В., по величине отношения предельного напряжения сдвига к их плотности и ускорению свободного падения $[\theta_0/(\rho \cdot g)]$, которое представляет собой меру способности вещества сохранять свою форму

$\theta_0/(\rho \cdot g), \text{м}$	Менее 0,005	0,005 – 0,02	0,02 – 0,15	Более 0,15
Наименование вещества	Структурные жидкости	Жидкие пасты	Густые пасты	Твёрдые тела

- ▶ Николаев предложил обобщённую классификацию (от твёрдого до истинно-вязкого состояния) по величине механических свойств: модулей упругости, вязкости и др.
- ▶ К первой группе относятся твёрдые и твёрдообразные тела (твёрдый жир, целые ткани мяса, сухари, печенье и пр.), ко второй – твёрдо-жидкие (мясной фарш, творог, студни, мучное тесто и пр.), к третьей – жидкообразные и жидкости (расплавленный жир, бульоны, молоко, мёд, вода и пр.).

Техническая классификация материалов

- ▶ **Жидкие тела (жидкости)** – материалы, содержащие одну фазу, обладают текучестью, принимают форму сосуда, являются конденсированными дисперсными системами, связанными преимущественно центральными Ван-дер-Ваальсовыми силами, основным свойством которых является вязкость – постоянная величина в изотермическом процессе. (1 - 3)
- ▶ **Жидкообразные тела** – материалы, проявляющие в изотермическом процессе в зависимости от деформационного состояния эффективную вязкость, зависящую от скорости деформации, пластичность, являются многофазными дисперсными системами с коагуляционной либо коагуляционно-кристаллизационной структурами, в которых действуют разнообразные по природе поверхностные силы, основными свойствами которых являются эффективная ньютоновская или пластическая вязкость и предельное напряжение сдвига (предел текучести). (4 - 7)

Техническая классификация материалов

- ▶ **Твердые тела** – объекты, длительное время сохраняющие свою форму при отсутствии физических или химических воздействий, являющиеся кристаллизационными либо конденсационно-кристаллизационными дисперсными системами, основным свойством которых является прочность, обусловленная преимущественно дисперсионными силами взаимодействия между частицами твёрдой фазы. (8 - 10)
- ▶ **Сыпучие материалы** – совокупность твёрдых тел, проявляющая специфические свойства, характерные как для жидкостей (текучесть и способность принимать форму сосуда), так и для твёрдых тел в условиях напряженного состояния, являющиеся дисперсными системами «твёрдое тело - газ», в которых определяющую роль играют поверхностные силы взаимодействия между частицами (отдельными твёрдыми телами), а также – соотношение веса частиц и сил поверхностного взаимодействия между ними.

№	Дисперсная система	Продукт (сырье, полуфабрикат)	Типичные реологические свойства
1	Чистая жидкость	Вода, спирт, масло	Ньютоновская вязкость
2	Чистый расплав	Расплавленные жиры (какао-масло), расплавленный сахар	Преимущественно ньютоновская вязкость
3	Истинный раствор	Солевые и сахарные растворы, экстракты, пиво, напитки	То же
4	Коллоидный раствор	Белковые растворы, мутные фруктовые и ягодные соки	Ньютоновская вязкость, возможны вязкоупругость, тиксотропия
5	Жидкообразная	Суспензии (какао, фруктовые и овощные соки, супы), эмульсии (молоко, сливки, майонез)	Ньютоновская и неньютоновская вязкость, тиксотропия, вязкоупругость
6	Пастообразная	Фруктовое пюре (яблочный мусс), ореховый мусс, творог, фарш	Неньютоновская вязкость, тиксотропия, реопексия, вязкоупругость
7	Связанная мягкая	Масло, пенная масса, желе, тесто, йогурт, суп, паштет, картофельное пюре	Пластичная вязкость, обратимая и необратимая тиксотропия, упругость, вязкоупругость
8	Связанная полутвердая	Мякиш хлеба, вареная колбаса, вареный картофель	Упругость, пластичная вязкость, вязкоупругость
9	Прочная	Свежие яблоки, груши, картофель, огурцы, мясо, хлебобулочные продукты длительного хранения, шоколад, конфеты	Упругость, пластичная вязкость, вязкоупругость
10	Твердая	Карамель, зерно, ядра орехов, макаронные изделия, морковь	Упругость, твёрдость, высокая текучесть и прочность, хрупкость

Основные понятия и определения реологии

- ▶ **Реология** - наука о деформации и течении различных тел
- ▶ **Деформация** - относительное смещение частиц материального тела, при котором не нарушается непрерывность самого тела

При деформации обычно происходит изменение формы или размеров
- ▶ **Основные реологические свойства материалов** - упругость, пластичность, вязкость и прочность

Термины и определения реологии

- ▶ Относительная деформация ε представляет собой отношение абсолютной Δl (м) к первоначальным размерам тела l (м), т.е.

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$$

- ▶ Деформации могут изменяться во времени γ (с) при неустановившемся процессе, при установившемся процессе деформирования изменение деформации в единицу времени постоянно.
- ▶ Все это описывается понятием «скорость деформации» $\dot{\gamma}$ (1/с)

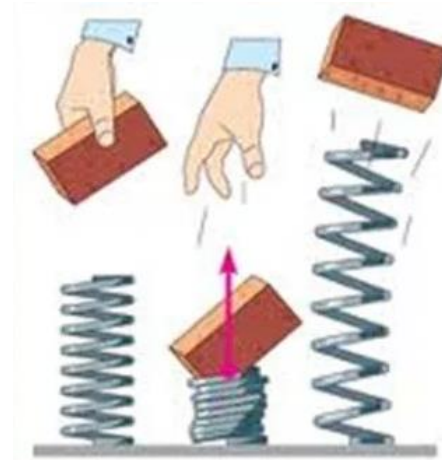
Термины и определения реологии



- ▶ Остаточные деформации, не сопровождающиеся разрушением материала, называются *пластическими*, а сами материалы - *пластичными*.

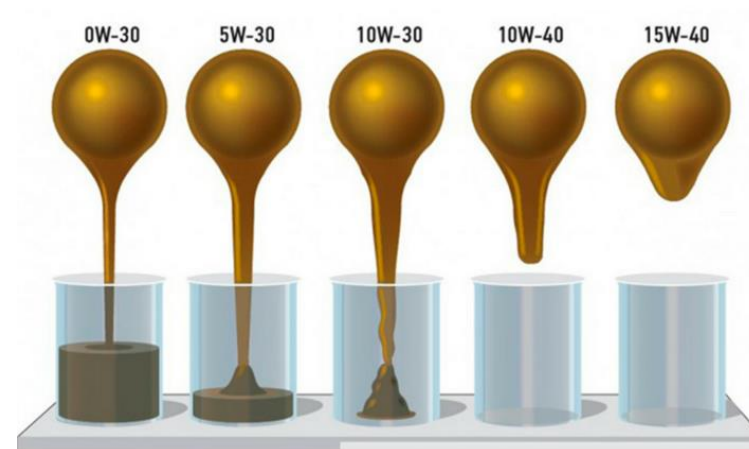
Термины и определения реологии

- ▶ **Упругость** - свойство практически мгновенно полностью восстанавливать первоначальные размеры при мгновенном снятии приложенной нагрузки (остаточные деформации отсутствуют).



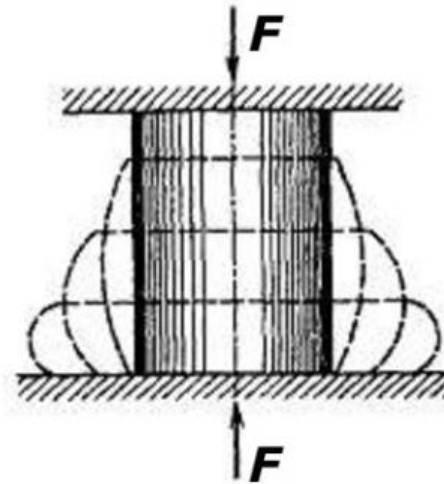
- ▶ **Вязкость** называется мера сопротивления течению жидкости; она равна отношению напряжения сдвига к скорости сдвига.

Текучность называется величина обратная вязкости



Термины и определения реологии

- ▶ **Пластичность** вызывается деформацией, т.е. относительным смещением частиц, при котором не нарушается непрерывность самого тела. Пластичность - это способность течь при напряжении выше критического, называемого пределом текучести, обнаруживая развивающиеся во времени остаточные деформации. При напряжении ниже критического, тело ведет себя как упругое.



Термины и определения реологии

- ▶ **Напряжение**. Под действием внешних сил происходит изменение формы и размеров тела. Все реальные тела деформируются. Величина и характер деформации зависят от свойств материала, его формы и приложения внешних сил. Деформация тела сопровождается возникновением внутренних сил взаимодействия между частицами тела. Мерой интенсивности внутренних сил является напряжение P .

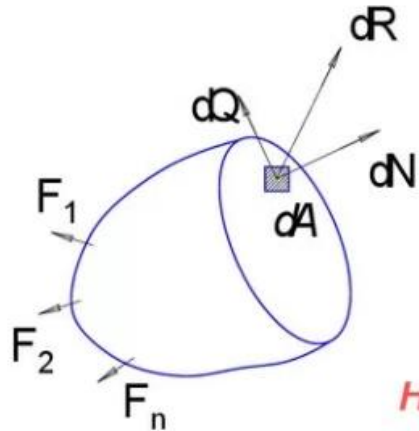
$$P = \lim_{\Delta F \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta F} \quad (1.1),$$

где ΔP - внутренняя сила;

ΔF - элементарная площадка

Из курса механики

Понятие напряжения

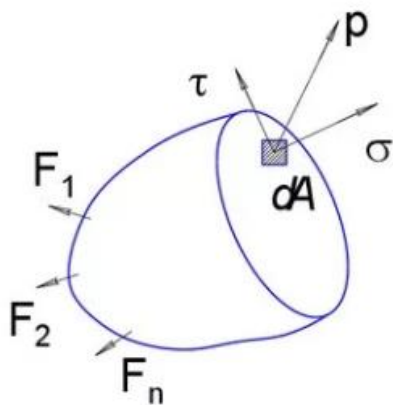


Полным механическим напряжением называют отношение равнодействующей внутренних сил dR действующей на малый элемент выбранного сечения к площади этого элемента dA .

$$p = \lim_{dA \rightarrow 0} \frac{dR}{dA}$$

Нормальным напряжением называется отношение нормальных сил dN действующих на малый элемент выбранного сечения к площади этого сечения dA :

$$\sigma = \lim_{dA \rightarrow 0} \frac{dN}{dA}$$



Касательным напряжением называется отношение касательных сил dQ действующих на малый элемент выбранного сечения к площади dA этого элемента.

$$\tau = \lim_{dA \rightarrow 0} \frac{dQ}{dA}$$

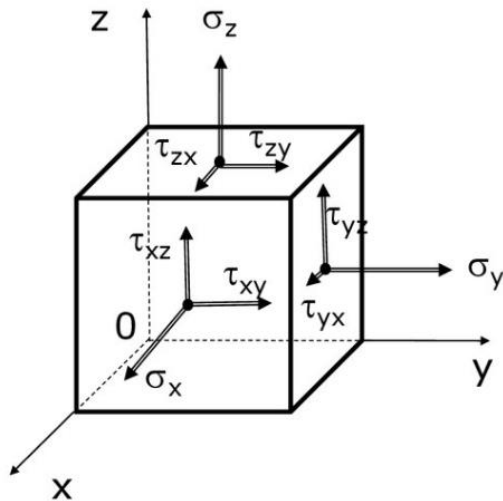
Нормальные σ и касательные τ напряжения являются составляющими полного напряжения p :

$$p = \sqrt{\sigma^2 + \tau^2}$$

Термины и определения реологии

Элемент в условиях объемного напряженного состояния может быть изображен в виде параллелепипеда

Проекция полного напряжения на нормаль называется нормальным напряжением - σ ; составляющая в плоскости сечения - касательным напряжением - τ .

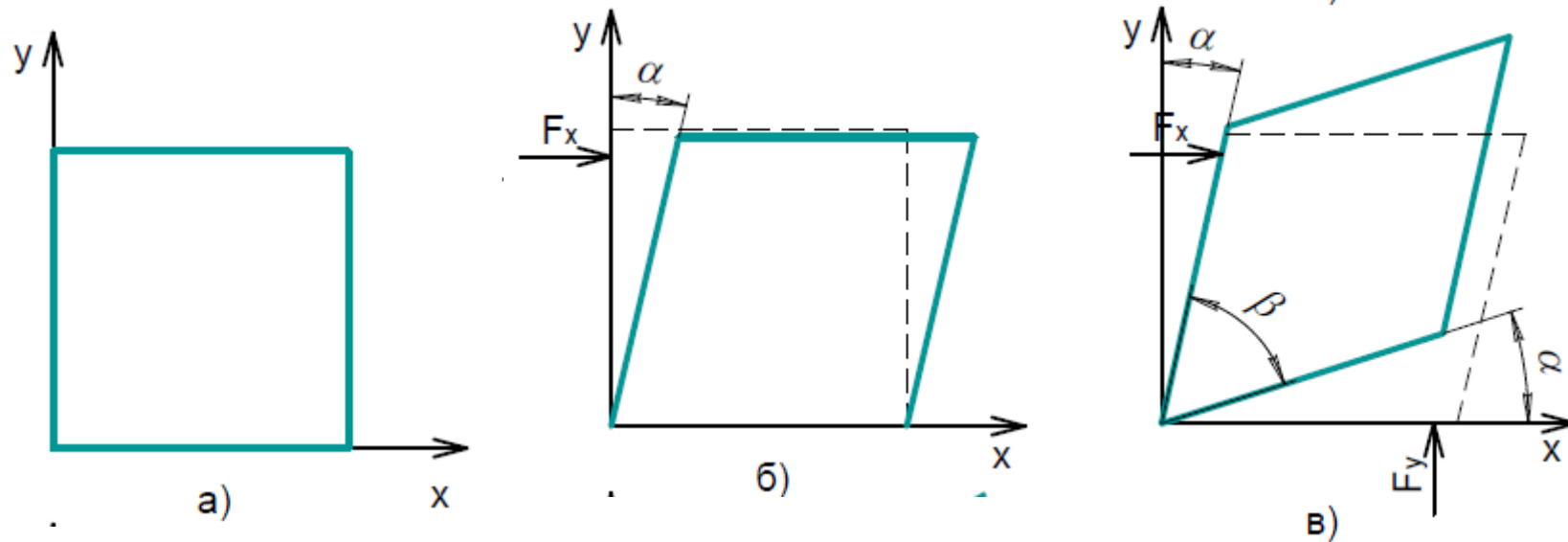


$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ - нормальные напряжения;

$\tau_{zx}, \tau_{xz}, \tau_{zy}, \tau_{yz}, \tau_{xy}, \tau_{yx}$ - касательные напряжения.

Термины и определения реологии

- ▶ **Напряжение сдвига** - сопротивление тела действию приложенной силы. Напряжение сдвига равно отношению приложенной силы к величине площади сдвига. Минимальная сила для осуществления сдвига определяется предельным напряжением сдвига τ_T . При сдвиге изменяется форма тела при постоянном объеме. Сдвиг получается от действия на гранях элемента касательных напряжений τ
- ▶ Виды сдвига: а) - исходное состояние, б) - простой сдвиг, в) - чистый сдвиг

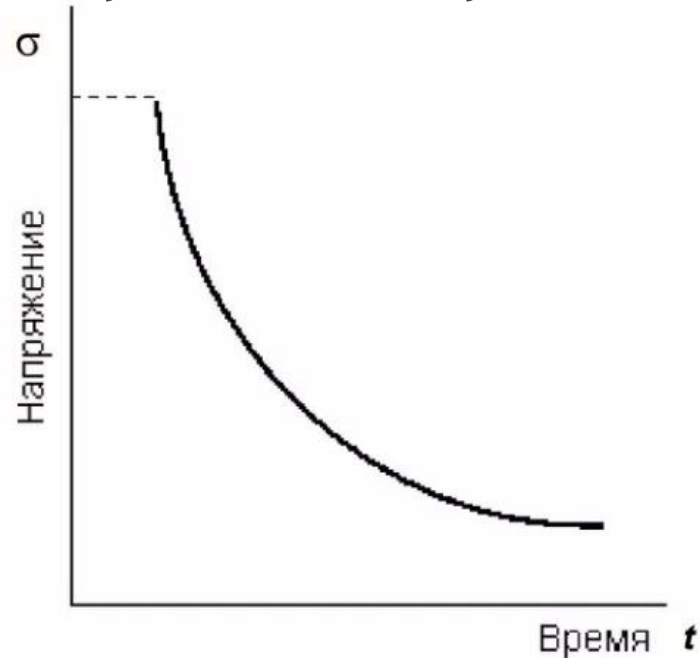


Термины и определения реологии

- ▶ При мгновенном воздействии любая вязкая жидкость ведет себя как твердое тело, а при медленных воздействиях она успевает релаксировать и ведет себя как жидкое тело. Это явление называется **фазовым переходом**.
- ▶ **Релаксация** [лат. relaxatio - ослабление, уменьшение] - самопроизвольное падение напряжений в теле, длительное время находящимся под нагрузкой. Эта величина определяется упругой частью общей деформации, которая достигается не сразу, а постепенно (в течение времени релаксации t).

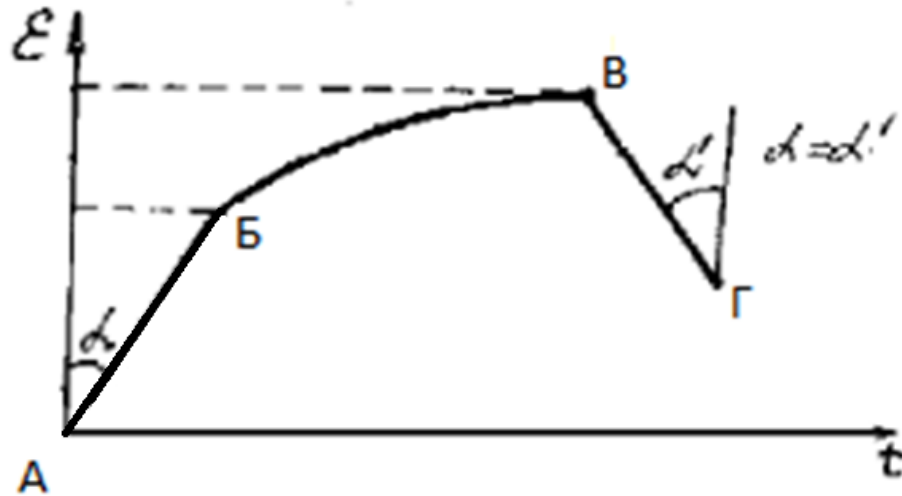
Термины и определения реологии

- ▶ Процесс релаксации можно представить как ползучесть, протекающую при уменьшении напряжений. Релаксация приводит к «закреплению» деформации, к постепенному превращению упругой деформации в остаточную пластическую



Кривая релаксации напряжений

Изменение деформации ε в течение времени t под действием нагрузки



- АБ - участок упругих деформаций при нагрузке;
- БВ - участок пластических деформаций;
- ВГ - участок восстановления упругих деформаций при нагрузке;
- В - точка снятия нагрузки.

- ▶ **Ползучесть** - постепенное нарастание во времени t суммарной деформации ε (участок БВ).
- ▶ **Упругое последствие или эластичность** - изменение упругой деформации во времени, когда она или постепенно нарастает до некоторого предела после приложения нагрузки (восстановление структуры), или постепенно уменьшается после ее снятия (разрушение структуры) (участки АБ и ВГ).

Моделирование реологического поведения тел

- ▶ Наглядное представление о характере изменения напряжений и деформаций среды в зависимости от вариаций, определяющих ее физико-механические свойства при механической воздействии, дают реологические модели.

Идеальные модели

- ▶ Моделью **идеально-упругого** твердого тела является пружина, или тело Гука. Соответствующей математической моделью является реологическое уравнение гуковского твердого тела для простого сдвига

G



$$\tau = G\gamma,$$

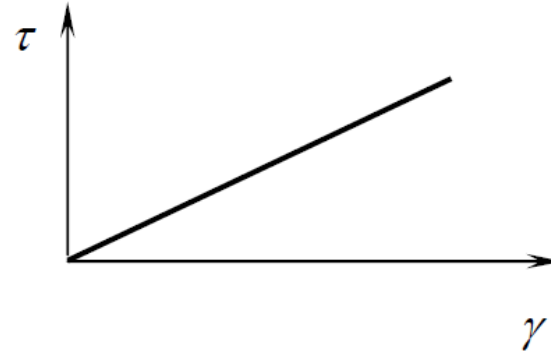
где G - модуль сдвига

- ▶ Для растяжения-сжатия

$$\sigma = E\varepsilon,$$

где E - модуль упругости

Реологической константой является модуль сдвига G . Напряжение, возникаемое в этом теле, прямопропорционально деформации

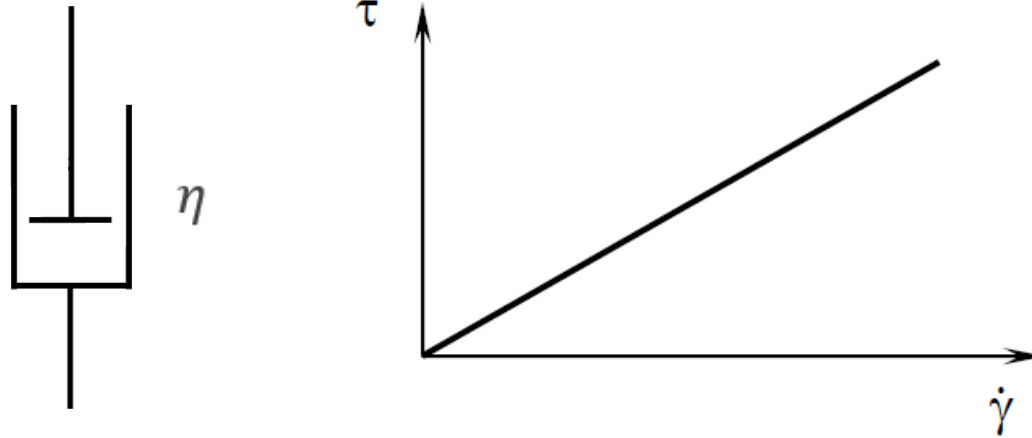


Идеальные модели

- ▶ Механической моделью **идеально вязкой** жидкости является гидравлический поршень, или тело Ньютона. Соответствующей математической моделью является реологическое уравнение состояния ньютоновского тела для простого сдвига

$$\tau = \eta \dot{\gamma}$$

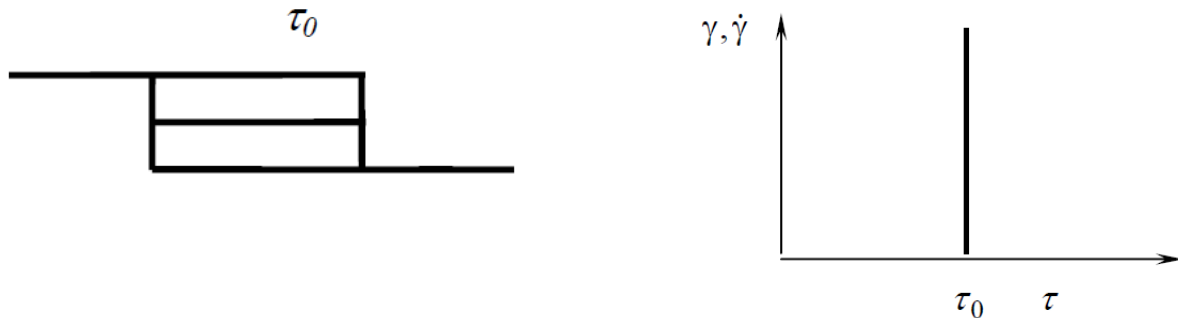
где η - вязкость



- ▶ Реологической константой является вязкость η . Напряжение, возникающее в этом теле, прямопропорционально скорости сдвига

Идеальные модели

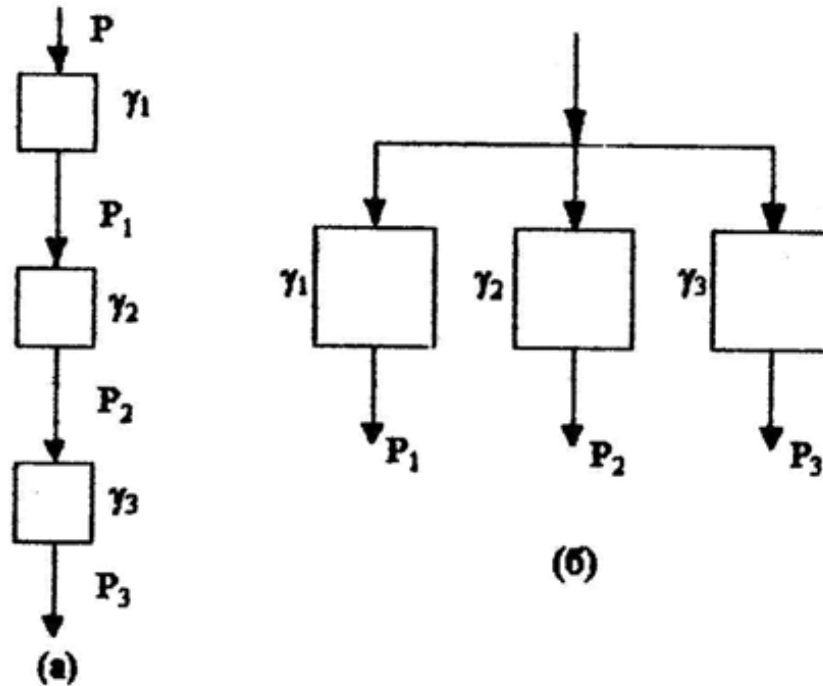
- ▶ Модель **идеальнопластичного** тела изображается в виде пары трения и определяется как тело Сен-Венана.
- ▶ Поведение его, под нагрузкой, следующее: до тех пор, пока величина приложенного к нему напряжения лежит ниже некоторого критического значения предельного напряжения сдвига σ_T (τ_T) (предела текучести), материал остается жестким; в тот момент, когда напряжение достигает предела текучести, начинается пластическое течение материала при постоянном напряжении (примером является пластилин).
- ▶ Модель идеально пластического тела Сен-Венана может быть представлена в виде элемента, лежащего на плоскости, с постоянным по величине трением. Тело не начинает двигаться до тех пор, пока напряжение сдвига не превысит предельного напряжения сдвига. После этого элемент может двигаться.



- ▶ Реологическое уравнение будет иметь вид: $\tau = \tau_0$

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТРУКТУРИРОВАННЫХ СИСТЕМ

- ▶ Многообразные реологические свойства реальных тел, в том числе и структурированных пищевых масс, можно моделировать с помощью различных сочетаний рассмотренных идеальных моделей. Сложные модели состоят из нескольких идеальных моделей (элементов), соединенных между собой последовательно или параллельно



Последовательное (а) и параллельное соединение элементов (б) реологических моделей

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТРУКТУРИРОВАННЫХ СИСТЕМ

- ▶ При последовательном соединении элементов полная нагрузка P приходится на каждый элемент, а полная деформация или ее скорость складываются из деформаций и скоростей составляющих элементов:

$$P = P_1 = P_2 = \dots = P_n$$

$$\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_1 + \dot{\gamma}_2 + \dots + \dot{\gamma}_n$$

$$\gamma = \gamma_1 + \gamma_2 + \dots + \gamma_n$$

- ▶ При параллельном соединении элементов деформации и их скорости одинаковы для всех элементов, а полная нагрузка P складывается из нагрузок отдельных элементов:

$$P = P_1 + P_2 + \dots + P_n$$

$$\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_1 = \dot{\gamma}_2 = \dots = \dot{\gamma}_n$$

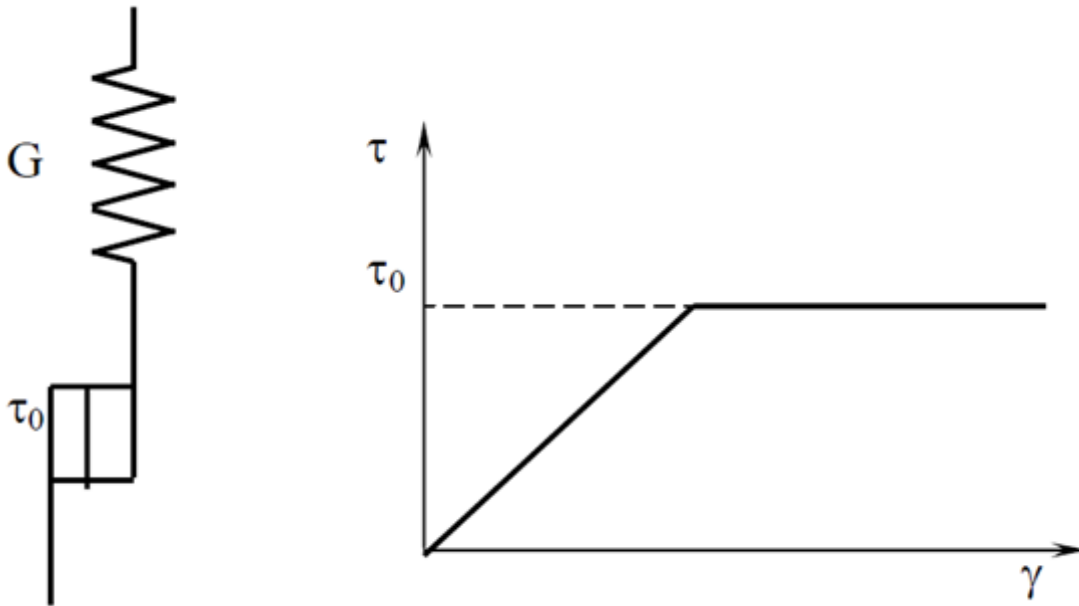
$$\gamma = \gamma_1 + \gamma_2 + \dots + \gamma_n$$

Сложные или составные модели

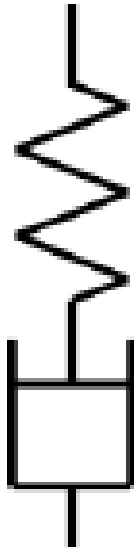
- Модель **упруго-пластического тела**, получается при последовательном соединении упругого элемента Гука и пластического элемента Сен-Венана.

При $\tau < \tau_0$ упругое состояние $\tau = G\gamma$

При $\tau = \tau_0$ пластическое течение



Модель Максвелла



- ▶ Модель **упруго-вязкого релаксирующего тела Максвелла** представляет собой последовательное соединение моделей Гуковского и ньютоновского тел.
- ▶ Из условия, что суммарная деформация γ равна сумме деформаций упругого γ_{Γ} и вязкого γ_{H} элементов, с учетом зависимостей

$$\gamma_{\text{M}} = \gamma_{\Gamma} + \gamma_{\text{H}}$$

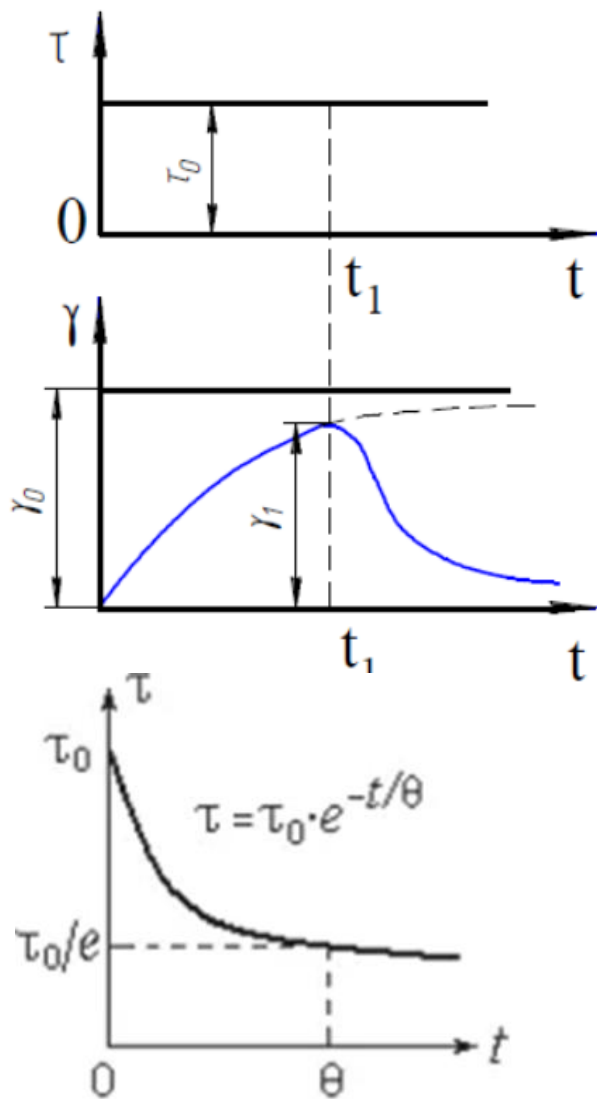
$$\tau_{\Gamma} = G\gamma_{\Gamma}, \text{ или, продифференцировав по времени, } \dot{\tau}_{\Gamma} = G\dot{\gamma}_{\Gamma}$$

$$\tau_{\text{H}} = \eta\dot{\gamma}_{\text{H}}$$

- ▶ При последовательном соединении напряжения равны в любом сечении системы, а деформации – складываются:

$$\dot{\gamma} = \frac{\dot{\tau}}{G} + \frac{\tau}{\eta}$$

Модель Максвелла



► Для этой модели характерны два явления: ползучесть и релаксация напряжений.

► 1) Ползучесть, $\tau = const$

Интегрируем это уравнение при нулевых начальных условиях, получаем:

$$\gamma = \frac{\tau}{\eta} t$$

► 2) Релаксация, $\gamma = const$

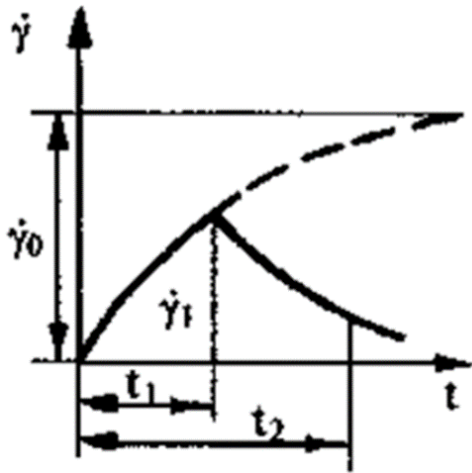
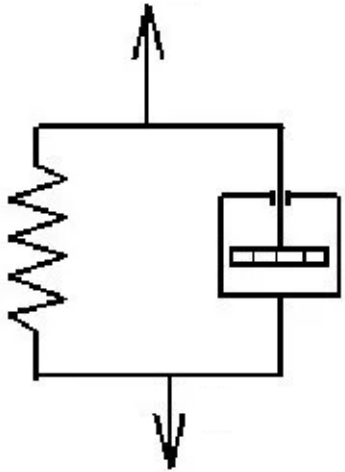
$$\frac{\dot{\tau}}{G} + \frac{\tau}{\eta} = 0$$

► Решив это уравнение, получим

$$\tau = \tau_0 e^{-\frac{t}{\theta}},$$

$\theta = \frac{\eta}{G}$ - период релаксации (время, за которое напряжение падает в 2,7 раз)

Модель Фойгта-Кельвина



- ▶ **Тело Кельвина или Фойгта** (упругое последствие) получается при параллельном соединении упругого и вязкого элементов. В этом случае суммарное напряжение равно сумме напряжений τ_y и τ_B , и деформация упругого элемента равна деформации вязкого элемента

$$\tau = G\gamma + \eta\dot{\gamma}$$

- ▶ При $\tau = const$, т.е. $\gamma_0 = 0$:

$$\gamma = \frac{\tau}{G} \left(1 - e^{-\frac{Gt}{\eta}}\right) - \text{кривая ползучести}$$

Величина $G/\eta = t_2$ характеризует скорость затухания деформации и может быть названа *коэффициентом затухания*

- ▶ Если в течение времени $t=t_1$, снять нагрузку, которая была приложена при $t=0$, то в решении дифференциального уравнения при $t>t_1$ следует принять $\tau=0$, тогда получим

$$\gamma = \frac{\gamma_0}{e^{\frac{-Gt}{\eta}}}$$

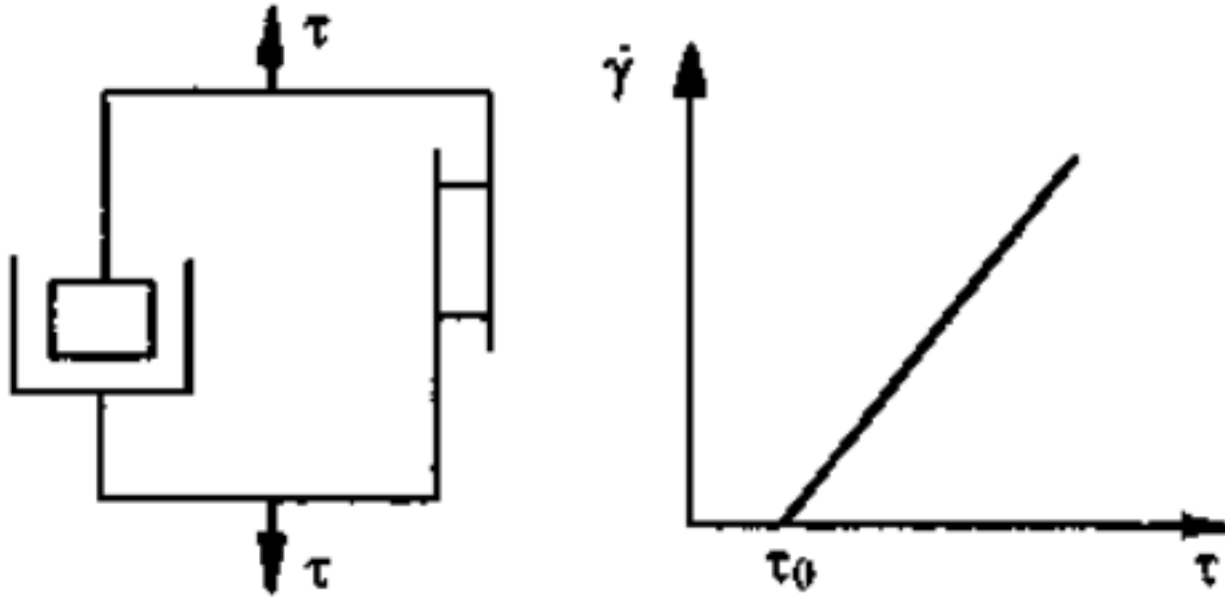
Постепенное нарастание деформации при постоянной нагрузке, характеризующейся первой ветвью кривой или последовательное уменьшение деформации после снятия нагрузки, называется упругим последствием или эластичностью

Тело Шведова - Бингама



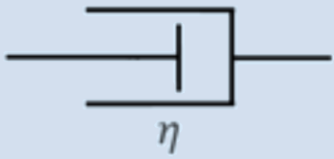
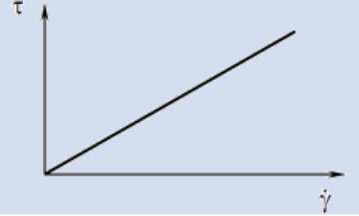
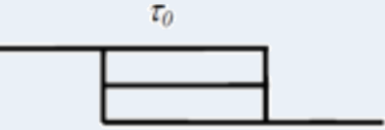

- ▶ Пример **вязкопластичного** тела, сочетающего свойства вязкости и пластичности


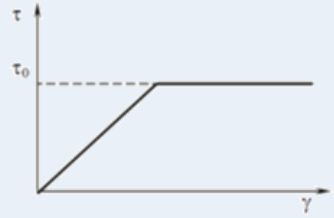

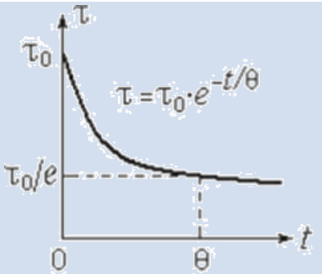
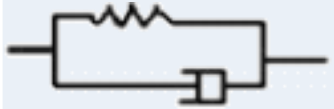
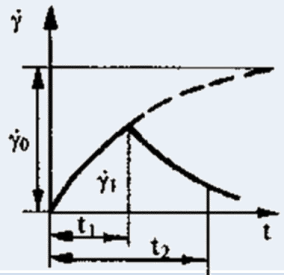
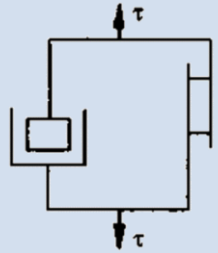
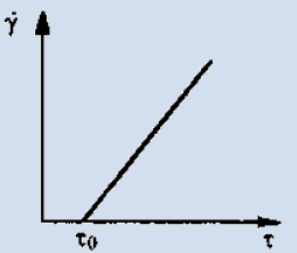
Прикладываем напряжение - нет течения даже с малой скоростью.
Увеличиваем напряжение - все еще нет. И вот, по достижении определенной величины τ_0 начинается вязкое течение с каким-то значением вязкости, называемое в данном случае пластической вязкостью $\mu_{пл}$.

$$\tau = \tau_0 + \mu_{пл} \dot{\gamma}$$



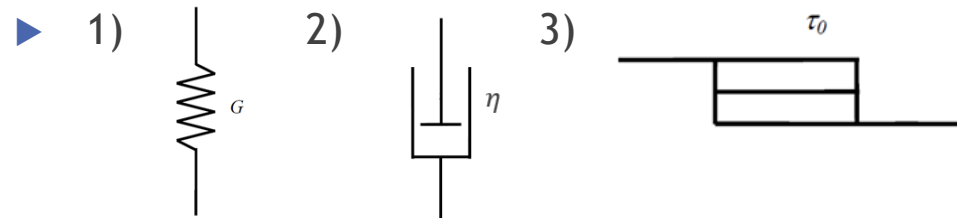
Классификация реологических моделей пищевых сред

№	Символ	Механическая модель	Реологическая кривая (график течения)	Математическая модель	Примечание
1. Идеальные тела					
1	H			$\tau = G\gamma$ или $\sigma = E\varepsilon$	Модель твёрдого тела Гука, упругое тело
2	N			$\tau = \eta\dot{\gamma}$	Модель идеально вязкой жидкости Ньютона
3	StV			$\tau = \tau_0$	Модель идеально пластического тела Сен-Венана

№	Символьная формула	Механическая модель	Реологическая кривая (график течения)	Математическая модель	Примечание
2. Сложные (составные модели)					
1	$U=G-StV$			при $\tau < \tau_0$ упругое состояние, при $\tau = \tau_0$ пластическое течение	Модель упруго-пластического тела
2	$M=N-H$			$\dot{\gamma} = \frac{\dot{\tau}}{G} + \frac{\tau}{\eta}$	Модель Масквелла
3	$K=HIN$			$\tau = G\gamma + \eta\dot{\gamma}$	Модель Кельвина - Фойгта
4	$SchwB=NISTV$			$\tau = \tau_0 + \mu_{пл}\dot{\gamma}$	Модель Шведова - Бингама

Задачи

► Для модели, состоящей из трёх элементов:



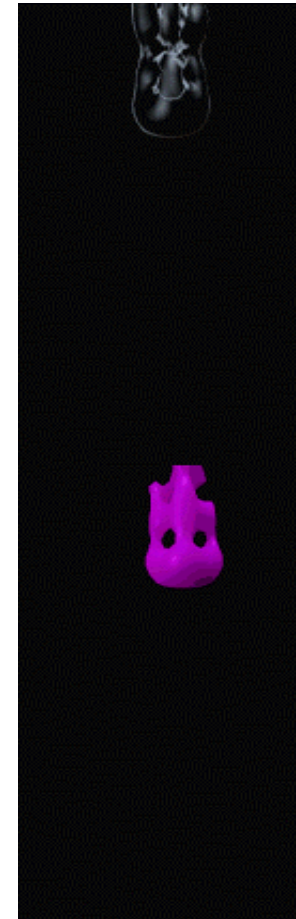
► Определить вид соединения элементов (последовательное или параллельное) суммарное напряжение деформации и деформацию при различном соединении элементов трех моделей. Изобразить схематически соединения элементов с указанием численных значений γ , τ

Номер задачи	№ модели	Деформация, γ	Напряжение деформации, τ
1	1	0,03	0,8
	2	0,03	0,9
	3	0,03	1,1
2	1	0,06	0,08
	2	0,06	1,0
	3	0,06	1,1
3	1	0,09	0,9
	2	0,1	0,9
	3	0,2	0,9
4	1	0,09	0,8
	2	0,09	1,0
	3	0,09	2,3
5	1	0,1	0,8
	2	0,1	1,1
	3	0,1	3,4

Вязкость

* мера сопротивления течению жидкости

- Поведение жидкости с малой вязкостью
- Поведение жидкости с большой вязкостью



Вязкость



Динамическая вязкость

*коэффициент внутреннего трения

- ▶ Единицей измерения этой вязкости является паскаль в секунду (Па*с). Физический смысл состоит в снижении давления в единицу времени. Динамическая вязкость характеризует сопротивление жидкости (или газа) смещению одного слоя относительно другого

$$\eta = \frac{F_{\text{тр}}}{Sv}, [\text{Па} * \text{с}]$$

- ▶ Динамическая вязкость зависит от температуры. Она уменьшается при повышении температуры и увеличивается при повышении давления.

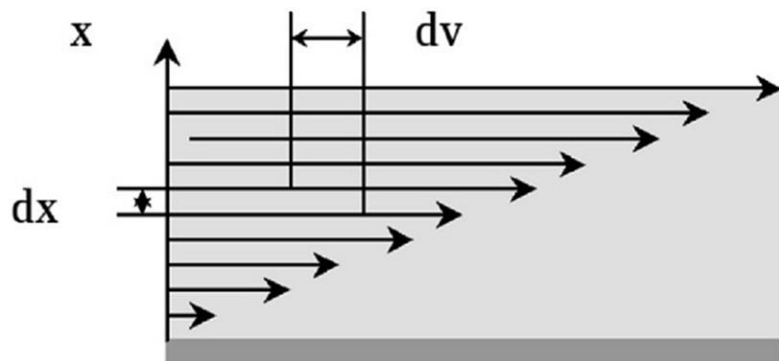


Таблица вязкости воды

Температура, °C	η , 10^{-6} ПА*с
0	1797
10	1307
20	1004
30	803
40	655
50	551
...
100	284
110	256
120	232
130	212
140	196
150	184

Таблица вязкости продуктов для подбора насоса

Наименование жидкости	Температура, °C	Вязкость, мПа*с
Вода	20	1
Алкоголь	20	1,2
Молоко	20	3
Сок	20	55-75
Мёд	40	2.500
Фруктовые концентраты	20	1.600
Джем	20	8.500
Глюкоза	35	20.000
Растительное масло	20	2.000
Шоколад	50	17.000
Кетчуп	20	1.500
Йогурт	40	152
Томатная паста	20	4.000
Глицерин	20	1.500

Кинематическая вязкость

- Индекс, который отображает отношение абсолютного показателя вещества к его плотности при установленной температуре

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}, [\text{м}^2/\text{с}]$$

t°	$\nu, \text{м}^2/\text{с}^2$	t°	$\nu, \text{м}^2/\text{с}^2$
4	0,015676	17	0,010888
8	0,013873	18	0,010617
12	0,012396	19	0,010356
14	0,011756	20	0,010105
16	0,011177	22	0,009892

Виды жидкостей

Существует четыре класса жидкостей, которые меняют свою вязкость при перемешивании, и один, который не меняет своих свойств:

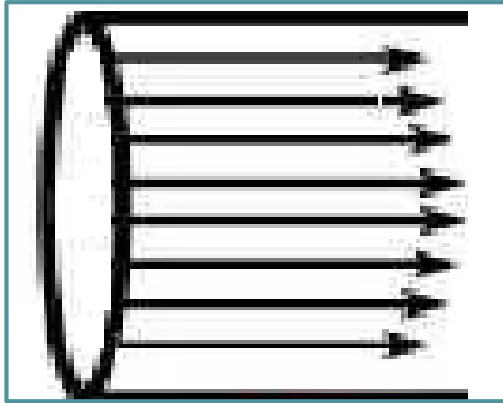
- **линейно-вязкие (Ньютоновские) жидкости** не зависят от амплитуды и типа движения, которому они подвергаются. Типичные для этого класса жидкости - минеральное масло и вода;
- **дилатантные (вязкость растёт, с ростом скорости сдвига) жидкости** повышают вязкость при перемешивании, некоторые из этих жидкостей могут стать почти твёрдыми внутри насоса или трубопровода. Всем известно, что при перемешивании сливки превращаются в масло. Кондитерские смеси, глинистые массы и прочие сильно заполненные жидкости делают то же самое.
- **пластичная жидкость** имеет предел текучести, который должен быть превышен до начала движения потока. С этого момента по мере помешивания вязкость будет уменьшаться. Томатный кетчуп - лучший пример такой жидкости;
- **псевдопластичная жидкость** показывает снижение вязкости с увеличением перемешивания, но у неё нет предела текучести, в эту категорию попадают многие эмульсии;
- **тиксотропные жидкости** проявляют уменьшающуюся вязкость с увеличением перемешивания, но вязкость, при любой определенной скорости движения, может зависеть от предыдущего перемешивания жидкости. Примерами тиксотропной жидкости являются: клей, некапельная краска, смазка, соединения целлюлозы, мыло, крахмалы и смола.

Течение жидкости в трубе.

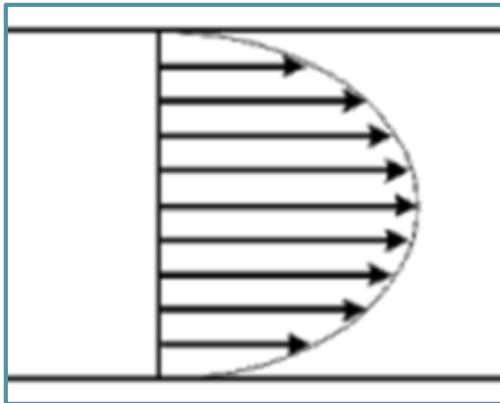
Ламинарное течение жидкости

- ▶ Если жидкость как бы разделяется на слои, которые скользят друг относительно друга, не перемешиваясь, такое течение называют **ламинарным** (слоистым).
- ▶ Если в ламинарный поток ввести подкрашенную струйку, то она сохраняется, не размываясь, на всей длине потока, так как частицы жидкости в ламинарном потоке не переходят из одного слоя в другой. Ламинарное течение стационарно

Признаки ламинарного течения



скорости в каждом сечении трубы
параллельны друг другу;

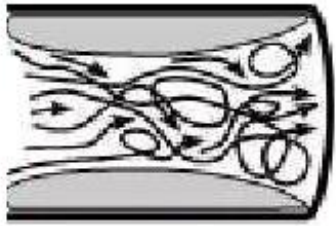


скорости частиц жидкости меняются от
твердых границ внутрь потока по
параболическому закону;

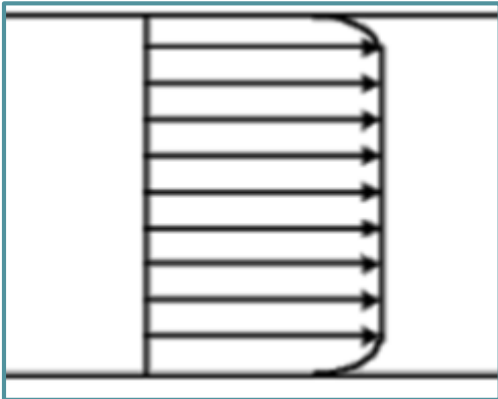
Турбулентное течение

- ▶ При увеличении скорости или поперечных размеров потока характер течения существенным образом изменяется. Возникает энергичное перемешивание жидкости. Такое течение называется *турбулентным*. При турбулентном течении скорость частиц в каждом данном месте все время изменяется беспорядочным образом – течение нестационарно
- ▶ Если в турбулентный поток ввести окрашенную струйку, то уже на небольшом расстоянии от места ее введения окрашенная жидкость равномерно распределяется по всему сечению потока

Признаки турбулентного (вихревого) течения



хаотическое, крайне
нерегулярное,
неупорядоченное течение
жидкости



средняя скорость частиц
жидкости резко возрастает в
пограничном слое и почти не
меняется вдали от границ
потока

Число Рейнольдса

- ▶ Английский механик, физик и инженер Оскар Рейнольдс установил (1876 — 1883 гг.), что характер течения зависит от величины, не имеющей размерностью, и называемой числом Re

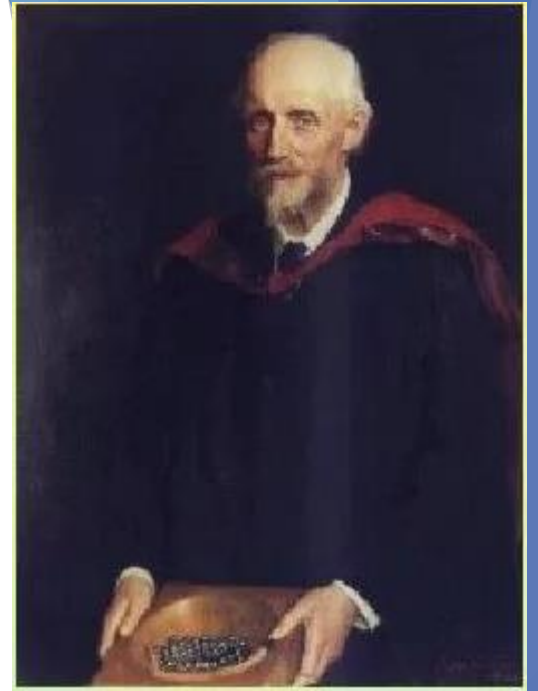
$$R_e = \frac{\rho \cdot v \cdot d}{\eta}$$

ρ - плотность жидкости

v - скорость её течения

d - диаметр трубы

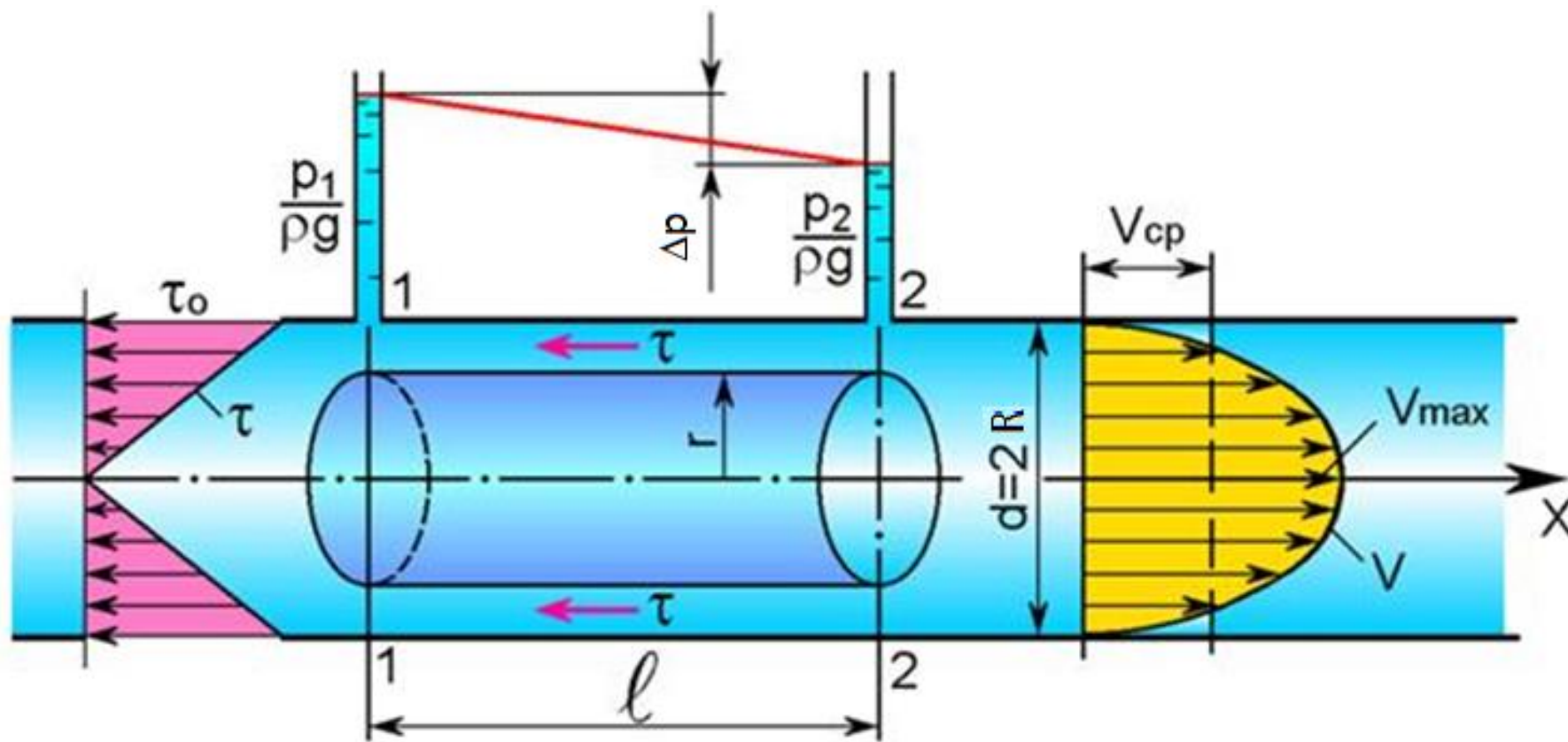
η - коэффициент абсолютной (динамической) вязкости



Значение, при котором происходит переход ламинарного течения в турбулентное (для гладких цилиндрических труб)

$$Re_{кр} \approx 2300$$

Модель вязкого поведения жидкости



Вывод формулы Пуазейля

Рассматривая ламинарный изотермический стационарный осесимметричный поток среды в трубе, легко по уравнению равновесия определить напряжение сдвига в любом коаксиальном слое трубы:

$$(p_2 - p_1)\pi r^2 - 2\pi r L \tau = 0$$

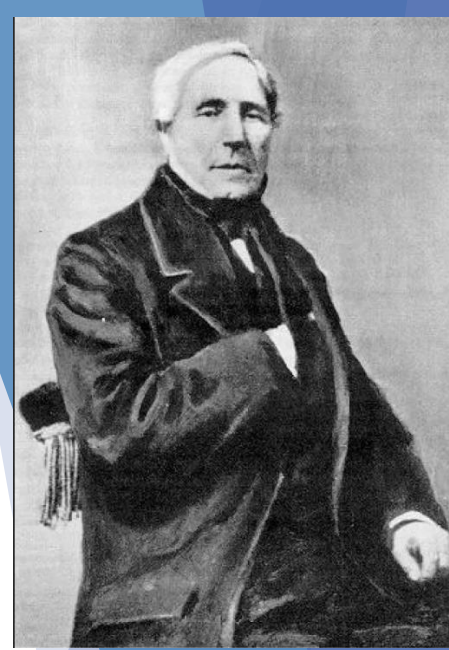
$$\text{и } \tau = \frac{\Delta p r}{2L}; \quad \Delta p = p_2 - p_1$$

где τ – напряжение сдвига на цилиндрической поверхности участка потока;

r – радиус мысленно вырезанного цилиндрического осесимметричного участка потока, равновесие которого рассматривается;

L – расстояние между поперечными сечениями трубы;

p_1, p_2 – давление в начальном и конечном поперечных сечениях трубы.



Вывод формулы Пуазейля

- ▶ Из уравнения Ньютона

$$r \frac{\Delta P}{2l} = \eta \gamma' = \eta \frac{dV}{dr}$$

где V - скорость течения жидкости;

η - вязкость.

- ▶ Интегрируя

$$dV = \frac{\Delta P}{2l\eta} r dr$$

- ▶ получим

$$V = \frac{\Delta P}{2l\eta} r^2 + 1$$

Вывод формулы Пуазейля

- ▶ Постоянную интегрирования находят из условия $r = R \Rightarrow V = 0$, тогда:

$$V = \frac{\Delta P}{4l\eta} (R^2 - r^2)$$

где R - радиус капилляра

- ▶ Распределение скорости будет параболическим. Расход Q может быть получен интегрированием уравнения:

$$Q = \int_F V dF$$

где $dF = 2\pi r dr$ - элемент площади.

$$Q = \frac{\Delta P R^4 \pi}{8 L \eta}$$

Ламинарное течение жидкости Бингама - Шведова

$$\tau = \tau_T - \eta_{\text{пл}} \gamma'$$

где $\eta_{\text{пл}}$ - вязкость пластично-вязкого тела Бингама - Шведова.

- ▶ Представляя $\tau = r\Delta P/2L$ и $\gamma = dV/dr$, получим:

$$\frac{\eta_{\text{пл}} dV}{dr} = \frac{\Delta P r}{2L} - \tau_T$$

- ▶ Интегрирование дает

$$\eta_{\text{пл}} V = \frac{\Delta P r^2}{4L} - \tau_T r + C$$

- ▶ Постоянную C определяем из условия прилипания материала к стенке цилиндра при $r=R$, $V=0$

$$C = -\frac{\Delta P R^2}{4L} + \tau_T R$$

Ламинарное течение жидкости Бингама - Шведова

- ▶ Отбрасывая знак минус, получим

$$N = \frac{1}{\eta_{\text{м}}} \left[(R^2 - r^2) \frac{\Delta P}{4L} - \tau_T (R - r) \right]$$

- ▶ Из исходного уравнения видно, что при $\Delta P r_0 / 2L = \tau_T$ (производная скорости равна нулю), $dV/dr = 0$. Это указывает на то, что при $r \leq r_0$ есть движение с постоянной скоростью, но течение отсутствует, т.е. нет относительного смещения слоев. Это говорит о том, что около оси тело будет двигаться как жесткое, и, где $\tau \leq \tau_T$, при этом радиус жесткого ядра R_0 определяется уравнением:

$$R_0 = \frac{2 L \tau_T}{\Delta P}$$

Ламинарное течение жидкости Бингама - Шведова

- ▶ Скорость V_0 жесткого цилиндра находится подстановкой r_0 вместо r и $\tau_T = \Delta P r_0 / 2L$

$$V_0 = \frac{\Delta P (R - r_0)^2}{4 L \eta_{\text{м}}}$$

- ▶ Расход Q может быть выяснен как сумма двух расходов; в центральной зоне со скоростью V_0 и в остальной части сечения с переменной скоростью V расход равен:

$$Q = \pi r_0^2 V_0 + \int_{r_0}^R 2 \pi r V dr$$

Ламинарное течение жидкости Бингама - Шведова

- ▶ после подстановки выражений V_0 , V , r и интегрирования, находим

$$Q = \frac{\pi R^4 \Delta P}{8L \eta_{\text{мт}}} \left[1 - \frac{8 \tau_T L}{3 R \Delta P} + \frac{16}{3} \left(\frac{\tau_T L}{R \Delta P} \right)^4 \right]$$

Уравнение Букингема - Рейнера

АДГЕЗИЯ, АУТОГЕЗИЯ И КОГЕЗИЯ ПИЩЕВЫХ МАСС

- ▶ *Адгезией*, или прилипанием, называют явление, которое возникает при контакте двух разнородных тел. Этот контакт происходит на границе раздела фаз. Адгезия относится к поверхностным явлениям. Она характеризует связь между двумя телами; для нарушения этой связи необходимо внешнее воздействие. Адгезия возникает при контакте двух твердых тел, а также при контакте жидкостей с твердыми телами. Она определяет связь пищевых масс с поверхностями технологического оборудования (емкости, транспортеры, трубопроводы, арматура и т. д.) и выступает как сопутствующее явление по отношению практически ко всем пищевым массам.
- ▶ С учетом методов оценки и особенностей различных видов адгезии, способов определения величины адгезии и свойств пищевых масс нам представляется целесообразным различать адгезию сыпучих, упруго-пластических и жидких продуктов

Классификация пищевых масс с учетом особенностей их адгезии

Пищевые массы	Граница фаз	Площадь контакта	Родственные явления	Представители
Жидкие (рис.1.1)	$J - T_2$	Сплошная	Когезия	Масло растительное, винно-водочные изделия, безалкогольные напитки, соки, молоко, пищевые эмульсии (майонез), растворы, жидкие добавки
Упруго-пластические (рис.1.2)	$T_1 - T_2$	»	»	Тесто, конфетные массы, кремы, пасты, мясо и мясные изделия, рыба и рыбные изделия, творог, сливочное масло, сыр, маргарин, джемы, варенье, овощи, фрукты
Сыпучие (рис.1.3.)	$T_1 - T_2$	Прерывистая	Аутогезия	Мука, крупа, сахар, крахмал, соль, кофе, чай, какао, яичный порошок, сухое молоко, детское питание
В виде пленок (рис.1.4)	$T_1 - T_2$	Сплошная	Когезия	Сыр, колбасные изделия, молочные продукты и др.

- ▶ Адгезия жидкости осуществляется на границе раздела с твердым телом. Жидкость может находиться в емкости, образовывать на твердой поверхности капли или пленки. При любом контакте жидкости с твердой поверхностью возникает адгезия, но не во всех случаях она будет определять поведение жидкости на границе раздела фаз. Особенности этого вида адгезии обусловлены способностью жидкости копировать рельеф твердой поверхности и образовывать довольно значительную площадь контакта

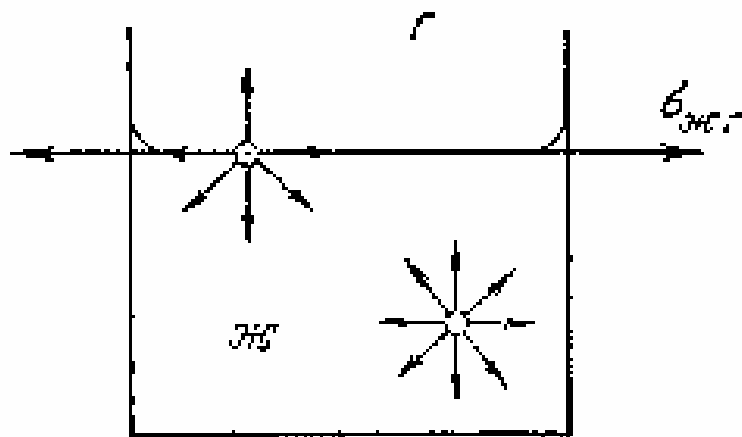
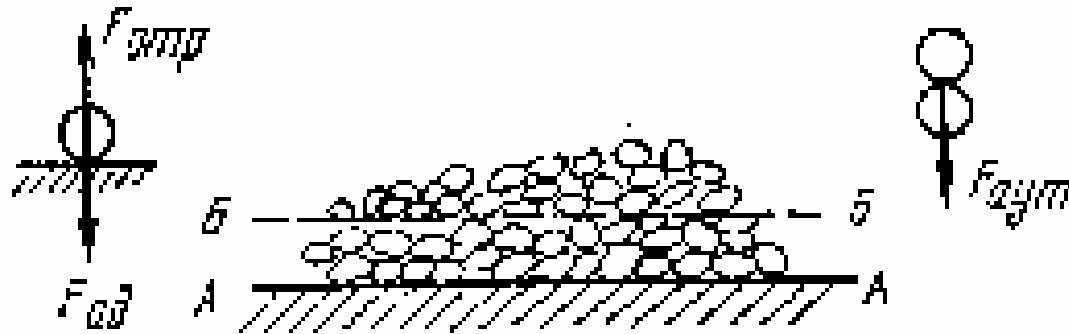


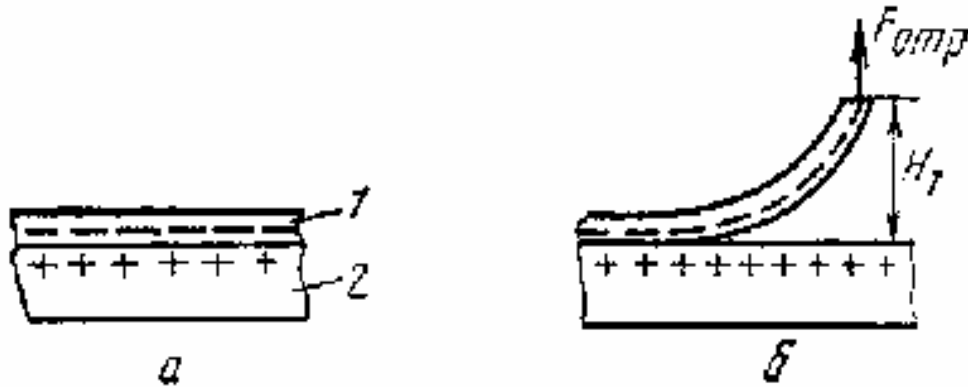
Схема образования поверхностного натяжения жидкости

- ▶ Адгезия упруго-пластических пищевых масс реализуется на границе раздела двух твердых тел. Упруго-пластические тела обладают аномальной вязкостью. Вязкость подобных тел изменяется в зависимости от напряжения сдвига, свойств массы и других факторов. Причина непостоянства вязкости заключается в особенностях структуры упруго-пластических тел.
- ▶ Упругопластические пищевые массы, как и жидкие, образуют на гладких твердых поверхностях сплошную площадь контакта. Для формирования площади контакта этих масс в отличие от жидкости потребуется более значительное время. Кроме того, упругопластические массы не растекаются по поверхности, сохраняя при этом довольно компактную форму.

- ▶ Адгезия сыпучих пищевых масс осуществляется по границе раздела двух твердых тел. Сыпучие материалы, как и вязкопластические, способны противодействовать внешнему давлению. Они могут течь, но течение этих материалов существенно отличается от такового сплошных тел, к которым относятся жидкости и упругопластические тела. Частицы, составляющие сыпучие тела, перемещаются друг относительно друга. В отличие от жидкости и упругопластических тел сыпучие пищевые массы не имеют сплошной площади контакта с твердой поверхностью. Площадь контакта реализуется по отношению к частицам, составляющим сыпучий материал.



- ▶ Есть еще один вид адгезии, который связан как с технологией получения некоторых пищевых продуктов, так и с борьбой против повышенной адгезии пищевых масс. Речь идет об адгезии пленок. Прилипшую пленку обычно называют адгезивом, а основу, к которой она прилипла, - субстратом.

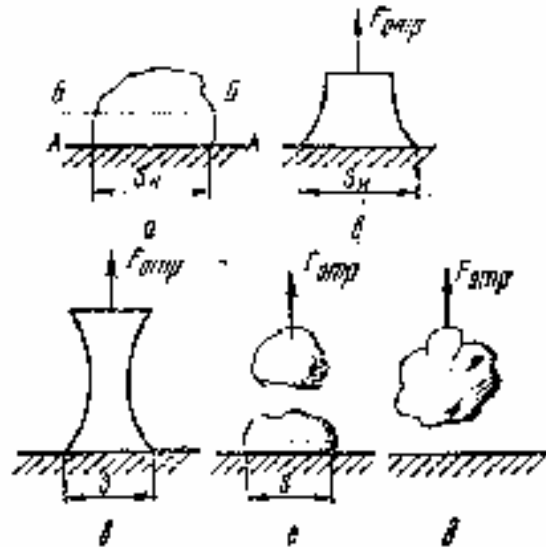


Адгезия (а) и отрыв пленок (б)

- ▶ Адгезия пленок в пищевой промышленности проявляется в двух аспектах. Первый из них связан с особенностями некоторых пищевых продуктов и технологии их изготовления. Так, адгезия пленок широко используется в сыроварении. Пленка не только сохраняет сыр, но и активно участвует в процессе его созревания.
- ▶ Второй аспект адгезии пленок связан с применением антиадгезионных полимерных материалов. Их используют для борьбы с адгезией сыпучих и особенно упругопластических пищевых масс. Полимерный материал выполняет роль адгезива. Адгезия его к субстрату, т. е. к поверхности технологического оборудования, определяет возможность практического использования полимерных антиадгезионных материалов.

Связь адгезии с когезией и аутогезией

- ▶ Влияние объемных свойств пищевых масс на поверхностные свойства можно проследить, рассматривая соотношение адгезии и когезии.
- ▶ **Когезия** означает связь внутри данного тела, т.е. в пределах одной фазы; связь пищевой массы с твердой поверхностью по плоскости АА характеризуется адгезией.



Связь адгезии с когезией и аутогезией

- ▶ Одновременно существует связь внутри самой пищевой массы, которая на рис. *а* проходит по плоскости *ББ* и характеризует когезию этой массы.
- ▶ В случае адгезии имеет место граница раздела фаз, для когезии подобная граница отсутствует. В этом одна из характерных особенностей когезии, ее принципиальное отличие от адгезии. Соотношение адгезии и когезии определяет условие удаления жидких и, в большой степени, упруго-пластических пищевых масс при нарушении их контакта с твердой поверхностью.
- ▶ При слабой адгезии по отношению к когезии происходит нарушение взаимодействия по плоскости *АА* и адгезионный отрыв (см. рис. *б*). При незначительной когезии, уступающей адгезии, осуществляется когезионное удаление массы (см. рис. *г*).

Связь адгезии с когезией и аутогезией

- ▶ Соотношение адгезии и когезии и тип отрыва можно определить количественно. Адгезию оценивают с помощью работы - $W_{ад}$ или силы - $F_{ад}$, необходимой для разъединения контактирующих между собой разнородных тел, а когезию, соответственно, с помощью работы - $W_{ког}$ или силы - $F_{ког}$, необходимой для разрушения однородных тел. При нарушении границы раздела по плоскости AA (см. рис.), в случае адгезионного удаления, соотношение между адгезией и когезией будет следующим:

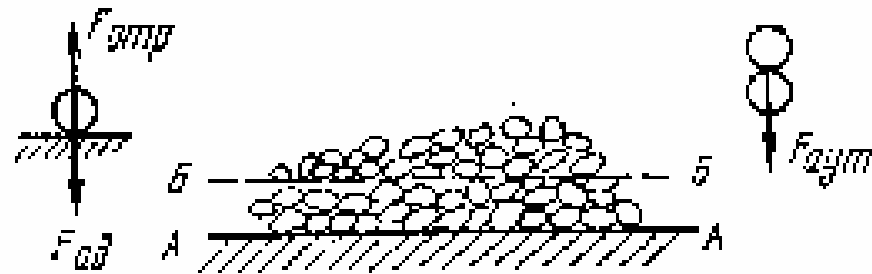
$$W_{ад} < W_{ког} , F_{ад} < F_{ког} .$$

- ▶ Условия нарушения когезии одного и того же тела можно представить в виде:

$$W_{ад} > W_{ког} , F_{ад} > F_{ког} .$$

Связь адгезии с когезией и аутогезией

- ▶ Адгезия сыпучих пищевых масс неразрывно связана с таким явлением, как *аутогезия* (связь однородных по форме или природе тел).
- ▶ В данном случае речь идет об аутогезии частиц, т.е. связи между собой частиц сыпучих пищевых масс. Адгезия слоя частиц, составляющих сыпучий материал, осуществляется между частицами и поверхностью по плоскости АА (см. рис.). Адгезия отдельной частицы показана в левой верхней части рисунка. Частицы прилипшего слоя связаны между собой силами аутогезии. Аутогезия пары соседних частиц показана в верхней правой части рис. Аутогезия слоя частиц проходит по границе раздела (линия ББ) внутри сыпучей массы.



ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ И СМЕСЕЙ

Классификация сыпучих материалов

- ▶ Сыпучими называются такие материалы, которые состоят из частиц, между которыми отсутствуют молекулярные связи
- ▶ Обрабатываются, транспортируются, дозируются и расфасовываются в сыпучем состоянии: чай, зерно, крупы, какао, кофе, сахар, мука, макаронные изделия
- ▶ Наиболее важными характеристиками сыпучих материалов, определяющими большинство их физико-механических свойств, являются объемная масса, размеры и форма частиц. Вместе все эти характеристики определяют *сыпучесть* материалов. Наименее сыпучими являются порошки и пылевидные материалы. Кусковые и тяжелые материалы наиболее подвижны.

Классификация материалов по сыпучести

№ гр.	Группа материалов	Размер частиц, мм	Объемная масса, кг/м ³	Сыпучесть (текучесть)
1	Крупнокусковые	более 150	600 – 2500	Достаточная
2	Кусковые	50 – 150	500 – 2000	Достаточная
3	Мелкокусковые	10 – 50	400 – 1500	Достаточно хорошая
4	Зернистые	0,5 – 10	300 – 1500	Хорошая
5	Порошкообразные	0,05 – 0,5	200 – 1000	Затруднительная
6	Пылевидные	менее 0,05	100 – 500	Весьма затруднительная
7	Хлопьевидные	Волокна, чешуйки, хлопья	50 – 300	То же

Основные характеристики СМ, определяющие их ФМС

Из многообразия свойств сыпучих материалов для выбора рациональных технологических процессов и конструктивных параметров рабочих органов наиболее важными являются:

- ▶ объемная масса и плотность материала,
- ▶ размеры, форма частиц,
- ▶ пористость частиц и порозность насыпного материала,
- ▶ угол естественного откоса,
- ▶ слеживаемость и комкуемость,
- ▶ склонность к сводообразованию,
- ▶ влажность, пыление,
- ▶ кородирующие свойства,
- ▶ склонность к самовозгоранию и ядовитость и др.

Объемная масса

- ▶ Знание величины объемной массы необходимо для определения основных размеров технологических емкостей, дозаторов, весовых бункеров, впускных воронок и т.д. Размерность объемной массы выражается в $\text{кг}/\text{м}^3$.
- ▶ Различают объемную массу при свободной насыпке и для уплотненного насыпного материала.
- ▶ В технологических процессах насыпные материалы обычно направляются по коммуникациям самотеком в свободно насыпанном состоянии, а подвергаются принудительному уплотнению лишь на некоторых конечных операциях при наполнении готовым продуктом тары (например, при развеске муки и затаривания ее в мешки). Поэтому основное внимание будет уделено объемной массе материалов при свободной насыпке.

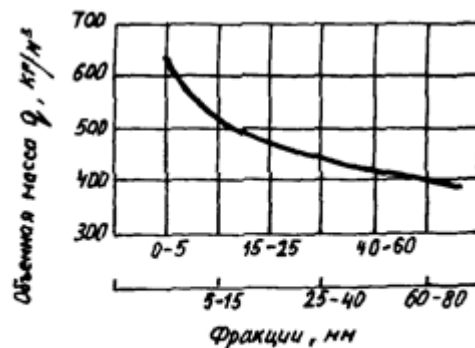
Объемная масса сыпучих материалов

Материал	Объемная масса, кг/м ³
Бобы	590 - 800
Вика	800 - 850
Винные ягоды	470
Горох	780 - 800
Гречиха	640 – 700
Груша	350
Комбикорм рассыпной	350 - 650
Крахмал	370
Крупа гречневая	500 - 700
Крупа манная	600 - 800
Крупа овсяная	500 - 700
Кукуруза	700 - 750
Мука пшеничная, в/с	550 – 600
Мука пшеничная, н/с	300 – 400
Мука ржаная, в/с	450 – 500
Мука ржаная, н/с	300 – 400
Мука овсяная	450 – 640
Мука ячменная	580
Овес	390 - 500
Подсолнух	380 – 420
Просо	660 – 850
Пшеница	650 – 810
Пшено	500 - 700
Рис	500 – 700
Рожь	650 - 790

- ▶ Объемная масса для конкретного сыпучего материала не имеет постоянного значения. Колебание объемной массы зависит от гранулометрического состава материала: от размеров частиц, наличия частиц разной величины в общем количестве материала, его влажности и т.д.
- ▶ Колебания объемной массы одного и того же материала могут достигать 200-250%. У ряда материалов объемная масса сильно изменяется от содержания влаги. Зависимость не остается постоянной для материалов различного гранулометрического состава, у одnorазмерных порошкообразных и пылевидных материалов с увеличением влажности наблюдается уменьшение объемной массы. Крупность частиц материала тоже резко влияет на изменение объемной массы



Изменение объемной массы ρ однородного порошкообразного материала в зависимости от влажности W



Изменение объемной массы материала в зависимости от крупности частиц

Плотность

- ▶ Близкое к объемной массе понятие - это **плотность**. Чаще всего его относят к свойствам отдельных материалов, из которого получен кусковой материал, или к конгломератам (брикетам и гранулам), полученным из сыпучих материалов
- ▶ **Плотность** - это количество вещества, заключенное в единице объема ρ (кг/м³). Один из методов определения плотности - пикнометрический.
- ▶ Плотность сухого вещества $\rho_{с.в}$ определяется из формулы:

$$\rho_{с.в} = \rho_{ж} \frac{G_2}{G_1 + G_2 + G_3},$$

где $\rho_{ж}$ - плотность жидкости, заполняющей пикнометр (до риски), кг/м³;

G_1 - масса пикнометра, заполняемого жидкостью, кг;

G_2 - масса образца, кг;

G_3 - масса пикнометра с образцом и жидкостью, налитой до риски, кг

- ▶ При прессовании сыпучих материалов, их брикетировании и гранулировании достигнуть пикнометрической плотности практически невозможно, так как часть воздуха остается в системе капилляров.
- ▶ Существует такое понятие **насыпная плотность** ρ_n [кг/м³] - это вес единицы объема свободно насыпанного материала

Порозность, пористость

- ▶ Слой зернистого сыпучего материала занимает больший объем, чем сплошной кусок твердого тела, из которого получены частицы. Это вызвано появлением в слое свободных пространств между зернами. Отношение суммарного объема V_0 пространств между частицами к конечному общему объему V слоя называется **порозностью** и обозначается через ξ :

$$\xi = \frac{V_0}{V} = 1 - \frac{V_B}{V},$$

где V_B - объем частиц твердого вещества в слое;

V_0 - суммарный объем пространства между частицами;

V - общий объем.

- ▶ Порозность зависит от влажности материала и высоты лежащего сверху слоя материала. Она изменяется в пределах $0 < \xi < 1$. Насыпная плотность ρ_n и порозность связаны соотношением $(1-\xi)\rho_r + \xi\rho_c$, где ρ_r и ρ_c соответственно плотность материала частиц и среды.
- ▶ Реальные сыпучие материалы состоят не из однородных зерен, а представляют собой сложную смесь из разных по размерам частиц, имеющих внутренние микро- и макрокапилляры, а также трещины и щели, заполненные воздухом.

Поверхностные свойства. Трение

- ▶ Многие технологические процессы пищевого производства (прессование, смешивание, дозирование) связаны с перемещением частиц под воздействием действующих внешних сил и преодолением сил трения как внешнего, так и внутреннего.
- ▶ Процесс трения частиц является сложным, его протекание зависит от внешних факторов: природы пар трения; исходной шероховатости и волнистости тел; промежуточной и окружающей среды; нагрузки; скорости (скольжения, качения, кручения); исходной температуры и влажности, а также от внутренних факторов, возникающих в процессе трения частиц: изменение свойств поверхностных слоев частиц; изменение шероховатости и волнистости частиц в результате их взаимодействия; тепловыделение при трении (температура и температурный градиент на микро- и макроуровне); разрушение поверхностей частиц в зоне трения. Учесть все факторы в отдельности не представляется возможным, поэтому пользуются усредненными характеристиками, полученными в определенных условиях.

Поверхностные свойства. Трение

- ▶ *Коэффициент трения* определяется экспериментально для соответствующей поверхности и подсчитывается по формуле

$$f = \frac{\tau}{\sigma} = \frac{F}{N},$$

где τ - касательное напряжение в плоскости сдвига, Па;

σ - нормальное напряжение на уровне плоскости сдвига, Па;

F - сила трения, Н;

N - сила нормального давления, Н.

- ▶ Коэффициент внутреннего трения для применяемых рабочих поверхностей, больше, чем внешнего, и оба уменьшаются при увеличении нормального давления.

Поверхностные свойства. Трение

- ▶ Различают статический и динамический коэффициенты трения
- ▶ Статический коэффициент трения $f_{ст}$ определяется по формуле

$$f_{ст} = \frac{F_{ст}}{N_1} ,$$

где $F_{ст}$ - сила трения в начальный момент сдвига, Н;

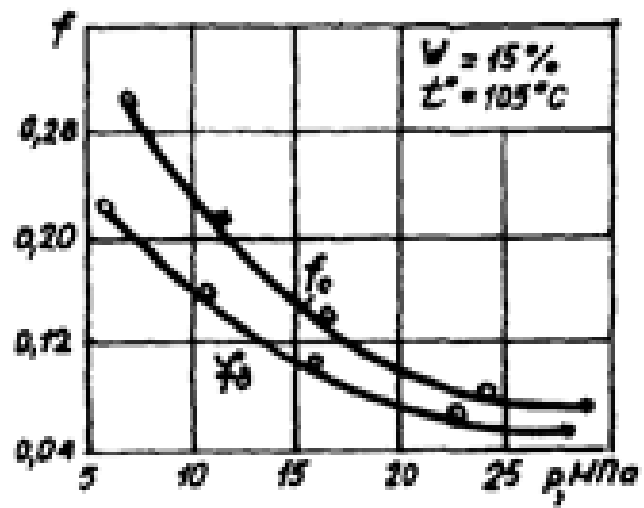
N_1 - сила нормального давления в начальный момент сдвига, Н

- ▶ Динамический коэффициент трения f_D определяется по аналогичной формуле

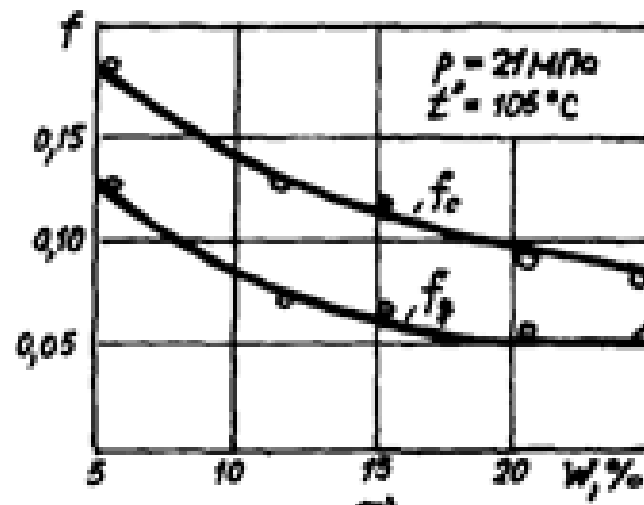
$$f_D = \frac{F_D}{N_2} ,$$

где F_D - сила трения в период движения, Н;

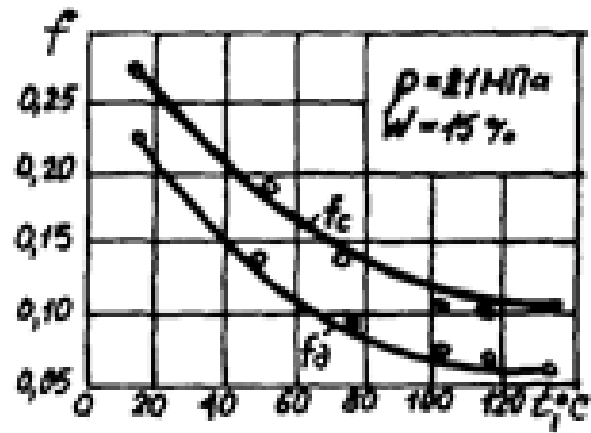
N_2 - сила нормального давления в период движения, Н



а)



б)

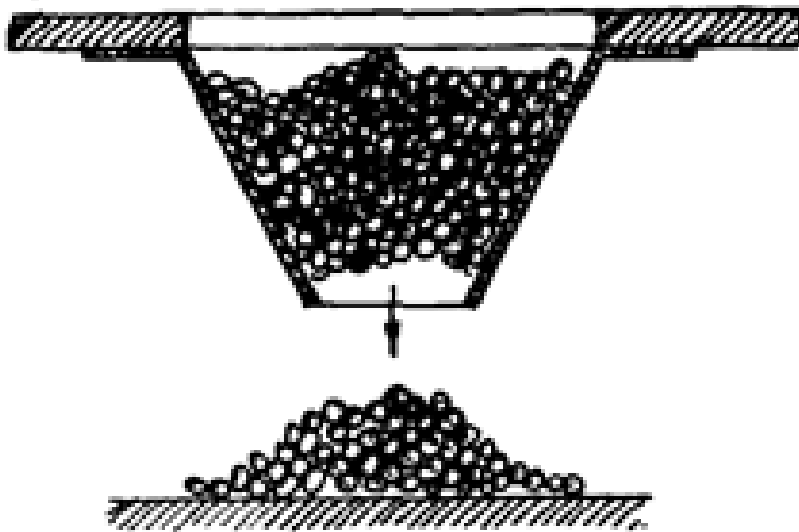


в)

Зависимость коэффициентов трения покоя f_0 и движения $f_д$ фитосырья от нормального давления P (а), влажности W (б) и температуры t (в)

Слеживаемость, комкуемость, склонность к сводообразованию

- ▶ Это характеристики плохой сыпучести материала. От сыпучести или подвижности материалов, т.е. способности при известных условиях образовывать струю, текущую под действием силы тяжести, зависит характер движения материала в процессе его технологической обработки.
- ▶ Многие материалы склонны образовывать своды, т.е. зависать над выпускным отверстием при течении из бункера, воронок и т.п.



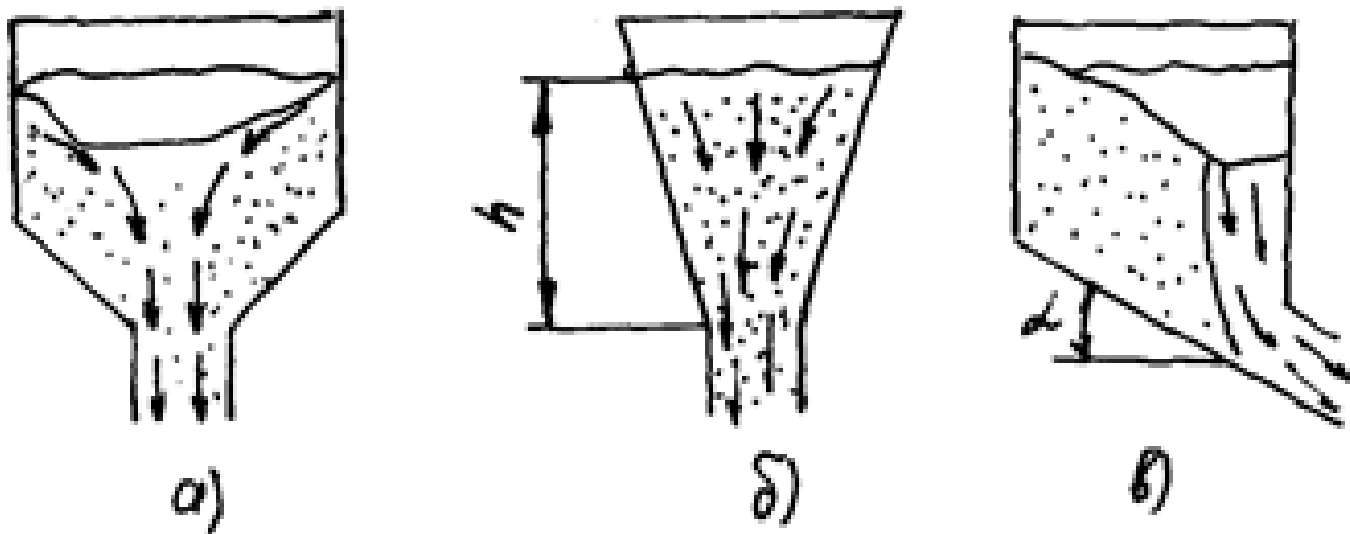
Образование сводов в бункере

Слеживаемость, комкуемость, склонность к сводообразованию

- ▶ После образования свода дальнейшее истечение материала прекращается и может возобновляться только после разрушения свода. Образованию сводов способствуют высокий коэффициент трения между частицами, слеживаемость, комкуемость и липкость (адгезионные свойства поверхностей частиц).
- ▶ На слеживаемость некоторых материалов влияет длительность их хранения. Так, например, при непродолжительном хранении в течение 2-3 дней в бункере мукомольно-крупяные отходы не теряют сыпучести, но при более длительном хранении они слеживаются и образуют своды. Пшеничные отруби при длительном хранении в силосах не только стоят отвесной стеной, но и не всегда сразу отваливаются при небольшом подкосе в толще насыпи.
- ▶ Своды могут образовываться также вследствие недостаточно большого размера выпускного отверстия, не соответствующего размеру кусков дозируемого материала.

Истечение сыпучих масс

- Процесс дозирования сыпучих материалов связан с транспортированием его по коммуникациям и подачей к дозаторам. К точности дозирования, а следовательно, и подаче материалов предъявляются весьма жесткие требования. Дозируемые материалы хранятся в бункерах выше дозирующих устройств и подаются к ним самотеком



Виды истечения сыпучих материалов из бункеров: а - нормальный;
б - гидравлический; в - при боковой разгрузке

Истечение сыпучих масс

- ▶ **Нормальный вид истечения**, при котором материал движется в виде столба, расположенного над отверстием истечения.
- ▶ **Гидравлический вид истечения**, при котором весь сыпучий продукт в бункере движется вниз подобно жидкости.
- ▶ **Боковое истечение** происходит при боковой разгрузке бункера и является частным случаем нормального вида истечения.

Связь параметров истечения сыпучих материалов с конструктивными параметрами оборудования

- ▶ Бесперебойный поток материала из бункера обеспечивается соответствующей величиной выпускного отверстия. Чем больше выпускное отверстие, тем лучше истечение материала.
- ▶ С увеличением отношения диаметра выпускного отверстия бункера к диаметру куска материала интенсивность истечения материала также возрастает. Как правило, диаметр выпускного отверстия должен быть в 4-5 раз больше диаметра наибольшего куска материала. При этом выпускное отверстие делается тем больше, чем острее частицы материала.
- ▶ **Пропускная способность** выпускного отверстия при уменьшающемся диаметре куска материала увеличивается тем больше, чем больше частицы материала приближаются к форме шара.
- ▶ **Интенсивность истечения** увеличивается также при уменьшающемся коэффициенте трения f между материалом и стенками бункера и при возрастании объемной массы материала ρ .

Связь параметров истечения сыпучих материалов с конструктивными параметрами оборудования

- ▶ В технологических процессах пищевых производств сыпучий материал из хранилищ подается самотеком по желобам и трубам. Излишние перегибы и повороты конструкций мешают нормальному истечению материалов. В местах перелома подающих устройств материал снижает скорость, что практически может привести к "забиванию" коммуникаций.
- ▶ Трубы допускают меньшие углы наклона, чем прямоугольные желоба, вследствие отсутствия у них двугранных углов, в которых застаиваются материалы, особенно порошкообразные.
- ▶ Чем больше процент мелочи содержит транспортируемый материал, тем больше должен быть угол наклона желоба к горизонту.

- ▶ Наименьшие допустимые *углы наклона технологических поверхностей* (желобов) для некоторых материалов:

Транспортируемый материал	Угол наклона стального желоба, град.	Транспортируемый материал	Угол наклона стального желоба, град.
Гречиха	26	Песок	50
Каменная соль	40	Просо	22
Кукуруза	22	Пшеница	26
Мука пшеничная	44	Пшено	25
Овес	22	Чай	50 – 70
Отруби	37	Ячмень	21

- ▶ Для деревянных конструкций угол наклона принимается большим, чем для стальных, примерно на 5^0 . Для влажных материалов углы наклона также несколько увеличиваются, при этом чем меньше размер кусков, тем больше должен быть принят угол наклона.

Уплотнение сыпучих материалов

На выбор конструктивных параметров оборудования для уплотнения сыпучих материалов и оптимальных режимов работы рабочих органов решающее влияние оказывают свойства материалов, из которых важное значение имеют

- ▶ структурно-механические
- ▶ сдвиго-реологические
- ▶ технологические свойства

По виду приложения усилия или напряжения к перерабатываемому материалу эти свойства делятся на три группы:

- ▶ объемные
- ▶ поверхностные
- ▶ сдвиговые

Уплотнение сыпучих материалов

- ▶ *Объемные структурно-механические свойства* определяют поведение сыпучего тела при воздействии на него нормальных напряжений в замкнутом пространстве или между двумя пластинами.
- ▶ Объемные свойства зернистых и волокнистых твердых тел обусловлены размерами и формой частиц, состоянием поверхности и внутренней структурой материалов. Они составляют большую группу свойств, требующих специальных методик их оценки с применением соответствующей аппаратуры.
- ▶ К таким свойствам относятся: объемная масса q , плотность ρ , порозность ξ , пористость ξ' , внутреннее трение f_v и др.

Уплотнение сыпучих материалов

- ▶ *Поверхностные свойства уплотняемых материалов* - характеризуют поведение поверхности тела на границе раздела с другим твердым материалом при воздействии нормальных (адгезия) и касательных (внешнее трение) напряжений, возникающих при работе рабочих органов прессующих устройств.

Уплотнение сыпучих материалов

- ▶ **Крупность частиц исходных материалов.** Из молекулярной теории уплотнения вытекает, что наиболее плотная упаковка частиц достигается при наиболее тонком измельчении исходного продукта. Оно ведет к увеличению суммарной поверхности частиц и площади контактов, через которую проявляется действие сил сцепления, что приводит к повышению плотности монолитов. В свою очередь, плотность ρ определяет прочность Π_p полученных прессованием монолитов. Ю.В. Подколзин установил следующую экспериментальную зависимость:

$$\Pi_p = 98,5 - 44 \cdot 10^3 l^{-0,01} \rho,$$

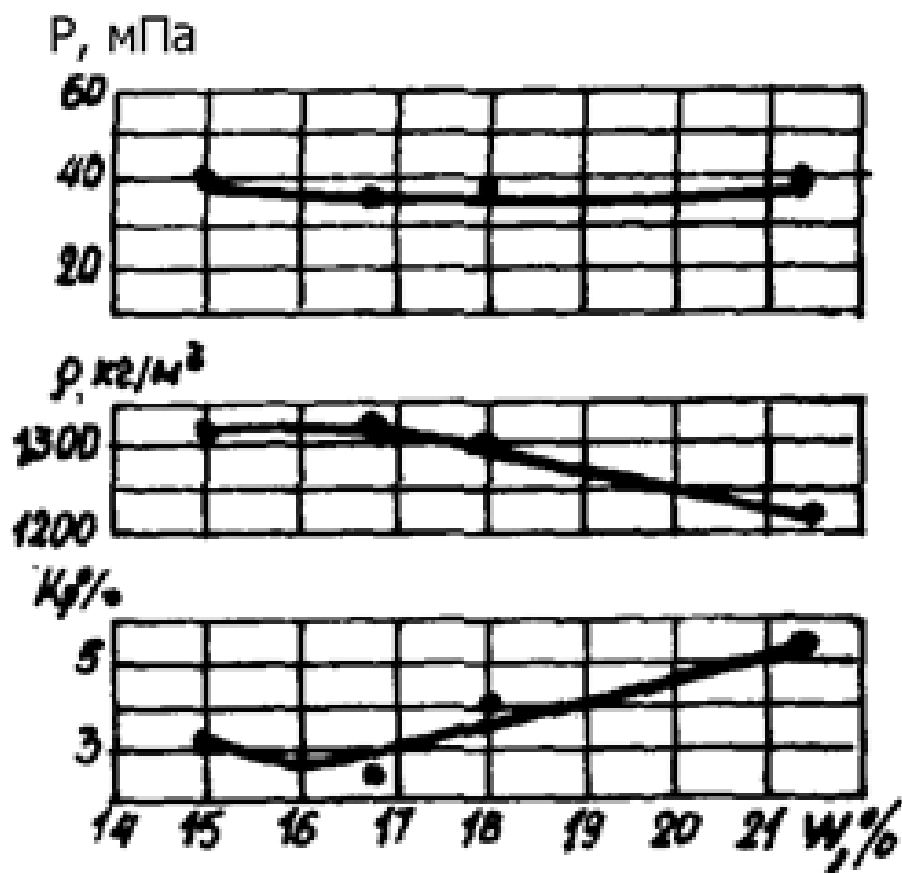
где l - размер прессуемых частиц

- ▶ Таким образом, наиболее прочны монолиты из мучнистых и пылевидных материалов, наименее прочны монолиты, если в них не вводить связующие компоненты (меласса, жир и др.), состоящие из волокнистых компонентов и сечки материалов растительного или органического происхождения.

Уплотнение сыпучих материалов

- ▶ *Влажность исходных материалов* в значительной мере определяет как качество получаемых монолитов, так и экологичность технологических процессов.
- ▶ В зависимости от физического состояния вода может выполнять роль пластификатора и связующего вещества, способствующего более тесному сближению частиц и образованию соответствующих связей, например, более прочных брикетов. Наряду с этим в других условиях вода может выполнять роль расклинивающего тела и противодействовать уплотнению материала, делая его более упругим и неподатливым спрессовыванию. Установлено, что для каждого исходного материала существует зона оптимальных технологических режимов, соответствующих определенной влажности. Превышение влажности приводит к уменьшению плотности ρ и прочности монолитов P_p , показатель крошимости K_p растет, а необходимое прилагаемое давление P остается неизменным. Частицы исходного продукта от влажности набухают, увеличивается объем их массы.

Уплотнение сыпучих материалов



Зависимость давления P прессования, плотности ρ , крошимости $K\rho$ гранул муки фитоматериалов (травянистых, и кормовых растений) от влажности W

Уплотнение сыпучих материалов

- ▶ *Температура исходных материалов* также влияет на протекание процесса уплотнения. При уплотнении материала часть механической работы, затрачиваемой на его деформацию и перемещение вдоль канала, переходит в теплоту. Образующаяся теплота увеличивает степень нагрева сжимаемого материала и матрицы. При увеличении температуры прессования наблюдается положительное уменьшение энергоемкости процесса, увеличение производительности оборудования и уменьшение износа матрицы.
- ▶ При температуре выше 300 К повышение давления также способствует уменьшению вязкости воды, в результате уплотняемый материал становится более пластичным и легче поддается деформации.
- ▶ Полученные монолиты, являясь еще полуфабрикатами, требуют немедленного охлаждения. Охлаждение способствует сокращению периода упругого последействия, а также завершению релаксационных процессов внутри монолитов и повышению их прочности. В результате охлаждения влажность брикетов снижается на 1,5-3%, и они становятся более прочными.

Уплотнение сыпучих материалов

- ▶ *Теплофизические свойства прессуемых материалов.* Для тепловых расчетов процесса прессования необходимо иметь численные значения характеристик теплофизических свойств, которые могут быть найдены только экспериментальным путем. К основным теплофизическим характеристикам относятся: коэффициенты теплопроводности λ , температуропроводности α , удельной теплоемкости C . В ходе процесса прессования эти характеристики, в значительной степени меняются в зависимости от влажности W , температуры t^0 и приложенного давления P .
- ▶ Установлено, что с повышением температуры и влажности все теплофизические характеристики сыпучих пищевых материалов возрастают. Это объясняется тем, что при влажности W ниже 14% вода прочно связана с твердыми частицами исходного продукта, основную роль в теплообмене играют твердый скелет материала и воздух, теплопроводность которого в 25 раз меньше теплопроводности воды.
- ▶ Численные значения коэффициентов невелики и составляют: $\alpha=(19-20)10^{-2}$ [м²/°С] и $\lambda=(6-7)10^{-2}$ [Вт/(м·°С)].

Уплотнение сыпучих материалов

- ▶ С увеличением влажности усиливается массообмен, и теплопроводность заметно возрастает, так как вода не только заполняет поры между частицами, но и проникает в микрокапилляры, увеличивая при этом площадь контактной поверхности и создавая более благоприятные условия для передачи тепла.
- ▶ Удельная теплоемкость C с увеличением влажности W и температуры t^0 тоже возрастает и, например, для комбикормовых смесей может колебаться от $(17-18)10^{-2}$ Дж/(кг·град) при $W=17\%$ и $t^0=293$ К до $(21-22)10^{-2}$ Дж/(кг·град) при $W = 22\%$ и $t^0=373$ К