

**Министерство сельского хозяйства Российской Федерации**  
**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение**  
**высшего образования**  
**«Саратовский государственный аграрный университет**  
**имени Н. И. Вавилова»**

## **РЕОЛОГИЯ**

**краткий курс лекций**

**для студентов 2 курса**

Направление подготовки  
**35.03.07 Технология производства**  
**и переработки сельскохозяйственной продукции**  
**Профиль подготовки**  
Технологии пищевых производств в АПК

Саратов 2018

УДК 664:532.135

ББК 36

М79

Реология/краткий курс лекций для студентов 2 курса направления подготовки 35.03.07 Технология производства и переработки сельскохозяйственной продукции / Сост.: Н.Л. Моргунова // ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ». – Саратов, 2018. –43 с.

Краткий курс лекций по дисциплине «Реология» составлен в соответствие с рабочей программой дисциплины и предназначен для студентов направления подготовки 35.03.07 Технология производства и переработки сельскохозяйственной продукции. Краткий курс лекций содержит теоретический материал по основным вопросам дисциплины.

© Моргунова Н.Л., 2018  
© ФГОУ ВО «Саратовский ГАУ», 2018

## ВВЕДЕНИЕ

Пищевая индустрия XXI века стремительно развивается, более чем втрое за последние годы возросла доходность пищевой промышленности, что позволило сделать её конкурентоспособной по мировым меркам. С возрастающей конкуренцией в этой области многие предприятия уделяют все большее внимание проблемам экономической эффективности и качеству производимой ими продукции. Как известно, различные пищевые продукты обладают не только разнообразным химическим составом, но и различными свойствами, что влияет на качество продукции. При проектировании машин и аппаратов для выпуска пищевых продуктов необходимо учитывать различные свойства тех или иных продуктов, что не всегда выполняется.

**РЕОЛОГИЯ (от греч. rheos – течение, поток и logos – слово, учение) – наука о деформациях и текучести вещества. Рассматривает процессы, связанные с необратимыми остаточными деформациями и течением разнообразных вязких и пластичных материалов, явления релаксации напряжений и т.д.**

Реология тесно связана с гидромеханикой, теориями упругости, пластичности и ползучести, в ней широко пользуются методами вискозиметрии. С проблемами реологии приходится встречаться во многих областях техники, в физике полимеров при изучении механизмов трения, в физике дисперсных систем, в биофизике и т.д. Для технологов мясной и молочной промышленности знание реологических характеристик пищевых продуктов – необходимое условие успешной работы. Сырье или полученные готовые продукты, реологические характеристики которых неудовлетворительны, не смогут быть реализованы, т.к., внешний вид и содержание продуктов не будут соответствовать высокому качеству.

Задача данного курса состоит в освоении реологических понятий, методов и навыков для применения полученных знаний в пищевой промышленности. Реологические явления проявляются во многих природных процессах и в большом числе технологических. Данное направление является актуальным и перспективным для молодых специалистов в изучении, для применения знаний на производстве и в научно-исследовательской деятельности.

**В зависимости от поставленной задачи, исследованные реологические характеристики могут быть использованы для определения качества готового продукта, регулирования параметров технологического процесса производства, служить исходными данными при конструировании технологического оборудования и т.п.**

**Лекции 1**  
**Теоретические основы реологии.**  
**Введение**

1. Предмет и задачи реологии. Роль в обеспечении контроля, регулирования и управления качеством сырья и готовой продукции.

2. Методы реологии.

3. Основные понятия, определения и уравнения инженерной реологии.

**1. Предмет и задачи реологии. Роль в обеспечении контроля, регулирования и управления качеством сырья и готовой продукции**

**РЕОЛОГИЯ** (от греч. rheos – течение, поток и logos – слово, учение) – наука о деформациях и текучести вещества. Рассматривает процессы, связанные с необратимыми остаточными деформациями и течением разнообразных вязких и пластичных материалов, явления релаксации напряжений и т.д.

Термин «Реология» ввел американский ученый Ю. Бингам, которому принадлежат ценные реологические исследования жидкостей и дисперсных систем. Официально термин «Реология» принят на 3-м симпозиуме по пластичности (1929, США), однако отдельные положения реологии были установлены задолго до этого.

Реология тесно связана с гидромеханикой, теориями упругости, пластичности и ползучести; в ней широко пользуются методами вискозиметрии. С проблемами реологии приходится встречаться во многих областях техники, в физике полимеров, при изучении механизмов трения, в физике дисперсных систем, в биофизике, в механике грунтов и т.д.

В Реологии существует несколько подразделов:

1. Теоретическая реология – занимает промежуточное положение между гидромеханикой и теориями упругости, пластичности и ползучести. Она устанавливает зависимости между напряжениями, вызываемыми деформациями и их изменением во времени. Основное внимание обращается на сложное реологическое поведение вещества, когда появляются, например, вязкие и упругие свойства или вязкие и пластичные и т.д.

2. Экспериментальная реология – определение реологических свойств с помощью специальных приборов и испытательных машин.

3. Микрореология – исследует деформации и течение в микрообъемах, например, в объемах соизмеряемых с размерами частиц дисперсной фазы в дисперсных системах.

4. Биореология исследует течение разнообразных биологических жидкостей, деформации различных тканей у человека и животных.

Типичный реологический процесс – это сравнительно медленное течение вещества, в котором обнаруживаются упругие, пластические или высокоэластические свойства. В перечень «реологических» сред входят тела, как твердые, так и жидкие. Реология позволяет понять, что при быстрых воздействиях все тела ведут себя как твердые, при медленных – текут.

В данном курсе мы будем рассматривать, только те реологические процессы и явления, которые относятся к (мясным или молочным) пищевым продуктам.

Итак, к **основным задачам** инженерной реологии можно отнести:

1. изучение свойств существующих продуктов и разработка методов расчета процессов течения их в рабочих органах машин;

2. выявление величин основных реологических характеристик, необходимых для расчета и совершенствования технологических процессов и оценки качества изделий;

3. разработка методов измерения характеристик, как в стационарных (лабораторных) условиях, так и в потоке, а также методик расчета реологических характеристик;

4. определение «эталонных» показателей реологических свойств сырья и готовых продуктов, основанных на существующих в настоящее время методах оценки качества изделий;

5. управление структурой и качеством пищевых продуктов путем внесения добавок, изменения режимов и способов механической и технологической обработки и пр.;

6. комплексное исследование величин различных физических свойств для установления аналогии между изменениями свойств, их моделирования, прогнозирования и т.п.

Роль в обеспечении контроля, регулирования и управления качеством сырья и готовой продукции

Успехи реологии пищевых продуктов, достигнутые отечественными и иностранными исследователями, обуславливают все более широкое использование реологических приемов в промышленности на качественно новой основе. Они применяются не только в традиционных случаях, таких как, изучение физических величин и расчет движения продуктов в рабочих органах машин, но и для оценки ряда технологических, в том числе и качественных, показателей продуктов, управления ими и получения заранее заданных технологических характеристик. Оба направления имеют существенное значение в совершенствовании техники и технологии.

## 2. Методы реологии

Реализация исследований методами инженерной реологии позволяет стабилизировать выход изделий, получать готовые продукты постоянного, заранее заданного качества, научно обосновывать понятия качества продуктов, рассчитывать, совершенствовать и интенсифицировать технологические процессы, «конструировать» те или иные виды пищевых продуктов и т.д.

В инженерной реологии широко используют следующие **основные методы**:

1. дифференциальный;
2. интегральный;
3. метод аналогий и моделей;
4. метод анализа размерностей;
5. экспериментальный

**Дифференциальном методом** пользуются при изучении бесконечно малых величин, теоретически - путем составления дифференциальных уравнений, экспериментально – изучением изменения параметров элементов тела в каком-либо процессе. Этот метод необходим для определения состояния величин, переменных во времени и пространстве.

**Интегральный метод** служит для изучения конечных величин, с помощью интегрирования дифференциальных уравнений или в результате суммарного учета дифференциальных изменений в системе.

**Методом аналогий** пользуются довольно широко во многих качественных и количественных исследованиях, в общем случае он позволяет составить уравнения для реальных объектов по аналогии с уравнениями для идеальных.

**Метод анализа размерностей** применяют для составления критериальных уравнений при обработке экспериментальных данных. При разработке методики эксперимента, определив зависимые и независимые переменные и функциональную зависимость между критериями, можно установить необходимые пределы изменения последних.

**Экспериментальный метод** обязателен при полных исследованиях для получения всех расчетных зависимостей и формул. Общеизвестной теорией экспериментальных исследований является теория подобия (трактует условия подобия физических явлений и методы определения этих явлений).

## 3. Основные понятия, определения и уравнения инженерной реологии

**РЕЛАКСАЦИЯ** (от лат. relaxatio – ослабление, уменьшение) – процесс постепенного перехода термодинамической системы из неравновесного состояния, вызванного внешними воздействиями, в состояние равновесия термодинамического.

- процесс установления термодинамического, а следовательно и статического равновесия в физической системе, состоящей из большого числа частиц.

Время установления равновесия в системе называют температурой релаксации. Примерами релаксационных процессов являются: постепенное изменение напряжений в теле при постоянной его деформации (релаксация напряжений); выравнивание неравномерно распределенной концентрации в растворах и газовых смесях путем диффузии; выравнивание температуры в неравномерно нагретом теле путем теплопроводности; и т.д.

**ДЕФОРМАЦИЯ** (от лат. deformation – искажение) – изменение формы или размеров тела (или части тела) под действием внешних сил, при нагревании или охлаждении, изменении влажности и других воздействиях, вызывающих изменение относительного положения частиц тела. В твердых телах различают упругую деформацию (исчезающую после устранения воздействия, вызвавшего деформацию) и пластическую деформацию (остающуюся после удаления нагрузки).

При деформации тела возникает сила, которая стремится восстановить прежние размеры и форму тела. Эта сила возникает вследствие электромагнитного взаимодействия между атомами и молекулами вещества. Ее называют силой упругости.

Простейшим видом деформации является деформация растяжения или сжатия, сдвиг, изгиб, кручение.

**Относительная деформация** представляет отношение абсолютной деформации к первоначальным размерам тела, т.е.

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}, \text{ где} \quad (1)$$

$\Delta l$  – абсолютная деформация;

$l$  – первоначальный размер тела.

В отличие от пружин и некоторых эластичных материалов деформация растяжения или сжатия упругих стержней (или проволок) подчиняются линейному закону Гука в очень узких пределах. Для металлов относительная деформация  $\varepsilon$  не должна превышать 1%. При больших деформациях возникают необратимые явления (текучесть) и разрушение материала.

Деформации могут быть сдвиговыми, одноосными (линейными) и объемными.

При одноосном сжатии пластично-вязких тел, не заключенных в жесткую форму, наряду с упругими возможны необратимые пластические деформации, связанные с уменьшением объема. Тогда **объемная деформация** будет представлять собой отношение изменения объема тела  $\Delta V - V_k$  к его первоначальному объему  $V$ :

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta V}{V} \quad (2)$$

Деформации могут изменяться во времени  $\tau$  (с) при неустановившемся процессе; при установившемся – изменение деформации в единицу времени постоянно. Все это описывается понятием **скорости деформации**  $\dot{\varepsilon}$  (1/с):

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{d\tau}, \text{ где} \quad (3)$$

$\varepsilon$  – относительная деформация;

$\tau$  – время (с).

Если деформация под действием конечных сил увеличивается непрерывно и неограниченно, то материал начинает течь. Установившейся режим течения характеризуется **градиентом скорости**, который по смыслу аналогичен скорости деформации:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{du}{dx}, \text{ где} \quad (4)$$

$u$  – линейная скорость элементарного слоя, м/с;

$x$  – расстояние по нормали между двумя элементарными слоями, м.

**НАПРЯЖЕНИЕ** – это сила  $F$  (или мера внутренних сил) (Н), действующая на единицу площади  $S$  ( $\text{м}^2$ ):

$$\sigma = \frac{F}{S} = \frac{-F_{\text{упр}}}{S} \text{ где,} \quad (5)$$

$S$  – площадь поперечного сечения деформированного тела.

Тогда закон Гука можно сформулировать так: относительная деформация  $\varepsilon$  пропорциональна напряжению  $\sigma$ :

$$\varepsilon = \frac{1}{E} \sigma \quad (6),$$

где  $E$  – модуль упругости (Юнга).

**ГИДРОСТАТИЧЕСКОЕ ДАВЛЕНИЕ** – представляет собой отношение силы, равномерно распределенной по нормальной к ней поверхности, к площади этой поверхности. Давление в точке в истинно-вязких жидкостях или в жидкообразных системах не зависит от ориентации площадки, в пластично-вязких системах, имеющих структурный каркас – зависит.

Давление в любой точке определяется по формуле:

$$P = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta S} \quad (7)$$

Если тело заключено в определенном объеме и на него действует гидростатическое давление, то в нормальном направлении будет действовать меньшее давление.

**Коэффициент бокового давления** характеризует их отношение:

$$\xi = \frac{p_z}{p}, \text{ где} \quad (8)$$

$p_z$  – гидростатическое давление (Па);

$p$  – меньшее гидростатическое давление (Па).

Этот коэффициент (бокового давления) для истинно-вязкой жидкости равен единице, для абсолютно жесткого тела – нулю.

Упругие свойства материала характеризует **коэффициент Пуассона**:

$$\nu = \frac{\varepsilon_z}{\varepsilon}, \text{ где} \quad (9)$$

$\varepsilon_z$  – относительная поперечная деформация;

$\varepsilon$  – относительная продольная деформация прямого стержня при его продольном растяжении или сжатии в области действия закона Гука.

Этот коэффициент применяется, если тело неидеальное, у которого (коэффициент бокового давления)  $0 < \xi < 1$ . Тело не заключено в жесткую форму и подвергается действию одноосно растягивающего или сжимающего напряжения, что приводит к изменению его формы (например, при условии постоянства объема, если тело подвергнуто одноосному сжатию, то изменяется его высота, поперечные размеры увеличиваются, что и характеризуется относительными деформациями, которые связаны между собой данным коэффициентом Пуассона).

**УПРУГОСТЬ** – способность тела после деформирования полностью восстанавливать свою первоначальную форму, т.е. работа деформирования равна работе восстановления. Упругость тел характеризуется модулем упругости первого  $E$  (Па) или второго рода  $G$  (Па) соответственно при сжатии – растяжении и сдвиге. Деформации определяются законом Гука:

$$\begin{aligned} \sigma &= \varepsilon E \\ \theta &= \varepsilon G, \text{ где} \end{aligned} \quad (10)$$

$\sigma$  – напряжение при сжатии или растяжении;

$\theta$  – напряжение при сдвиге (сдвига);

$\varepsilon$  – относительная деформация;

$E$  – модуль упругости при сжатии-растяжении, Па;

$G$  – модуль сдвига, Па.

**АДГЕЗИЯ**  $p_o$  (Па) – слипание разнородных твердых или жидких тел, соприкасающихся своими поверхностями. **АУТОГЕЗИЯ** – самопроизвольное слипание однородных тел. Формально адгезия (липкость) определяется, как удельная сила нормального отрыва пластины от продукта:

$$p_o = \frac{F_o}{S_o}, \text{ где} \quad (11)$$

$F_o$  – сила отрыва;

$S_o$  – геометрическая площадь пластины, м<sup>2</sup>.

Отрыв может быть трех видов:

- по границе контакта – адгезионный;
- по слою продукта – когезионный;
- смешанный – адгезионнокогезионный.

Часто адгезионного отрыва не происходит, поэтому удельную силу при любом виде отрыва называют липкостью, адгезионным давлением или давлением прилипания.

**ВНЕШНЕЕ ТРЕНИЕ** – взаимодействие между телами на границе их соприкосновения, препятствующее относительно их перемещению вдоль поверхности соприкосновения. Оно зависит от усилия нормального контакта и липкости, определяется по закону Б.В. Дерягина:

$$F_{mp} = f(F_k + p_o S_o), \quad (12)$$

где  $f$  – истинный коэффициент внешнего трения;

$F_k$  – сила, нормальная поверхности сдвига (усилие контакта);

$p_o$  – адгезия, Па;

$S_o$  – геометрическая площадь пластины, м<sup>2</sup>.

**ПЛАСТИЧНОСТЬ** – способность тела под действием внешних сил необратимо деформироваться без нарушения сплошности. Пластическое течение – это течение при величине напряжения, равной пределу текучести.

**ВЯЗКОСТЬ** – способность тела оказывать сопротивление относительно смещению его слоев. Вязкое течение реализуется в истинно-вязких, ньютоновских жидкостях при любых, сколь угодно малых напряжениях сдвига. Полная вязкость жидкости складывается из ламинарной (ньютоновской), турбулентной и объемной вязкостей. При течении неньютоновских (аномально-вязких) жидкостей вязкость не остается величиной постоянной, она зависит от напряжения сдвига и градиента скорости. Тогда пользуются понятием «эффективная вязкость», которая вычисляется:

$$\eta_{эф} = \frac{\theta}{\dot{\varepsilon}}, \quad (13)$$

где  $\theta$  – напряжение сдвига, Па;

$\dot{\varepsilon}$  – скорость деформации, с<sup>-1</sup>.

Эффективная вязкость является итоговой характеристикой, которая описывает равновесное состояние между процессами восстановления и разрушения структуры в установившемся потоке.

**Ньютоновская жидкость** – это вязкая жидкость, подчиняющаяся при своем течении закону вязкого трения Ньютона.

Например, для прямолинейного ламинарного (слоистого) течения этот закон устанавливает наличие линейной зависимости между касательным напряжением  $\theta$  (Па) в плоскостях соприкосновения слоев жидкости и производной от скорости течения по направлению нормали  $n$  к этой плоскости.

**Вопросы для самоконтроля**

1. Предмет и предназначение реологии.
2. Цели и задачи изучения дисциплины «реология».
3. Разделы реологии.
4. Понятия: «деформация», «напряжение», «упругость». Соответствующие уравнения.
5. Понятия «адгезия», «пластичность», «вязкость», «период релаксации». Соответствующие уравнения.

### Лекции 2,3

#### Основные классификации реологии

1. Феноменологический способ классификации, основные уравнения инженерной реологии. Механические и математические модели реологических тел.
2. Классификация реологических тел.
3. Классификации дисперсных систем.
4. Реограммы жидких и жидкообразных продуктов.

#### 1. Феноменологический способ классификации, основные уравнения инженерной реологии. Механические и математические модели реологических тел

Очень многие реологические среды являются дисперсными системами двух или трех фаз: это мелкие твердые частицы, распределенные в вязкой жидкости (суспензия или гель, если твердая фаза преобладает), или это мелкие капельки одной жидкости в другой – эмульсия, или пузырьки воздуха в жидкости (пена), и т.д. Но, тем не менее, реология рассматривает такую среду как однородную, но обнаруживающую такие же механические свойства, как и те, что установлены в опытах с реальным конкретным материалом. Этот подход, характерный для механики сплошных сред, позволяет избежать трудностей, связанных с изучением механизмов взаимодействия фаз, и сравнительно просто описать основные черты поведения реологических сред при воздействии на них заданных нагрузок. Такие теории называются **феноменологическими**.

**Реология как наука о деформации и течении реальных тел исходит из феноменологического поведения тел при механическом нагружении.** Она исследует соотношение между действующим на тело напряжением и его деформацией.

Математическая модель механических свойств данной среды задается уравнением, связывающим напряжения, имеющиеся в окрестности некоторой точки среды, и деформации, возникающие вследствие этого, причем в это уравнение могут входить и скорости напряжений и деформаций, т.е. их производные по времени, и интегралы по времени от напряжений или деформаций. Это уравнение называется реологическим уравнением состояния среды или ее определяющим соотношением, и играет роль, аналогичную роли уравнения состояния идеального газа, нужно только иметь в виду, что уравнение состояния газа гораздо точнее отражает свойства конкретного газа, чем реологическое уравнение – свойства некоторой вязко-упруго-текучей среды, что объясняется очевидной причиной – очень высокой сложностью тех сред, которые изучает реология.

Определяющее соотношение должно быть сформулировано как связь тензоров напряжений и деформаций на основе всех известных опытных данных, но сами опыты эту связь не устанавливают, а лишь показывают ее проявления в некоторых частных случаях.

Простой и наглядный способ построения реологического уравнения состояния состоит в том, что каждое основное свойство среды можно смоделировать подходящим элементом, то есть упругость – пружинкой, вязкость – поршнем в цилиндре с вязкой жидкостью, пластичность – элементом с сухим трением. Соединив тем или иным образом эти элементы, получают модель образца для механических испытаний, свойства которого в общих чертах можно определить теоретически. Это позволяет, изучив опыты с конкретным материалом, подобрать такое соединение элементов, чтобы обеспечить качественное соответствие реальным опытам. Подбирая жесткость пружинки, вязкость масла в поршне, величину коэффициента сухого трения, можно добиться достаточно точного совпадения экспериментальных кривых и их модельного представления (если, конечно, структура

модели правильно организована и достаточно богата для описания данного материала). Если модель из элементов построена, то написание математического соотношения производится по определенным правилам, причем сравнительно простым.

Рассмотрим представленные механические модели простейших реологических тел. Механическая модель **упругого** тела (**рис.а**) представляет собой пружину. Эту механическую модель реологического тела называют **Гуковым** телом, которая описывается законом Гука (формула 13), приведенным в предыдущем вопросе. При объемном сжатии напряжения и деформации связаны между собой посредством объемного модуля упругости  $K$  (Па):

$$\sigma = K\varepsilon_V, \quad (14)$$

где  $\varepsilon_V$  – объемная деформация;  
 $K$  – объемный модуль упругости.

Механическая модель **вязкого** реологического тела (представлена на **рис.б**), называется **Ньютоновым** телом, представляющим собой цилиндр и поршень с отверстиями. Это течение описывается уравнением Ньютона:

$$\theta = \frac{F}{S} = \eta \dot{\varepsilon} \text{ или } F = \eta S \frac{du}{dx} \quad (15)$$

где  $\eta$  - коэффициент динамической или абсолютной вязкости, который характеризует величину усилий, возникающих между двумя элементарными слоями жидкости при их относительном смещении, Па·с;

$F$  – сила сопротивления между двумя элементарными слоями, Н;

$S$  – площадь поверхности сопротивления этих слоев, м<sup>2</sup>;

$\frac{du}{dx}$  - градиент скорости, т.е. интенсивность изменения скорости по нормали к ее вектору, с<sup>-1</sup>.

На следующем рисунке (**рис.в**) показана модель **Сен-Венанова** тела, представляющего собой пару трения скольжения. Это механическая модель **пластичного** реологического тела.

Мясные (молочные) продукты представляют собой по преимуществу аномально-вязкие системы, деформационное поведение которых описывается более сложными уравнениями.

Комбинируя названные ранее три основных модели, можно вывести уравнения напряжений и деформаций для различных реальных тел.

Модель, составленную из пружинок и поршеньков, можно только растягивать и сжимать, но растяжению в модели могут соответствовать и сжатие, и сдвиг, и объемная деформация.

Рассмотрим механическую модель **упруго вязкого** тела (**рис.г**) с **релаксацией напряжений**, так называемая модель **Максвелла**, представленная упругой и вязкой составляющими в виде пружины и поршня с цилиндром. Воспользовавшись законом Гука (упругое тело) и уравнением Ньютона (вязкое тело) Максвелл вывел уравнение для упруго вязкого тела:

$$\frac{d\varepsilon}{d\tau} = \frac{1}{G} \frac{d\theta}{d\tau} + \frac{\theta}{\eta} \rightarrow \dot{\varepsilon} = \frac{\dot{\theta}}{G} + \frac{\theta}{\eta} \quad (16)$$

Пусть в начальный момент к образцу прикладывается усилие, вызывающее напряжение  $\theta_1$ , при этом в образце возникает деформация. Если эту деформацию поддерживать постоянной, ( $\varepsilon = \text{const}$ ,  $\frac{d\varepsilon}{d\tau} = 0$ ), то напряжение, убывает со временем экспоненциально (релаксация напряжений), и за время  $\tau_p$  уменьшается в  $e$  раз, ( $e = 2,71828$  – основание натуральных логарифмов). т.е.

$$\theta = \theta_1 e^{-\frac{\tau}{\tau_p}}, \quad (17)$$

где  $\tau$  – время, с;

$\tau_p$  – время ( период) релаксации, с;

$\theta$  – напряжение, Па;

$\theta_1$  – начальное значение напряжения, Па.

Таким образом, время релаксации  $\tau_p$  характеризует скорость убывания напряжений в описанном процессе при  $\varepsilon = \text{const}$ , который называется процессом релаксации.

Реологическое уравнение Максвелла пригодно для качественного описания процессов. Для хорошего количественного описания используются более сложные модели.

**Фойгт-Кельвин** предложил схему, в которой упругий и вязкий элементы соединены параллельно, т.е. так, что их деформации одинаковы (**рис.д**). Механическую модель Фойгта-Кельвина - **упруго вязкого тела с релаксацией деформаций**, можно описать следующим уравнением:

$$\varepsilon = \varepsilon_{\max} e^{-\frac{\tau}{\tau_p}}, \quad (18)$$

где  $\varepsilon$  – деформация;

$\varepsilon_{\max}$  – максимальная деформация.

Это уравнение получено при снятии напряжений ( $\theta=0$ ) и интегрировании в пределах от  $\varepsilon$  до  $\varepsilon_{\max}$  и от 0 до  $\tau$ .

Если напряжение не равно нулю, а будет величиной постоянной ( $\theta_2 = \text{const}$ ) при  $\tau > 0$ , то в результате интегрирования можно получить следующую зависимость:

$$\varepsilon = \frac{\theta_2}{G} \left( 1 - e^{-\frac{\tau}{\tau_p}} \right), \quad (19)$$

где  $\theta_2$  – постоянное напряжение, Па;

$\tau_p$  – время релаксации, с;

$G$  – модуль упругости второго рода, Па.

Механическая модель **упруго пластичного** тела (**рис. е**), представляет собой пару трения скольжения и пружину. Для вывода уравнения упруго - пластичной среды, можно воспользоваться уравнением Максвелла, где вместо вязкой составляющей вводят скорость деформации ползучести:

$$\left( \frac{d\varepsilon}{d\tau} \right)_{\text{полз.}} = B\theta^m, \quad (20)$$

где  $B$  и  $m$  – опытные величины для данного тела.

Затем складывают скорости деформаций упругой и ползучести:

$$\frac{d\varepsilon}{d\tau} = \frac{1}{G} \frac{d\theta}{d\tau} + B\theta^m, \quad (21)$$

Если в уравнении  $m=1$ , то получается уравнение Максвелла. При этом  $B=1/\eta$ .

Механическая модель **пластично-вязкого** тела состоит из вязкой и пластичной составляющих. При сложении соответствующих напряжений, получают уравнение **Шведова-Бенгама**:

$$\theta = \theta_0 + \eta \frac{d\varepsilon}{d\tau}, \quad (22)$$

$\theta_0$  - предельное напряжение, Па;

$\eta$  - коэффициент вязкости, Па·с.

Это уравнение используют для описания деформационного поведения многих (молочных, мясных) пищевых продуктов.

Механическую модель **упругопластично-вязкого** тела описал **Ф.Н. Шведов**, предполагая, что наряду с обратимой, упругой деформацией в теле появляется и остаточная деформация:

$$\theta = G\varepsilon_{y \max} + \left( \varepsilon_{y \max} - \varepsilon_{y \max} \right) G e^{-\frac{\tau}{\tau_p}}, \quad (23)$$

где  $\varepsilon_{y \max}$  - максимальная упругая деформация;

$\left( \varepsilon_{y \max} - \varepsilon_{y \max} \right)$  - остаточная деформация.

Представляет интерес обобщенная математическая модель, описываемая с помощью степенного уравнения **Гершеля-Балкли**, по которому можно описать девять кривых течения:

$$\theta = \theta_0 + B_1^* \&^n, \quad (24)$$

где  $\theta_0$  - предельное напряжение сдвига, Па;

$B_1^*$  - коэффициент пропорциональный эффективной вязкости (Па·с<sup>n</sup>);

$\&$  - градиент скорости деформации, с<sup>-1</sup>;

$n$  - индекс течения, характеризующий угол наклона линии течения в логарифмических шкалах.

Таблица 1

**Значения постоянных в уравнении Гершеля-Балкли**

№ п/п	Предельное напряжение сдвига	Индекс течения	Вязкость	Название тела
1	0	$\infty$	$\infty$	Упругое
2	$>0$	0	$>0$	Пластичное
3	$>0$	1	$>0$	Пластично-вязкое
4	0	$<1$	$>0$	Псевдопластичное
5	0	$>1$	$>0$	Дилатентное
6	$>0$	$<1$	$>0$	Нелинейное пластичное
7	$>0$	$>1$	$>0$	Нелинейное дилатентное
8	0	1	$>0$	Истинно-вязкое
9	0	0	0	Идеальная жидкость

Для описания деформирования сложных тел пользуются и другими уравнениями, но данные уравнения реологических тел являются основными.

## 2. Классификация реологических тел

**Феноменологический** способ классификации реологических тел на основе механических и математических моделей рассмотрен в первом вопросе. Если взять упругое и истинно вязкое тело в качестве крайних, то все остальные тела, описанные ранее, будут располагаться между ними. Пищевые продукты при заготовке, транспортировании, хранении и особенно при переработке в продукты питания подвергаются различным механическим воздействиям. При этом производственные процессы должны быть организованы так, чтобы обеспечить максимально высокий уровень качества готовых продуктов. Успешному решению этой задачи способствует знание реологических свойств и текстуры пищевых продуктов. Пищевые продукты, включая сырье и полуфабрикаты, в зависимости от состава, дисперсного строения и структуры обладают различными реологическими свойствами и текстурными отличительными признаками.

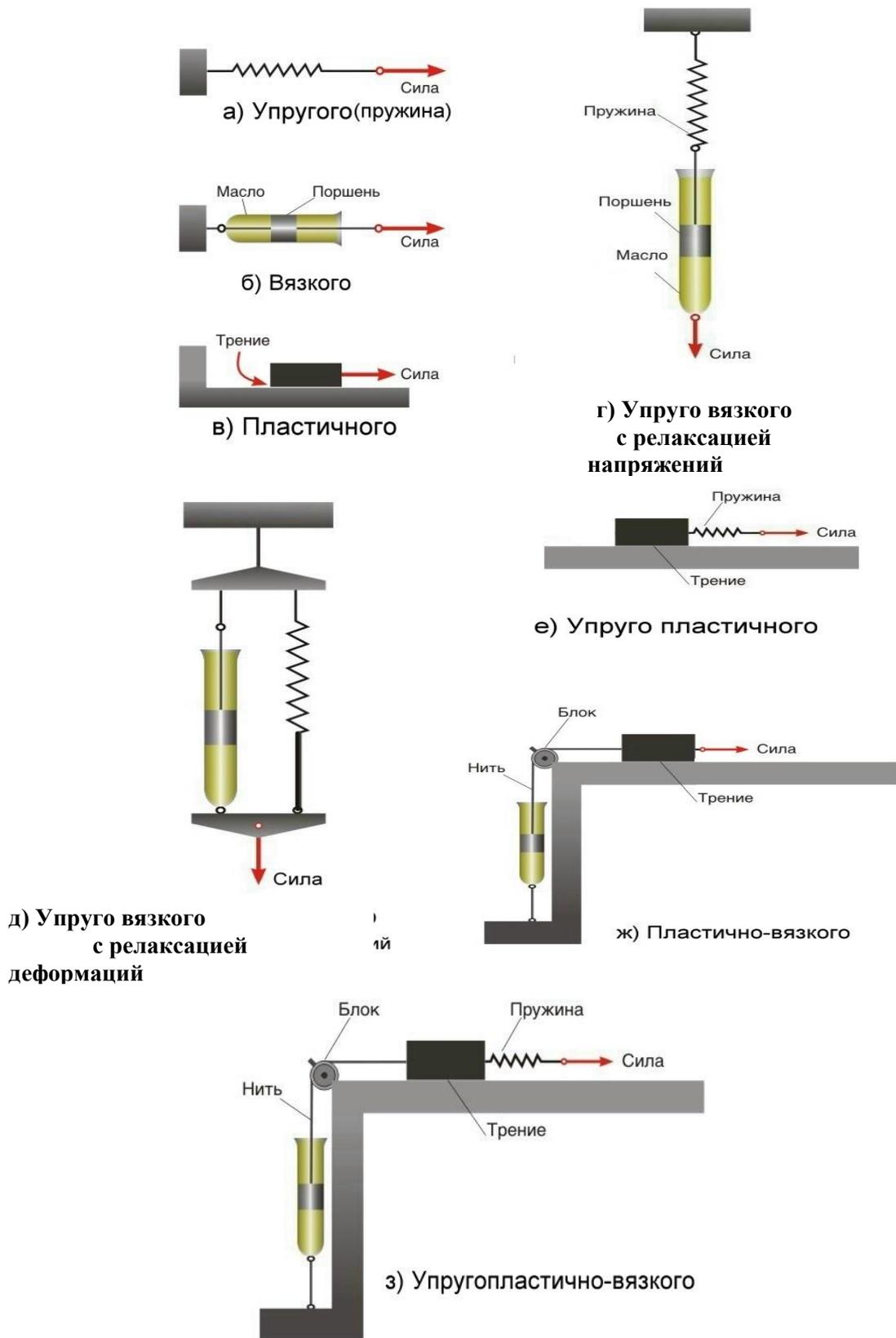


Рис. 1 Механические модели реологических тел

**Р.И. Шищенко** предложил простую классификацию реологических тел по величине отношения  $\frac{\theta}{\rho g}$  ( $\rho$  – плотность продукта, кг/м<sup>3</sup>,  $g$  – ускорение силы тяжести, 9,8 м/с<sup>2</sup>), представленную в таблице 2.

Таблица 2

**Простая классификация**

$\frac{\theta}{\rho g}, м$	Менее 0,005	0,005-0,02	0,02-0,15	Более 0,15
Вещество	структурные жидкости	жидкие пасты	густые пасты	твердые тела

**Обобщенную классификацию** (от твердого до истинно вязкого состояния) по величине механических свойств (модулей упругости, вязкости и т.п.), предложил **Б.А. Николаев**.

К первой группе он относит твердые и твердообразные тела (твердый жир, целые ткани мяса и т.п.);

Ко второй – твердо-жидкие (мясной фарш, студни, творог);

К третьей – жидкообразные и жидкости (расплавленный жир, бульоны, молоко, вода).

Кроме приведенных выше классификаций существует еще одна группа:

- тиксотропные системы – у которых напряжение сдвига и эффективная вязкость уменьшаются во время сдвига;

- реопектные системы – у которых напряжение сдвига и эффективная вязкость увеличивается со временем при воздействии на систему касательных напряжений и постоянном градиенте скорости.

**Н.В. Михайлов и П.А. Ребиндер** делят реологические тела на жидкообразные и твердообразные в зависимости от периода релаксации.

К жидкообразным телам относятся ньютоновские жидкости и структурированные системы, не имеющие статического предельного напряжения сдвига.

К твердообразным телам относятся упруго-пластичные, условно-пластичные и другие тела, обладающие динамическим предельным напряжением сдвига. Рассмотрим примеры.

Таблица 3

**Классификация реологических тел**

Текущие			Твердые
ньютоновские	неньютоновские		
	жидкообразные	твёрдообразные	
Мясокостные бульоны, кровь (молоко, сливки) и др. белковые системы			
При малой концентрации сухих веществ (до 5%)	При средней и высокой концентрации сухих веществ, при внесении добавок		Сухой клей, желатин в плитках, прессованные порошки. Сыпучие: аэро-золи (дымы, туманы), мелко и крупнодисперсные порошки (сухая кровь, мясокостная мука, молоко)
	при температуре больше 30-40°C	при низкой температуре – гель (течет при механическом разрушении структуры)	
Вытопленные животные жиры (сливочное масло)			
При температуре выше плавления всех фракций триглицеридов	При температуре от точки плавления до 65 °C жироводяные эмульсии	При температуре на 5-15 °C ниже точки плавления текут при механическом раз-	При температуре много ниже точки плавления (обусловлено хим.

жирных кислот		рушении струк-туры (неустой-чивое состояние)	составом)
Коллоидные, капиллярно-пористые			
	Измельчение ткани жира-сырца в воде для вытопки жира мокрым способом	Измельченные до размера 1-2 мм и меньше целые ткани мяса, субпродуктов, жира (мясные, колбасные фарши) при температуре от 0 до 25 °С; творожные массы	Целые ткани мяса и субпродуктов, кости, мясные и колбасные фарши после обработки при температуре выше 45-50 °С; сыры.

Классификация справедлива при скоростях воздействия и величинах внешних сил, обычно имеющих место в процессе технологической обработки. Твердые и сыпучие (порошки) продукты условно объединены в верхней части таблицы.

### 3. Классификации дисперсных систем

подавляющее большинство вырабатываемых мясной или молочной промышленностью продуктов, а также сырья и полуфабрикатов относится к дисперсным системам, состоящим из двух и более фаз. Одна фаза (сплошная) – дисперсионная среда, другая, распределенная в виде отдельных частиц в дисперсионной среде – дисперсная фаза. Основным условием существования дисперсных систем является не растворимость или малая растворимость вещества дисперсной фазы в дисперсионной среде. Огромное разнообразие компонентов дисперсной системы по химическим и физическим свойствам, размеру, конфигурации и концентрации частиц дисперсной фазы в дисперсионной среде и т.д. затрудняет классификацию дисперсных систем по какому-либо одному признаку, поэтому единой классификации дисперсных систем нет. Классификация пищевых дисперсных систем учитывает ряд основных факторов: дисперсность, агрегатное состояние и тип контактов между дисперсными фазами. Большую роль при этом играют фундаментальные положения органической, физической, коллоидной и биологической химии.

В основу существующих классификаций дисперсных систем положено использование того или иного критерия, отражающего одно определенное свойство дисперсной системы. Наиболее известной является классификация, предложенная **В. Оствальдом**, основанная на различии в агрегатном состоянии дисперсной фазы и дисперсионной среды. Данная классификация позволяет охватить практически все дисперсные мясные (молочные) продукты, сырье и полуфабрикаты на всех промежуточных стадиях промышленного производства, за исключением газа.

Таблица 4

#### Классификация дисперсных систем

Дисперсионная среда	Дисперсная фаза	Тип системы и примеры
Газообразная	Твердая	Аэрозоли (копильный дым, пыль); порошки (сухое молоко и молочные продукты, пищевой и технический альбумин, меланж)
	Жидкая	Аэрозоли-туманы (дисперсия крови, моло-ка в распылительной сушилке)
	Газообразная	Системы с флюкту-ациями плотности (атмосфера Земли)

Жидкая	Твердая	Золи, суспензии (бульон, расплавленный жир, паштеты, колбасный фарш, сырковая масса, пасты)
	Жидкая	Эмульсия (жир в воде, кровь, яичный желток, молоко, простокваша, сливочное масло)
	Газообразная	Газовые эмульсии, пены (взбитый белок, газовые эмульсии в техно-логических процессах теплообмена, крем, взбитые сливки, пены в производстве мороженого)
Твердая	Твердая	Твердая суспензия, сплав (замороженная мышечная ткань, молочного нет реального продукта)
	Жидкая	Капиллярные системы, твердая эмульсия (нативная мышечная ткань, жидкость в пористых телах, замороженное сливочное масло, мороженное)
	Газообразная	Пористые тела, твердые пены (кость, взбитый и коагулированный ме-ланж, сыр, пенопласт, изоляционные мате-риалы)

Кроме этой классификации известны и более простые, например, Зигмонди предложил в качестве классификационного признака использовать лишь агрегатное состояние дисперсионной среды: газовая, жидкая и твердая дисперсионная среда.

**Н.Б. Урьев** предложил классифицировать дисперсные пищевые продукты на три основные группы:

1. твердая дисперсная фаза – газовая дисперсионная среда;
2. твердая дисперсная фаза – жидкая дисперсионная среда;
3. твердая дисперсная фаза - газовая и жидкая дисперсионная среда.

Существует классификация дисперсных систем **по структуре**:

1. свободнодисперсные – золь (суспензии, эмульсии, пример - молоко);
2. связнодисперсные системы (капиллярно-пористые тела, концентри-рованные эмульсии, гели, пасты, студни, пены). Простокваши, кефир.

Свободнодисперсные системы отличаются тем, что частицы дисперсной фазы могут перемещаться свободно в дисперсионной среде. В связнодисперсных система одна из фаз структурно закреплена и не может свободно перемещаться.

Также существует классификация **по межфазному** взаимодействию дисперсной фазы и дисперсионной среды (оценка межмолекулярных сил взаимодействия дисперсной фазы и дисперсионной среды):

1. лиофильные;
2. лиофобные.

В **лиофильных** дисперсных системах дисперсная фаза способна растворяться в дисперсионной среде. В **лиофобных** – дисперсная фаза не взаимодействует с дисперсионной средой.

Можно классифицировать дисперсные системы по размеру частиц дисперсной фазы.

**Свободнодисперсные системы** подразделяются на:

- грубодисперсные (содержат частицы, не проходящие через бумажные фильтры, видимы в световой микроскоп, размер частиц больше  $10^{-3}$ );
- высокодисперсные (частицы не видимы в световой микроскоп, практически не оседают, отделены могут быть с помощью центробежного поля, размер частиц от  $10^{-7}$  до  $10^{-3}$ ).

**Связнодисперсные системы** подразделяются в зависимости от размеров пор на:

- микропористые системы (до  $2 \cdot 10^{-7}$  см);
- переходнопористые (от  $2 \cdot 10^{-7}$  до  $2 \cdot 10^{-5}$  см);
- макропористые (более  $2 \cdot 10^{-5}$  см).

В зависимости от типа и энергии возникающих связей академик П.А. Ребиндер разделяет структуры на три типа:

- коагуляционные,
- конденсационные,
- кристаллизационные,

также встречаются комбинированные, например, конденсационно-кристаллизационные.

**Коагуляционные структуры** – образуются в дисперсных системах путем взаимодействия между частицами и молекулами через прослойки дисперсионной среды за счет сил сцепления Ван-дер-Ваальса. Термодинамически стабильны системы у которых с поверхностью частиц прочно связаны фрагменты молекул, способные без утраты этой связи растворяться в дисперсионной среде. В свою очередь, дисперсионная среда находится в связанном состоянии. Обычно эти структуры обладают способностью к самопроизвольному восстановлению после разрушений, т.е. способностью к **тиксотропии** (коагуляционные структуры обратимы и тиксотропны). Под действием напряжений они проявляют свойства вязко-пластичных тел. Частицы в таких системах связаны между собой молекулярными силами сцепления, образуя сплошную сетку или каркас. Типичными представителями коагуляционных систем являются сырой колбасный фарш, фарш ливерных колбас и прочее.

**Конденсационные структуры** – образуются из коагуляционных по мере удаления жидкой фазы, сопровождающиеся возникновением более прочных связей между частицами. В процессе образования их прочность постепенно увеличивается, оставаясь затем постоянной. Конденсационные структуры обладают большей прочностью и после разрушения не восстанавливаются. Они скорее являются хрупкими, чем пластичными. (Фарш готовых вареных и сырокопченых колбас).

**Кристаллизационные структуры** образуются путем срастания частиц или молекул при активном участии химического взаимодействия из расплава при охлаждении и из раствора при повышении его концентрации или охлаждении. Они характеризуются наличием пространственной кристаллической решетки, прочность которой зависит от формы кристаллов. Например, структура жира определяется составом и температурой. Вначале образуется наименее прочная кристаллическая форма, затем с течением времени переходит в наиболее прочную и термодинамически устойчивую.

Конденсационно-кристаллизационные структуры присущи натуральным продуктам, однако они могут образовываться из коагуляционных при удалении дисперсионной среды или срастания частиц дисперсной фазы в расплавах или растворах. В процессе образования эти структуры могут иметь ряд переходных состояний: коагуляционно-кристаллизационные, коагуляционно-конденсационные при непрерывном нарастании прочности. Основные отличительные признаки структур такого типа следующие: большая прочность по сравнению с прочностью коагуляционных структур, что обусловлено высокой прочностью контактов между частицами; отсутствие тиксотропии и необратимый характер разрушения; большая

хрупкость и упругость из-за жесткости скелета структуры; наличие внутренних напряжений и т.д. Например, животные и растительные ткани и некоторые продукты животного и растительного происхождения с клеточным строением по своим свойствам приближаются к конденсационно-кристаллизационным структурам.

Таким образом, вид структуры продукта обуславливает его качественные и технологические показатели и поведение в процессах деформации. Для их описания используют кривые течения (реограммы), которые связывают между собой напряжение и скорость деформации (деформацию). Характер реограмм, как правило, позволяет отнести данный реальный продукт к тому или иному виду реологических тел.

#### 4. Реограммы жидких и жидкообразных продуктов

Для характеристики жидкостей используют кривые течения – **реограммы**, которые представляют собой зависимость напряжения сдвига от скорости сдвиговой деформации в условиях простого сдвига.

Реограммы **ньютоновских** жидкостей представляют собой прямую линию **1** (рис 6), проходящую через начало координат. **Все кривые течения, которые отклоняются от прямой линии соответствуют неньютоновским жидкостям.** При этом **кривая 2** показывает **дилатентное течение**, характерное в основном концентрированным дисперсным системам, при котором с увеличением скорости деформации наступает «затруднение сдвига»; **кривая 3** показывает **псевдопластичное течение**, что характерно для «сдвигового размягчения» вследствие разрушения структуры с увеличением скорости деформации; **кривая 4** показывает **нелинейное пластичное течение**, характерное для большинства пластичных тел (при высокой концентрации дисперсной фазы вследствие

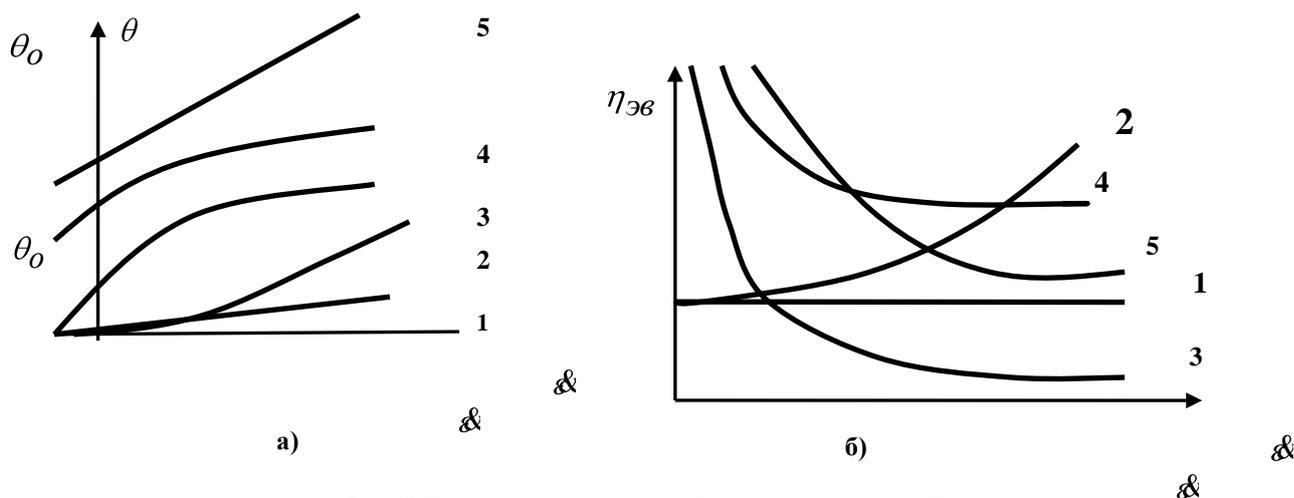


Рис. 2 Кривые течения (а) и функции вязкости (б)

1. – ньютоновской жидкости; 2- дилатентной; 3 – псевдопластичной жидкости; 4 – нелинейного пластичного тела; 5 – линейного пластичного тела

образования пространственной структуры возникает предел текучести  $\theta_0$ ). Линейный участок **кривой 5** соответствует **идеальному пластичному течению**.

#### Вопросы для самоконтроля

- 1.Связь инженерной реологии с другими науками. Результат изучения дисциплины.
- 2.Феноменологический способ классификации реологических тел.
3. Основные классификации реологических тел.
4. Классификация дисперсных систем.
5. Реограммы течения пищевых продуктов.

## Лекции 4,5

### Основные структурно-механические свойства пищевых продуктов

1. Сдвиговые структурно-механические свойства.
2. Компрессионные структурно-механические свойства.
3. Поверхностные структурно-механические свойства.
4. Оценка консистенции продукта инструментальными методами.
5. Сенсорная оценка качества и текстуры пищевых продуктов.

#### 1. Сдвиговые структурно-механические свойства

Среди комплекса физических свойств реологические (структурно-механические) являются главнейшими, они часто определяют поведение продуктов в самых разнообразных технологических процессах и энергетических полях, являются внешним выражением внутренней сущности объектов, то есть характеризуют агрегатное состояние, дисперсность, строение, структуру и вид взаимодействий внутри продукта.

По виду приложения силы (напряжения) к продукту структурно механические свойства можно разделить на три связанные между собой группы:

1. Сдвиговые;
2. Компрессионные;
3. Поверхностные.

Каждые из этих свойств, можно описать множеством структурно-механических характеристик. Реологические структурно-механические характеристики отвечают за качество продукции (сырья или готового продукта). Например, структурно-механические характеристики используют для оценки **консистенции** продукта как одного из основных показателей его качества.

Рассмотрим подробнее основные структурно-механические свойства мясных (молочных) продуктов.

**Сдвиговые свойства** характеризуют поведение объема продукта при **воздействии** на него **сдвиговых, касательных напряжений**. Изучение их занимает основное место в реологии, величины сдвиговых свойств можно использовать для самых различных целей, например, для оценки дисперсности систем, для расчета машин и аппаратов.

Важнейшими сдвиговыми характеристиками структурированных систем являются:

1. **пластическая и эффективная вязкости  $\eta_{эф}$** ;
2. **период релаксации**;
3. **наибольшая вязкость  $\eta_0$  не разрушенной структуры при скольжении мест контакта и вязкость предельно разрушенной структуры  $\eta_m$** ;
4. **модули упругости сдвига (G)**;
5. **пределы текучести условно-статический  $\theta_{ост}$  и динамический – предельное напряжение сдвига  $\theta_0$** ;
6. **прочность структуры при упруго-хрупком или эластичном разрыве  $\theta_m$  и при пластично вязком разрушении  $\theta_r$** .

С помощью этих характеристик рассчитывают течение продуктов в трубах, рабочих органах машин и аппаратов, определяют необходимые усилия для перемещения продукта, оценивают качество продукта, обосновывают оптимальные технологические условия процесса.

Исходя из зависимости изменения эффективной вязкости от напряжения сдвига можно по методу **Рейбиндера** определить степень разрушения структуры:

$$\alpha = \frac{\eta_0 - \eta_{эф}}{\eta_0 - \eta_m}, \quad (25)$$

где  $\eta_0$  - наибольшая вязкость;

$\eta_m$  - вязкость предельно разрушенной структуры;

$\eta_{эф}$  - эффективная вязкость.

## 2. Компрессионные структурно-механические свойства

**Компрессионные свойства** характеризуют поведение объема продукта **при воздействии** на него **нормальных напряжений в замкнутой форме**, между двумя пластинами или при каком-либо другом способе растяжения-сжатия образца продукта. Эти свойства используются для расчета рабочих органов машин и аппаратов и для оценки качества продукта.

К компрессионным структурно-механическим характеристикам относятся:

1. Коэффициент бокового давления;
2. коэффициент Пуассона;
3. модули упругости;
4. плотность.

Если тело заключено в определенном объеме и на него действует гидростатическое давление, то в нормальном направлении будет действовать меньшее давление.

**Коэффициент бокового давления** характеризует их отношение:

$$\xi = \frac{p_2}{p}, \text{ где} \quad (26)$$

$p_2$  – гидростатическое давление (Па);

$p$  – меньшее гидростатическое давление (Па).

Этот коэффициент (бокового давления) для истинно-вязкой жидкости равен единице, для абсолютно жесткого тела – нулю.

Упругие свойства материала характеризует **коэффициент Пуассона**:

$$\nu = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon}, \text{ где} \quad (27)$$

$\varepsilon_2$  – относительная поперечная деформация;

$\varepsilon$  – относительная продольная деформация прямого стержня при его продольном растяжении или сжатии в области действия закона Гука.

Этот коэффициент применяется, если тело неидеальное, у которого (коэффициент бокового давления)  $0 < \xi < 1$ . Тело не заключено в жесткую форму и подвергается действию одноосно растягивающего или сжимающего напряжения, что приводит к изменению его формы (например, при условии постоянства объема, если тело подвергнуто одноосному сжатию, то изменяется его высота, поперечные размеры увеличиваются, что и характеризуется относительными деформациями, которые связаны между собой данным коэффициентом Пуассона).

Эти параметры необходимы для расчета процессов шприцевания, формования, дозирования и течения по трубопроводам пластично-вязких продуктов. Объемные свойства можно также использовать для оценки качества пластично-вязких (фарш, творожная масса) и упругоэластичных (колбасные изделия) продуктов.

Существенной характеристикой компрессионных свойств является плотность. Средняя плотность определяется по выражению:

$$\rho = \frac{M}{V}, \quad (28)$$

где  $M$  – масса продукта, кг;

$V$  – объем продукта,  $\text{м}^3$ .

Истинная плотность равна пределу отношения массы к объему, когда последний стремится к нулю.

### 3. Поверхностные структурно-механические свойства

**Поверхностные свойства** характеризуют поведение поверхности продукта на границе раздела с другим твердым материалом или **при воздействии нормальных (адгезия, липкость) и касательных (внешнее трение) напряжений.**

К поверхностным характеристикам относятся:

1. адгезия (липкость);
2. коэффициент внешнего трения.

Для большинства мясных (молочных) продуктов адгезия (липкость) обуславливает величину усилия внешнего трения. Теоретически, особенно на молекулярном уровне, вопросы адгезии и внешнего трения еще разрабатываются.

Внешнее трение мясных (молочных) продуктов, по-видимому, нельзя отнести к физическим свойствам продукта, так как эта характеристика зависит от липкости и ряда других факторов. Трение может быть **статическим** – до начала смещения, и **динамическим** – при движении продукта по поверхности. Влияние различных факторов, таких как, давление контакта, скорость смещения, температура и т.п. на коэффициент внешнего трения не однозначно.

Установлено, что для мясных (молочных) продуктов с увеличением давления контакта эффективный коэффициент внешнего трения уменьшается по степенной зависимости: с увеличением скорости смещения и температуры его значения проходят через максимум.

Поверхностные характеристики необходимы для выбора и разработки новых видов, контактирующих материалов с продуктом для оборудования, тары, трубопроводов и т.д., поверхности которых должны обладать малой адгезией и минимальным сопротивлением при движении продукта. Кроме того, величины поверхностных свойств частично могут характеризовать консистенцию продукта.

**Таким образом, с помощью приборов и оценки структурно-механических свойств пищевых продуктов можно контролировать любую технологическую стадию и управлять качеством продукции.**

В процессе переработки мясные (молочные) продукты подвергаются воздействию различных факторов: изменению температуры, влажности, степени дисперсности при механической обработке, кислотности и пр.

### 4. Оценка консистенции продукта инструментальными методами

Оценка консистенции продукта осуществляется либо путем измерения СМХ на специальных приборах (реометрах), либо путем сенсорной (органолептической) оценки, т.е. субъективной оценки сопротивляемости и деформации продукта.

Оценку консистенции продукта инструментальными методами (измеряя его СМХ) проводят следующим образом:

1) В зависимости от видов и интенсивности механического воздействия (нагружения во времени) определяют различные СМХ, из которых выбирают наиболее чувствительную к изменению структуры продукта при его деформации. Выбранная характеристика является реологическим показателем консистенции (измеряемой величиной) для данного продукта.

2) Предварительно проводят определение «эталонного» значения СМХ для каждого вида продукта по существующим методикам оценки качества продукта. При этом в качестве «эталонного» принимают значение СМХ продукта высшего качества.

3) Сравнивают величину выбранного реологического показателя для исследуемого образца продукта с «эталонным» для него значением СМХ и по разности судят о консистенции продукта.

В зависимости от поставленной задачи **полученные результаты** могут быть использованы для **определения качества готового продукта, регулирования параметров технологического процесса производства, служить исходными данными при конструировании технологического оборудования** и т.п.

В мясной (молочной) промышленности вырабатывают большой ассортимент продуктов, которые по своей структуре представляют собой различные реологические тела – от упруго-пластичных твердых тел до истинно-вязких (ньютоновских) жидкостей.

### 5. Сенсорная оценка качества и текстуры пищевых продуктов

**ТЕКСТУРА**, по определению проф. **М. Боурна**, - физико-структурные свойства вещества, в частности продукта, воспринимаемые органами слуха, зрения и осязания и вызывающие у человека определенные ощущения при потреблении (откусывании, разжевывании, проглатывании). Комплекс ощущений при потреблении пищи, который называется органолептическим, приводит потребителя к предпочтению одних и отказу от других пищевых продуктов. Для создания высококачественных пищевых продуктов необходимо целенаправленно влиять на их органолептические свойства.

Консистенция и вязкость относятся к текстуре и представляют собой два из множества возможных ее отличительных признаков. Рассмотрим схему классификации сенсорной оценки качества и текстуры пищевых продуктов по М. Боурну.



**Рис. 3 Классификация сенсорной оценки качества и текстуры пищевых продуктов по М. Боурну**

При анализе текстуры определяют кинестетические признаки продукта, связанные с мышечными ощущениями.

**Инструментальные измерительные методы** для определения отдельных кинестетических признаков можно разделить на три группы:

1. **методы точного измерения** реологических величин – коэффициента вязкости, предела текучести, модуля упругости и др.;

2. **эмпирические методы**, при которых продукты подвергаются воспроизводимой деформации или нагрузке при помощи измерительных приборов, не позволяющих точно определить реологические свойства. Результаты измерений представляют собой параметры консистенции;

3. **имитационные методы**, при которых пищевые продукты в специальных измерительных приборах подвергают испытания, имитирующим реальные нагрузки при приеме пищи, например, с помощью циклических нагрузок имитируется процесс разжевывания пробы. Цель такого анализа текстуры – измерение параметров, которые соответствуют признакам текстуры продукта, полученными сенсорными методами.

#### **Вопросы для самоконтроля**

1. Понятие «структурно-механические свойства».
2. Классификация структурно-механических свойств.
3. Сдвиговые структурно-механические свойства (примеры).
4. Компрессионные структурно-механические свойства (примеры).
5. Поверхностные структурно-механические свойства (примеры).
6. Оценка консистенции инструментальными методами.
7. Понятие "текстура".
8. Классификация сенсорной оценки качества продуктов.

### **Лекция 6**

#### **Методы и приборы для измерения структурно-механических свойств пищевых продуктов**

1. Классификация методов и приборов для измерения СМХ.
2. Измерение сдвиговых характеристик.
3. Измерение компрессионных характеристик.
4. Измерение поверхностных характеристик.

##### **1. Классификация методов и приборов для измерения СМХ**

Приборы для измерения СМХ пищевых продуктов классифицируют на три группы:

- абсолютные;
- относительные;
- условные.

Первые приборы показывают значение свойств в абсолютной системе единиц, основываясь на геометрических размерах рабочего органа и условиях проведения опыта; вторые основываются на измерении значений свойств эталонных материалов, т.е. получаются безразмерные, относительные показатели (числовые значения физических величин). Приборы обеих групп теоретически обоснованы и данные, полученные с помощью них, могут быть использованы для расчета рабочих узлов аппаратов или оценки качества сырья и продуктов. Приборы третьей группы дают значения измеряемых величин в условных единицах, что не пригодно для расчетов. Этими приборами пользуются для сравнения каких-либо качественных показателей в узком диапазоне изменения технологических характеристик продукта.

Кроме того, приборы классифицируются на:

- дифференциальные;
- интегральные.

**Дифференциальные** позволяют проследить за распределением скоростей и деформацией продукта, **интегральные** – определить конечный, суммарный эффект измерения.

Приборы для измерения значений каждой группы свойств (сдвиговых, компрессионных и поверхностных) имеют свою специфику. Однако можно выделить некоторые общие положения, не считая температуры и технологических характеристик, четыре переменные:

1. сила, момент или напряжение;
2. расстояние, деформация, площадь или объем;
3. время, скорость деформации или линейная скорость;
4. энергия.

В соответствии с этим механические измерительные приборы содержат устройства для регистрации усилий, деформаций, времени; энергия вычисляется по этим показателям либо измеряется специальными приборами.

**По виду измеряемой величины реологические приборы** делят на **четыре группы** (таблица 5). Эта классификация в определенной мере условна, так как некоторые приборы позволяют варьировать две величины при постоянной третьей.

Таблица 5

**Классификация реологических приборов по виду измеряемой величины**

<b>Измеряемая величина</b>	<b>Постоянные величины</b>	<b>Пример прибора</b>
<b>Динамическая</b> (сила, момент, напряжение)	геометрические, кинематические	Вискозиметр «Реотест», сдвигомер Симоняна
<b>Кинематическая</b> (время, скорость)	динамические, геометрические	Вискозиметры: РВ-8, Оствальда, Уббелодера, Геплера
<b>Геометрическая</b> (длина, площадь, объем)	динамические, кинематические (время)	Пенетрометры (конический пластометр КП-3 и др.)
<b>Энергия</b> (мощность)	геометрические, кинематические	Фаринограф Брабендера, прибор Большакова-Фомина; приборы, дающие диаграмму сила-расстояние

В связи с этим, можно выделить **четыре метода измерения реологических характеристик**.

**Первый метод – постоянной скорости сдвига** – реализуется обычно путем применения электромеханического или гидравлического привода, сила измеряется различными динамометрами.

**Второй метод – метод постоянной нагрузки** – конструктивно значительно проще, так как скорость перемещения или вращения легко измерить обычным секундомером или записать на диаграммной ленте.

**При третьем методе измерения постоянная сила нагружения** обусловлена неизменной массой подвижной части прибора, продолжительность измерения обычно постоянна (180-300 с) и принимается несколько больше, чем период релаксации. В эксперименте измеряют глубину погружения при уменьшающейся скорости, которая в пределе достигает нуля.

**Четвертый метод** позволяет по площади диаграммы определить **энергию деформирования**, а ордината на диаграмме показывает усилие. Кроме этого в приборах этой группы энергию можно вычислить по мощности, если они снабжены самопишущим и показывающим ваттметром или счетчиком.

Для расчета многих производственных процессов (перемешивания, измельчения, транспортирования и пр.) энергия – основной показатель. Поэтому результаты, полученные на приборах, моделирующих натуральные процессы, могут оказаться полезными для выполнения ряда инженерных и экономических расчетов.

В некоторых случаях измерение структурно-механических характеристик одного продукта различными способами дает неодинаковые результаты. Способ измерения характеризуется определенными геометрическими, кинематическими и динамическими параметрами прибора и условиями проведения опыта. Указанные параметры и условия

обусловлены теоретическими положениями, которые могут быть не всегда корректно учтены.

Рассмотрим классификацию вискозиметров. **Вискозиметры** подразделяются на:

- 1. капиллярные**
  - свободного истечения
  - истечения под давлением
- 2. с падающим шариком**
  - электромагнитные
  - оптические
  - радиационные
  - с падающим поршнем
- 3. ротационные**
  - с коаксиальными цилиндрами
  - с параллельными дисками
  - с вращающимся телом
- 4. вибрационные**
  - колебательные:
    - низкочастотные
    - ультразвуковые
- 5. основанные на других методах**
  - желобковые
  - основанные на регистрации пузырьков
  - ротаметрические

## 2. Измерение сдвиговых характеристик

Сдвиговые свойства проявляются при касательном смещении слоев продукта. Приборы для измерения указанных свойств по принципу действия делят на следующие группы:

- ротационные;
- капиллярные;
- пенетрометры;
- приборы с плоскопараллельным смещением пластин и др.

**Ротационные вискозиметры** обладают рядом преимуществ по сравнению с другими. В настоящее время насчитывается более сотен конструкций ротационных вискозиметров, которые можно разделить на две основные группы. К первой относят приборы, имеющие постоянный момент вращения ротора при переменной частоте вращения, ко второй – приборы, имеющие постоянную частоту вращения ротора при переменном вращающемся моменте. В России наибольшее распространение получили ротационные вискозиметры системы РВ-8 проф. Воларовича, относящиеся к первой группе и вискозиметры «Реотест», относящиеся ко второй. Рассмотрим принципиальные схемы ротационных вискозиметров.

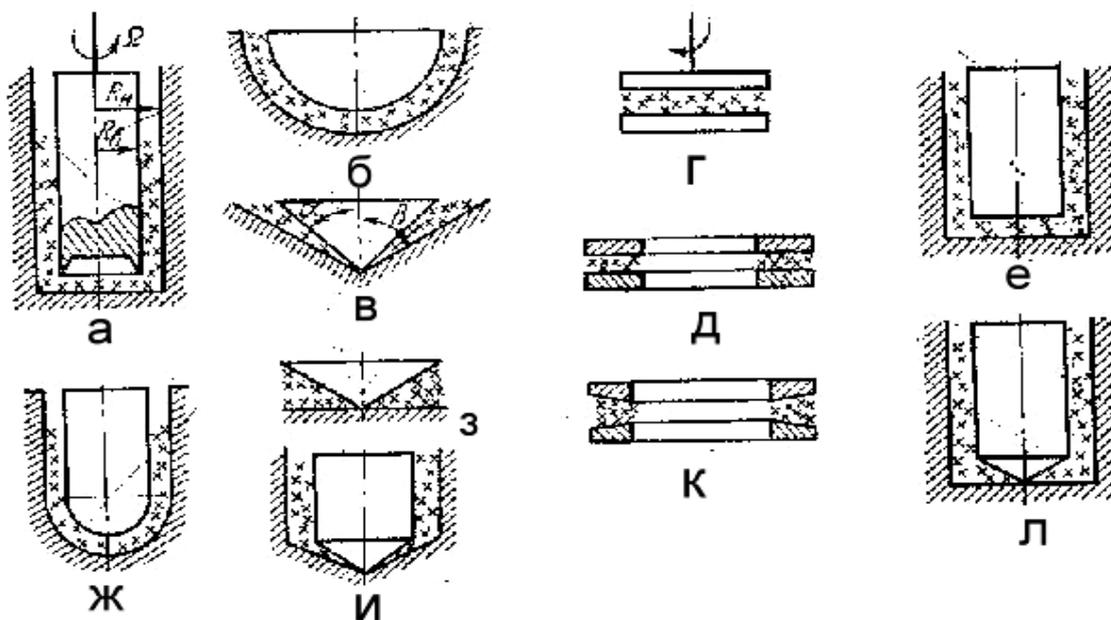


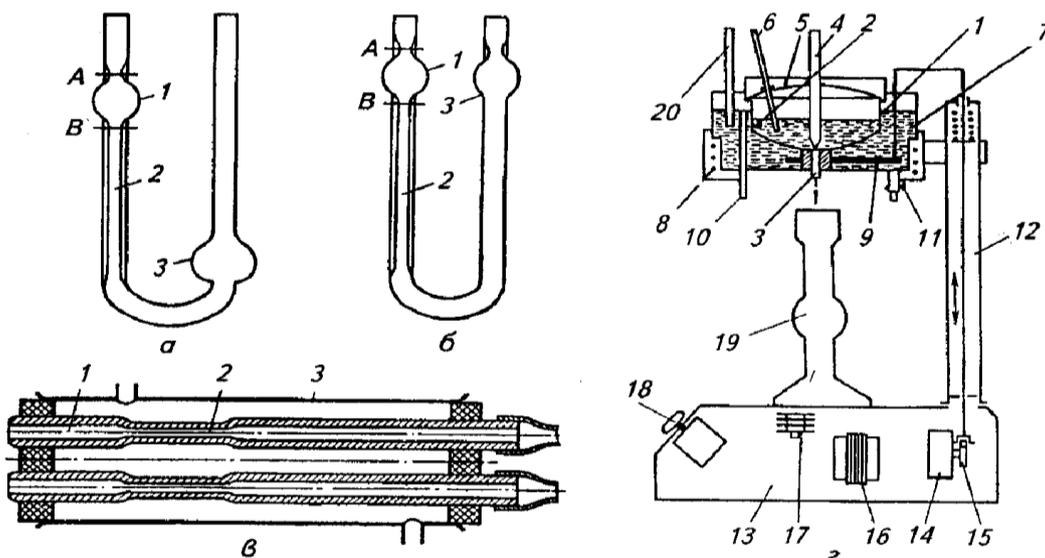
Рис. 4 Принципиальные схемы ротационных вискозиметров

а – коаксиальные цилиндры; б – сферы или полусферы; в – два конуса; г – две плоскопараллельные пластины; д – два плоских кольца; к - два конических кольца; е – цилиндр-диск; ж – цилиндр-полусфера; з - конус-диск; и – цилиндр-конус; л – цилиндр-конус-диск.

Наибольшее распространение в пищевой промышленности получили **коаксиально-цилиндрические комбинированные поверхности** для измерения характеристик вязких и пластично-вязких продуктов (Рис. 8 а, ж, л).

На ротационных приборах экспериментально получают зависимости крутящих моментов от угловой скорости вращения измерительной поверхности.

**Вискозиметры капиллярные и с падающим шариком.** Общим для приборов этого типа является наличие капилляра, устройства для измерения расхода или объема жидкости и системы, обеспечивающей создание гидростатического давления. В качестве капилляра может быть использована трубка диаметром от долей миллиметра до 2-3 мм для измерения вязкости ньютоновских и маловязких неньютоновских жидкостей. Полученные результаты не зависят от диаметра трубки. Для неньютоновских жидкостей с более высокой вязкостью и пластично-вязких систем диаметр капилляра может достигать нескольких десятков миллиметров, а результаты измерений часто зависят от диаметра.



**Рис. 5** Принципиальные схемы вискозиметров для определения вязкости ньютоновских жидкостей и жидкообразных систем.

**а** – Оствальда; **б**- Убеллоде: 1-шарик для измерения объема протекающей жидкости через капилляр жидкости, 2- капилляр, 3 – шарик для сбора жидкости; **в** – **с** двумя параллельно работающими капиллярами: 1-широкая трубка, 2-капилляр, 3-водяная рубашка; **г** – вискозиметр Энглера: 1-латунная ванна, 2- крючки для контроля уровня исследуемой жидкости, 3-капиллярный насадок, 4-стержень, 5-крышка ванны, 6-термометр, 7-водяная баня, 8-электродвигатель, 9-мешалка, 10-перепускная трубка, 11-сливной кран, 12-стойка, 13-основание прибора, 14-электропривод мешалки, 15-кулачок-толкатель, 16-трансформатор, 17-выпрямитель переменного тока, 18-переключатель терморегулятора, 19-мерный приемник жидкости, 20 – термометр.

**Способ измерения вязкости с помощью падающего шарика** в широкой трубке, реализующий **закон Стокса**, успешно используется для ньютоновских или слабоструктурированных жидкостей. Однако он не применим для изучения свойств пластично-вязких, структурированных систем. Действие вискозиметров с движущимся в исследуемой среде шариком основано на законе Стокса; вязкость определяется по скорости прохождения падающим шариком промежутков между метками на трубке вискозиметра. Предельную скорость  $V_{np}$  падения шарика малых размеров в вязкой жидкости находят по формуле Стокса:

$$V_{np} = \frac{2 r^2 g (\rho' - \rho)}{9 \eta}, \quad (32)$$

где  $\rho'$  и  $\rho$  - плотность жидкости и вещества шарика,  $g$  - ускорение свободного падения.

Наиболее распространен **вискозиметр Геплера**, хотя закон Стокса, которым описывается движение шарика, здесь соблюдается частично.

На ряду с ротационными, капиллярными и шариковыми вискозиметрами существует огромное количество различных приборов для определения реологических свойств при относительном сдвиге слоев исследуемого продукта. Так для **определения предельного напряжения сдвига**  $\theta_0$  используют приборы, принцип действия которых основан на погружении индентора в исследуемую среду. Для исследований в пищевой промышленности получили широкое распространение **пластометры** или **пенетрометры** с инденторами в виде конусов с различными углами при вершине, а также **консистометры**.

Из-за простоты устройства и надежности среди разнообразия пластометров выделяется **конический пластометр П.А. Ребиндера, конический пластометр Воларовича, и пластинчатый пластометр Жуховицкого и Гуткина**. Индентор – внедряемое в продукт тело – может иметь различную форму: конус, сферу, нож, иглу. Предельное напряжение сдвига определяется по глубине погружения конуса и вычисляется по формуле:

$$\theta_0 = K \frac{m}{h^2}, \quad (27)$$

где  $K$  – константа конуса (Н/кг), зависящая от угла конуса при вершине;

$m$  – масса подвижной части прибора, кг;

$h$  – общая глубина погружения конуса, м.

Для оценки консистенции **мяса и колбас (сыра)** применяются различные **консисометры**. С помощью одних консисометров измеряют две величины – перемещение штока относительно корпуса и усилие вдавливания, которое определяется степенью сжатия пружины (консисометр В. Шарнера). Другие консисометры предназначены для отбора пробы и одновременного определения предельного напряжения сдвига мяса (сыра) и др. продуктов (консисометр В.П. Табачникова, Е.Я. Баркова). Для этого определяют внешний момент, приложенный к головке, который равен моменту силы сопротивления (среза) на цилиндрической части прибора по формуле, затем определяют предельное напряжение сдвига, также по формуле.

**Приборы с двумя плоскопараллельными пластинами** служат для измерения сдвиговых характеристик в области практически не разрушенных структур при малых величинах деформаций. Такие приборы состоят из двух рифленых пластин для исключения проскальзывания продукта. Нижняя пластина не подвижна, верхняя подвижна. Для **определения вязкости** продукта пользуются **уравнением Ньютона**.

Наряду с этими традиционными приборами используют приборы, основанные на других способах.

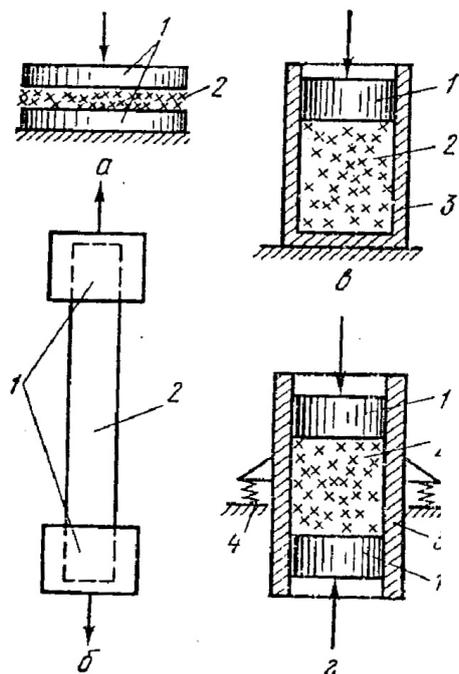
Для контроля структуры и консистенции **сыра** предложен прибор, в котором рабочий органом является **струна**. По усилию резания струной можно судить о консистенции сыра.

Готовность **фарша** при куттеровании можно определять приборами с упругой балкой консольного типа. На конце консоли закреплен рабочий орган, состоящий из сферы, пластины, штока и др. В процессе куттерования фарша изгиб балки увеличивается, а при достижении максимума куттер перестает работать.

Большое распространение в мясной и молочной промышленности получил метод среза продукта (по А.С. Большакову и А.К. Фомину) – между поверхностями плоских пластин; между цилиндрами (по Г.Е. Лимонову), при вдавливании поршня диаметром 0,04 м (по Е. Пуоланне) и др.

### 3. Измерение компрессионных характеристик

Наряду со сдвигом объемное или осевое сжатие, а также осевое растяжение являются основными типами механической деформации продуктов. В ряде машин (прессов, волчков, дозаторов, шприцев и т.д.) продукты находятся при повышенных давлениях, что изменяет их



**Рис.6** Принципиальные схемы приборов для определения компрессионных характеристик

**а** – осевого сжатия: 1-пластины, 2-продукт;  
**б** – осевого растяжения: 1-зажимы, 2-продукт;  
**в**- одностороннего объемного сжатия: 1-поршень, 2-продукт, 3-цилиндр; **г** – двустороннего объемного сжатия: 1-поршни, 2-продукт, 3-цилиндр, 4-пружинные подвески цилиндра.

экстенсограмма),

**Н.И. Назарова** и **Ю.В. Калинина** (осциллограмма), **прибор Ю.А. Мачехина** и др., где деформация образца производится до разрыва.

Для **объемного сжатия** применяют различные приборы. Наиболее распространены **акалориметр** и **консистометр Гепплера**.

Результаты экспериментов на этих приборах позволяют вычислить относительные деформации и построить кинетические зависимости и т.к. масса продукта известна, дают возможность определить плотность при различных давлениях.

#### 4. Измерение поверхностных характеристик

Поверхностные свойства пищевых продуктов – адгезия и внешнее трение – появляются на границе раздела между продуктом и твердой поверхностью. Приборы и методы измерения адгезии основаны на разрушении адгезионного шва путем приложения внешнего усилия. По способу приложения усилия различают методы отрыва (равномерного и неравномерного) и сдвига. Приборы для измерения адгезии называются **адгезиометрами**. Измеряют удельное усилие разделения двух тел, полученное значение называют давлением прилипания или липкостью.

Приборы для **определения внешнего трения** называются **трибометрами**. Классический тип прибора для измерения коэффициента внешнего трения представляет собой пару тел, соприкасающихся плоскими поверхностями, одно из тел смещается

первоначальный объем и плотность. На выходе из машины объем и плотность также могут отличаться от начальных. Сжатие продукта между двумя пластинами используют также для оценки консистенции продукта (рис 10 а). Для приборов осевого сжатия методика работы практически одинакова, конструктивные схемы приборов различаются лишь по способу привода пластины (снизу, сверху, от электродвигателя или непосредственно от груза).

К приборам, измеряющим структурно-механические характеристики продуктов **при осевом сжатии и растяжении** можно отнести различные **дефометры**, которые позволяют регистрировать деформации и нагрузки во времени. Определение характеристик пищевых продуктов при осевом сжатии может производиться также на некоторых типах пенетрометров, при замене рабочего органа круглой пластиной.

К приборам для **растяжения продукта** можно отнести: **экстенсографы** (вычерчивается прибором кривая растяжения – **прибор**

относительно другого. Сила смещения измеряется тензометрическими, пружинными или другими датчиками.

Мы рассмотрели основные классические виды приборов для измерения структурно-механических характеристик, в настоящее время на основании классических приборов разрабатываются и производятся все более совершенные приборы, полностью автоматические. На практических занятиях мы с вами рассмотрим как классические, так и новые модернизированные приборы.

#### Вопросы для самоконтроля

1. Классификация приборов для измерения структурно-механических свойств.
2. Вискозиметры. Классификация, область применения. Характеристика капиллярного метода измерения вязкости. Достоинства и недостатки.
3. Пенетрометры. Виды, область применения.
4. Методы и приборы для измерения сдвиговых свойств, компрессионных и поверхностных свойств.

### Лекция 7

#### Реологические исследования

1. Реологические исследования течения пищевых масс в каналах и органах машин.
2. Приборы и стенды для реологических исследований рабочих органов машин.
3. Основные методы дисперсного анализа пищевых продуктов.

#### 1. Реологические исследования течения пищевых масс в каналах и органах машин

Перемещение вязких и пластично-вязких пищевых масс в различных каналах и рабочих органах машин приобретает все большее значение в связи с механизацией и автоматизацией, а также созданием новых, высокопроизводительных машин. Технологический процесс на предприятиях пищевой промышленности характеризуется операциями различной продолжительности. Увязку этих операций осуществляют транспортными средствами, которые должны способствовать сглаживанию различных ритмов отдельных операций.

По трубопроводам транспортируются разнообразные мясные (молочные) продукты, такие как:

Таблица 6

Мясные продукты	Молочные продукты
1. жидкости и эмульсии	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- кровь</li> <li>- расплавленный жир</li> <li>- бульон</li> <li>- жироводяные эмульсии</li> <li>- рассол</li> <li>- моющий раствор</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- молоко, обезжиренное молоко</li> <li>- сливки</li> <li>- сгущенное молоко</li> <li>- кисломолочные продукты</li> <li>- моющий раствор</li> </ul>
2. Суспензии и кусковые продукты	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- жирсодержащие сырье</li> <li>- конфискаты дробленные</li> <li>- конфискаты не дробленные</li> <li>- кость дробленная</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- жирсодержащее сырье</li> </ul>
3. Пластично-вязкие	

<ul style="list-style-type: none"> <li>- мясной фарш</li> <li>- колбасный фарш</li> <li>- ливерный фарш</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- творог</li> <li>- творожные массы</li> <li>- сметана</li> <li>плавленый сыр</li> </ul>
--	---

От вида продукта зависит способ подачи (разные типы насосов), диаметр и длина трубопровода.

Для расчета течения неньютоновских жидкостей можно пользоваться таблицами, полученными в результате опыта эксплуатации существующих устройств, эмпирическими формулами, найденными в результате специальных экспериментов, уравнениями, выведенными на основе теоретических предпосылок о закономерностях движения, и методами, основанными на установлении связей между дифференциальными и интегральными характеристиками потока.

При выполнении реологических исследований необходимы экспериментальные стенды, которые позволяют определить и варьировать в установленных пределах следующие величины:

1. Геометрические факторы: площадь и линейные размеры (длина и диаметр трубы, насадки, лопасти и т.д.), относительная шероховатость и материал обтекаемого тела.
2. Кинематические факторы: средняя скорость движения потока в канале или скорость движения лопасти в продукте, распределение скоростей и деформаций по сечению продукта, секундные расходы.
3. Динамические факторы: давление в начале канала или удельное усилие сопротивления, а также реологические свойства, определяемые специальными приборами.
4. Энергетические факторы: расход энергии или развиваемая мощность – по своей сущности аналогичны динамическим по площади на диаграммной ленте.

## 2. Приборы и стенды для реологических исследований рабочих органов машин

В реологических исследованиях одной из важных величин является давление. Его измерение в жидких средах не вызывает трудности, так как имеется множество серийно выпускаемых приборов. Для измерения давления в пластично-вязких средах серийных приборов практически нет, поэтому используют датчики той или иной конструкции в зависимости от исследуемого тела. Датчики широко используют на практике для измерения давления пластично-вязких продуктов: в вискозиметрах, в цилиндрах при объемном сжатии, в трубопроводах при течении в них продукта и т.д.

Для лабораторных и промышленных исследований применяют следующие виды приборов:

1. Жидкостные (гравитационные);
2. Механические;
3. Электрические

Наиболее распространены разнообразные по конструкции механические и электрические датчики. Электрические датчики малогабаритны и позволяют измерять различные по величине давления с автоматической записью измеряемой величины, их применяют в любых режимах работы (статических, при измерении переменного давления и т.д.).

Для измерения физических величин используют различные электрические самопишущие приборы (ваттметры, потенциометры, осциллографы и пр.).

Для проведения реологических исследований рабочих органов машин и аппаратов не достаточно иметь перечень приборов, необходимо уметь сделать экспериментальный стенд или воспользоваться уже готовым промышленным стендом.

Стенд для проведения реологических исследований должен легко измерять геометрические, кинематические, динамические и энергетические факторы.

Он должен иметь:

1. набор сменных рабочих органов различного размера;
2. побудитель движения с регулируемой подачей или регулируемым давлением, скорость движения или частота вращения рабочего органа должны легко изменяться;
3. материал для тарировки, наладки стендов (целесообразно применять модельный продукт с заранее заданными реологическими свойствами).

Тарировку и наладку экспериментальных стендов в ряде случаев целесообразно проводить на модельном материале. Пищевые массы являются ценными и дорогостоящими продуктам, их свойства существенно меняются во времени, при интенсивном механическом воздействии (мятие в насосе) может происходить необратимое изменение реологических свойств. Поэтому использование натурального продукта для отладки и тарировки испытательных стендов, отработки методики экспериментов и получения первичных экспериментальных данных нецелесообразно. В качестве такого материала некоторые специалисты применяют пасту бентонитовой глины. Однако поиски в разработке модельного реологического материала должны продолжаться, т.к. глиняная паста как модельный материал наряду с рядом достоинств имеет и свои недостатки (влияние влажности на свойства пасты). В ряде стран разработаны модельные материалы, реологические свойства которых менее чувствительны к изменению влажности.

Стенд для испытания трубопроводов должен иметь набор труб различного диаметра, причем для каждого диаметра обеспечивают возможность получения различной длины путем составления отрезков по 1,5-2,5 м. Для установки датчиков давления необходимо использовать короткие трубы (1,15-2,0 м) одинакового диаметра с основной трубой. Материал труб при транспортировке, как правило, не влияет на сопротивление течению пластично-вязких продуктов, так как к стенке прилипает тонкий слой мелкодисперсного вещества за счет высокой адгезии: шероховатость и адгезионная активность обезличиваются.

Примером метода реологических исследований может служить метод рентгеновского просвечивания. Для этого полиэтиленовую трубку заполняют продуктом, устанавливают на стенд и включают насос. Кинетику развития деформаций можно наблюдать визуально и фотографировать с помощью рентгеновской установки.

В теории капиллярной вискозиметрии получено уравнение движения любых сред в общем виде:

$$\frac{4V_c}{\pi R} = \frac{4}{\theta_c^3} \int_{\theta}^{\theta_c} \theta^2 \Phi(\theta) d\theta, \quad (28)$$

где  $V_c$  - объемный расход, м<sup>3</sup>/с;

$R$  - внутренний радиус трубы, м;

$\theta_c$  - напряжение сдвига на стенке трубы, Па;

$\theta$  - напряжение сдвига в любом слое на расстоянии  $r$  от оси трубы, Па;

$\Phi(\theta)$  - функция градиента скорости от напряжения сдвига, с<sup>-1</sup>.

### 3. Основные методы дисперсного анализа мясных (молочных) продуктов

Существует огромное количество методов исследования дисперсного состава веществ, около 70. Мы с вами рассмотрим основные методы исследований пищевых продуктов.

#### 1. Ситовой метод

Этот метод наиболее широко применим в мясной и молочной промышленности, так как требует простейшее аппаратное оформление и методику анализа. Ситовый метод позволяет получить интегральную характеристику дисперсного состава продукта, дающую

представление о размерах некоторой совокупности частиц. Ситовый метод дисперсного анализа достаточно прост и заключается в разделении на фракции частиц разного диаметра посредством пропускания анализируемого вещества через набор сит с различными размерами отверстий.

Сита выпускаются промышленностью металлические и неметаллические (из капрона, шелка, нейлона и т.д.). В мясной (молочной) промышленности большое распространение получили металлические сита: пробивные (со штампованными отверстиями различных форм) и проволочные, а также синтетические волокняные. В практике ситовой метод применяется преимущественно для дисперсного анализа порошкообразных мясных (молочных) продуктов.

## **2. Седиментационные методы**

Седиментационные методы анализа основаны на использовании характерной способности дисперсных систем к разделению в поле действия гравитационных или центробежных сил. Явление седиментации, кроме дисперсного анализа, широко применяют в народном хозяйстве для разделения фаз и классификации дисперсной фазы в различных технологических процессах, например в отстаивании, центрифугировании, гидравлической классификации, воздушной сепарации и т.д. В зависимости от соотношения плотностей дисперсной фазы и дисперсионной среды частицы могут осаждаться (седиментация) либо всплывать (обратная седиментация). Применяют различные анализаторы, такие как седиментометры (с тормозными весами, Вигнера) или пипеточные приборы.

Седиментационный метод дисперсного анализа в поле действия центробежных сил, позволяющий определять дисперсный состав веществ с размерами частиц менее 1 мкм, осуществляется с помощью специального оборудования: центрифуг и ультрацентрифуг.

Ввиду того, что методы седиментационного анализа применяют в основном с использованием жидкой среды, они неприменимы для определения размеров частиц, взаимодействующих с дисперсионной средой.

## **3. Микроскопический метод**

Этот метод имеет самое широкое применение для оценки дисперсного состава мясных (молочных) продуктов. В отличие от ситового и седиментационных методов, относящихся к интегральным, микроскопический метод, основанный на измерении геометрических параметров каждой частицы в отдельности с помощью микроскопа, обладает более высокой точностью и может быть успешно применен для определения количества частиц определенного диаметра. Точность результата дисперсного анализа в большей мере зависит от способа отбора проб и приготовления препарата (нанесение на предметное стекло). Применяют различные микроскопы: электронные, сканирующие микроскопы и т.д.

### **Вопросы для самоконтроля**

1. Общие положения реологических расчетов пластично-вязких сред.
2. Факторы, являющиеся предметом реологических исследований.
3. Характеристика стендов для реологических исследований. Пример. Понятие о модельном материале.
4. Основные методы дисперсного анализа пищевых сред.

## **Лекция 8**

### **Реологические расчеты**

1. Насосы.
2. Устройства для пневмогидротранспортировки продуктов.
3. Реологические расчеты.

#### **1. Насосы**

**Насос**, устройство (гидравлическая машина, аппарат или прибор) для напорного перемещения (всасывания и нагнетания) различных жидкостей в результате сообщения им внешней энергии (потенциальной и кинетической).

Устройства для напорного перемещения жидкостей разделяют на виды и разновидности по различным признакам, например по принципу действия и конструкции. Насосы можно также условно разделить на **2 группы: насосы-машины**, приводимые в действие от двигателей, и **насосы-аппараты**, которые действуют за счёт иных источников энергии и не имеют движущихся рабочих органов. Насосы-машины бывают лопастные (центробежные, осевые, вихревые), поршневые, роторные (шестерённые, колесчатые, пластинчатые, винтовые и др.). К насосам-аппаратам относятся струйные (жидкостно-жидкостные и газожидкостные), газлифты (в том числе эрлифты), вытеснители (в том числе паровые и газовые), гидравлические тараны, магнитогидродинамические насосы и др.

Основное конструктивное отличие насосов для перекачки пластично-вязких тел от насосов для вязких жидкостей объясняется наличием у первых предельного напряжения сдвига. Оно может обуславливать свободообразование перед рабочим органом, что в свою очередь является причиной уменьшения подачи продукта. Поэтому питание должно быть принудительным либо продукт через весьма широкое окно должен поступать непосредственно на рабочие органы насоса.

В мясной (молочной) промышленности применяют: центробежные, роторные, поршневые и мембранные насосы.

#### **Основные типы насосов для перекачки пластично-вязких тел:**

Для перекачки пластично-вязких тел применяют:

1. **Роторные насосы** – применяются для перемещения фарша, сгущенного молока, сливок, смеси для мороженого, творога и т.п.

- Одновинтовые насосы – имеют питающий, транспортирующий и напорный шнеки, к достоинствам можно отнести то, что путь, проходимый продуктом в сжатом состоянии не большой.

- Двухвинтовые – в таком насосе продукт как бы течет между двумя выступами винтов и проходит путь равный длине винтовой линии, что вызывает интенсивное смятие и перетирание продукта.

- Ротационно-шиберные насосы – в таких насосах зона нагнетания отделена от зоны всасывания, качающимся шибером, что является их преимуществом и упрощает конструкцию.

- Шестеренчатые – применяют для перекачки продуктов с небольшими значениями предельных напряжений сдвига.

- Роторно-поршневые (кулачковые) - конструкция насоса не снижает качества продукта при перекачке, дает возможность создать высокие давления, необходимые для перекачки продукта на большие расстояния.

2. **Центробежные насосы** – перекачивают мясной бульон, цельное и обезжиренное молоко, сыворотку (сгущенное молоко без сахара) или таких продуктов, на качество которых не влияет перемешивание. Выпускают лопастные, дисковые и самовсасывающие.

- Эксцентриково-лопастные – в таких насосах продукт интенсивно перетирается, что в ряде случаев вызывает ухудшение качества (из-за перепуска при повышении давления).

3. **Поршневые насосы** – используют для подачи сгущенного молока в сушильно-распылительные установки, для подачи фарша.

- Поршневые насосы-шприцы - они обладают сравнительно высоким КПД и независимостью (в принципе) подачи от напора, что позволяет использовать их в качестве дозирующих.

4. **Шланговые насосы** – Продукт находится в эластичном шланге, из которого выдавливается роликами, к достоинствам можно отнести то, что переносимый объем продукта из зоны всасывания в зону нагнетания остается неизменным.

5. **Мембранные насосы** – подобны поршневым, отличие заключается в том, что поршень от перекачиваемого продукта отделен мембранной, изготовленной из пищевой резины. Достоинством насосов этого типа является отсутствие уплотнений и прямого контакта рабочего органа с продуктом.

### **Основные требования к насосам для перекачки продуктов следующие:**

1. Насос должен представлять собой отдельную компактную машину с загрузкой продукта в бункер накопитель, откуда он поступает непосредственно на рабочие органы.
2. Место входа должно иметь достаточный размер, чтобы исключить зависание, «свободообразование» продукта.
3. Наличие питающих устройств – шнеков, лопастных колес и т.п. нежелательно в том случае, когда не допускается смятие и перетирание продукта.
4. Сопряжения рабочих органов должны быть такими, чтобы в зоне всасывания создавался вакуум.
5. Возврат продукта (обратный перепуск) в зону всасывания через зазоры под действием давления в зоне нагнетания должен быть минимальным.

### **2. Устройства для пневмогидротранспортировки продуктов (трубопроводы)**

При проектировании систем пневмогидротранспортных трубопроводов предусматривают следующее:

- установку индивидуальных трубопроводов для каждого вида транспортируемого материала;
- расширение номенклатуры продуктов, транспортируемых методом напорного пневмотранспорта;
- разработку приборов для измерения и записи давления в процессе движения продуктов;
- создание испытательного стенда для исследования процесса пневмогидротранспортировки;
- разработку методики расчета пневмогидротранспорта на основе экспериментальных данных.

Основные части пневмогидротранспортных линий – это рабочие транспортные трубопроводы. Диаметр трубопровода зависит от вида транспортируемого материала. Все соединения должны быть герметичны, местные сопротивления минимальны, а износ- и вибростойкость высокими.

Линию трубопровода прокладывают по кратчайшему пути без искривлений. Транспортный трубопровод часто меняет свое направление в горизонтальной и вертикальной плоскостях, поэтому большое влияние на потери давления оказывают радиусы его изгибов.

По сравнению с другими видами транспорта, применяемого в цехах, пневмогидротранспорт имеет большую сменную производительность, дает производить транспортировку продуктов даже в стесненных условиях производственных площадей, позволяет устранить потери продуктов в результате герметичности их перемещения, улучшает санитарное состояние цехов и отделений, надежен в эксплуатации из-за отсутствия движущихся частей и узлов, создает возможность автоматизации производства.

### **3. Реологические расчеты**

Для наладки технологического процесса и для конструирования новых машин и аппаратов производят специальные реологические расчеты:

- расчет трубопроводного транспорта
- расчет процесса дозирования
- расчет процесса перемешивания
- расчет процесса неизотермического движения пластично-вязких продуктов по трубопроводам
- расчет процесса истечения

### **Расчет трубопроводного транспорта**

Перед проектированием установки для трубопроводного транспорта необходимо определить следующие параметры:

- диаметр трубопровода;

- давление продукта на входе в трубу;
- мощность для выполнения прочностных расчетов и для подбора электродвигателя.

Более подробно расчет трубопроводного транспорта рассмотрим на практическом занятии.

### **Расчет процесса дозирования**

Процессы дозирования по назначению очень многообразны. Одной из основных задач дозирования является создание базы для механизации и автоматизации производственных процессов при одновременном обеспечении точности и соблюдения рецептуры. Наиболее типичными функциями дозирования являются отмеривание продукта по заданному объему, массе, длине и поддержание заданного объемного или массового расхода. Для реализации последнего кроме специальных дозирующих устройств используют расходомеры и насосы-дозаторы с постоянной производительностью.

Различают два основных метода дозирования:

- по объему
- по массе.

При объемном дозировании реологические свойства продукта и способ заполнения формы определяют процесс и конструкцию машины, при массовом – имеют второстепенное значение.

Рассмотрим процесс объемного дозирования.

Заполнение формы пластично-вязким продуктом представляет собой нестационарный процесс. Продукт, подходя к форме, деформируется и движется в ней, имея выпуклую поверхность. При подходе к крышке или дну формы скорость продукта замедляется и начинается заполнение углового пространства. Процесс считается законченным, когда весь объем формы занят продуктом. Необходимое для этого давления складывается из следующих составляющих: потери в местных сопротивлениях – внезапное сужение на входе в форму  $p_m$ ; потери при движении по длине формы  $p_{дл}$  и давление, необходимое для окончательного заполнения формы  $p_{сж}$  (его значение определяют в центре крышки, когда угловые пространства заполнены продуктом).

Продолжительность заполнения известна, объем и геометрические размеры определяются назначением формуемого продукта, поэтому в качестве основной расчетной величины можно принять полное давление, которое необходимо создать перед формой для ее заполнения в заданный промежуток времени. Если давление превышает необходимое, то продукт сжимается, плотность его увеличивается (компрессионная характеристика), что приводит к появлению «оплоя» (подобие языков сбоку формы) при выходе дозы из замыкающего звена. При недостаточном давлении масса дозы получается меньше установленной.

Таким образом полное оптимальное давление  $p$  (Па) перед входом в форму составит:

$$p = p_m + p_{дл} + p_{сж} \quad (29)$$

Составляющие общего давления вычисляются по зависимостям, в которых учитываются такие реологические характеристики, как эффективная вязкость, плотность продукта, а также средняя скорость заполнения дозатора, длина дозатора и эквивалентный диаметр поперечного сечения формы и различные коэффициенты.

Так как плотность продукта при увеличении давления увеличивается, то целесообразно корректировать объем формы для найденных величин давления и плотности с тем, чтобы получать дозы постоянной массы.

### **Расчеты процесса неизотермического движения пластично-вязких продуктов по трубопроводам**

Это движение, связано с нагреванием и имеет как вспомогательное, так и самостоятельное значение. Первый случай может реализоваться, когда за счет нагрева у стенки трубы образуется пленка, играющая роль смазки. Расчеты показывают, что общее нагревание продукта за 6-8 с пребывания в трубе составляют около  $1^\circ\text{C}$ , когда поверхность трубы имеет температуру около  $40-50^\circ\text{C}$ , т.е. выше температуры плавления жира. Второй

случай связан с нагреванием всей массы продукта, поэтому скорость его движения должна быть небольшой. Во избежание «заклинивания» трубопровода при нагревании белковых денатурируемых систем температура не должна быть выше температуры денатурации (35-40°C).

Рассчитывают скорость движения продукта по трубе при нагревании его до заданной температуры:

$$w = \frac{l}{\tau} = 1,1 \frac{al}{d^2} \exp \left( -0,45 \frac{t_c - t_{ocn}}{t_c - t_o} \right), \quad (30)$$

где  $\frac{t_c - t_{ocn}}{t_c - t_o}$  - безразмерная температура на оси трубы;

$t_c$  – температура стенки трубы, К;

$t_o$  – начальная температура продукта, К;

$t_{ocn}$  – температура продукта на оси трубы на выходе из нее, К;

$l$  – длина трубы, м;

$\tau$  – время пребывания продукта в трубе, с;

$a$  – коэффициент теплопроводности, м<sup>2</sup>/с.

Эта формула справедлива при  $0,2 < \frac{t_c - t_{ocn}}{t_c - t_o} < 0,9$  для диаметров от 0,02 до 0,07 м при отсутствии конвективных токов в трубе.

Также рассчитывают коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  (Вт/(м<sup>2</sup>·К)) от трубы по различным уравнениям, в зависимости от продукта (вязкий, степенная жидкость, пластично-вязкий). При расчете этого коэффициента учитывают предельное напряжение сдвига, вычисленное при температуре в центре потока и на стенке трубы (Па).

#### Расчет процесса перемешивания

Давление на лопасть  $p$  (Па) при ее движении в пластично-вязком продукте, исходя из критериального уравнения определяют по уравнению:

$$p = 1600 d^{-0,2} \eta \omega^n = 1600 B d^{-0,2} w^n, \quad (31)$$

#### Расчет процесса истечения

При истечении через отверстия и насадки общее давление перед входом складывается из потерь при внезапном сужении (вход) по длине, которые отнесены к входному диаметру и потерь при расширении или сужении потока за счет конусности.

#### Вопросы для самоконтроля

1. Основные требования предъявляемые к насосам.
2. Исследование насосов и их основные характеристики.
3. Основные реологические расчеты.

### Лекция 9

#### Качество пищевых продуктов

1. Актуальность проведения контроля за технологическими процессами и качеством продукции.
2. Применение пищевых добавок для улучшения реологических характеристик пищевых продуктов.

#### 1. Актуальность проведения контроля за технологическими процессами и качеством продукции

Контроль, управление технологическими процессами можно проводить на конкретном реометре и связав эти параметры с другими показателями технологического процесса (температурой, плотностью, компонентным составом дисперсной среды), производя таким образом своеобразное тарирование системы контроля и управления.

### **Рассмотрим некоторые примеры влияния технологических факторов на качество мясных продуктов**

При температуре примерно 35°C в фарше начинается денатурация белков, и фарш из пластично-вязкого состояния переходит в упругое. С повышением температуры связи в водно-белково-солевых прослойках ослабляются за счет уменьшения вязкости растворителя и более интенсивного теплового движения молекул. Это ведет к ослаблению прочности структуры в целом. При повышении температуры от 2 до 23 °С происходит быстрое разрушение структуры (прочность уменьшается), при 25-35 °С – уменьшается темп разрушения, в связи с денатурацией белка.

С повышением влажности фарша утолщаются жидкостные прослойки дисперсионной среды между частицами, уменьшается концентрация белков в растворе прослоек, снижается их вязкость, следовательно, прочность структуры и значения структурно-механических свойств.

При повышении давления происходит перераспределение дисперсионной среды в системе и изменение размера частиц. Кроме того, приложенное давление вызывает переориентацию частиц, более компактную их упаковку с одновременным их деформированием.

В результате любого механического воздействия (перемешивания, растирания, измельчения) на продукт изменяются величины его физических свойств и технологические показатели. При куттеровании происходит тонкое измельчение мяса, что позволяет получить фарш с определенными технологическими характеристиками, которые предопределяют качество готовых изделий. На качество продукта влияют тип измельчающей машины, но процессы независимо от принятых машин протекают одинаково, отличаются лишь значения свойств и длительность достижения заранее заданных величин.

### **Рассмотрим некоторые примеры влияния технологических факторов на качество молочных продуктов**

При хранении сгущенного молока с сахаром его вязкость увеличивается. Перемешивание или какое-либо другое механическое воздействие ведет к лавинному разрушению структуры и наибольшая вязкость резко уменьшается. При дальнейшем старении структура восстанавливается.

В процессе производства кефира реологические методы исследования можно применять как для контроля качества продукта в процессе его приготовления, так и для оценки качества готового продукта. Установлено, что с изменением рН среды, накоплением продуктов брожения, характеризующих вкус кефира, изменяются структурно-механические свойства продукта. Для получения кефира хорошего вкуса и качества его необходимо перемешивать при рН 4,4-4,5, когда продукт имеет структуру высокой прочности, которая сохраняет свои свойства при последующем механическом воздействии и в процессе хранения.

Сливочное масло в зависимости от температуры может представлять собой ньютоновскую жидкость, псевдопластичную и пластично-вязкую системы. Температурные зависимости адгезии и аутогезии масла имеют характерный максимум при 15 °С, совпадающий с температурной зоной интенсивного плавления молочного жира и резкого падения прочностных показателей. При этом наблюдается наибольшая разница между силами аутогезии и адгезии масла, обеспечивающая максимальную возможность для фасовки масла.

В современной мясоперерабатывающей и молочной промышленности наблюдается интенсивный рост требований к потребительским свойствам продукции. Стремление технологов мясной (молочной) индустрии добиться оптимального соотношения цена – качество вынуждает их использовать нетрадиционные подходы к решению производственных проблем с целью удовлетворения потребностей всего спектра рынка, учитывая запросы и покупательскую способность различных групп населения.

В таких условиях огромная роль отводится использованию пищевых добавок, каждая группа которых несет свои потребительские или технологические функции. Для изменения реологических характеристик пищевых продуктов и придания им необходимой формы применяют определенную группу полисахаридов, в частности гидроколлоидов – группу веществ растительного (за очень редким исключением) происхождения, способных образовывать с водой коллоидные системы: либо очень густые растворы (загустители), либо твердые гели (гелеобразователи).

## **2. Применение пищевых добавок для улучшения реологических характеристик пищевых продуктов**

Пищевые добавки по природе сырья, из которого они производятся могут быть микробиологического, растительного и полусинтетического происхождения.

**В первую группу** попадает ксантановая, гелановая, рамзановая **камеди**, а также некоторые **маннаны**, последние пока не нашли применение в мясной и молочной промышленности.

**Вторая, основная группа**, включает две подгруппы:

- а) полисахариды, получаемые из наземных растений (крахмалы, камеди, пектины);
- б) гидроколлоиды, выделяемые из водорослей (агары, каррагинаны, альгиновая кислота, а также фурацелларан).

**Третья группа** включает химически модернизированные полисахариды (исходным сырьем в производстве являются, главным образом, целлюлоза и крахмал), КМЦ (карбоксиметилцеллюлоза и крахмал), модифицированные крахмалы, пропиленгликольальгинат и пр. Сюда можно отнести так называемые растительные волокна (пшеничная, картофельная, цитрусовая и другие клетчатки, микрокристаллическая целлюлоза). Они, как правило получают частичным кислотным гидролизом растительного сырья, глубиной которого регулируются длина волокон, хотя в их молекулы и не вводятся дополнительные функциональные группы.

Наибольшее распространение получили крахмалы – первые гидроколлоиды, нашедшие применение в пищевой промышленности, однако в истекшем столетии все большая роль стала отводиться агарам и каррагинанам в силу их способности создавать с водой необыкновенно прочные гели даже при низких концентрациях (менее 1 %). Агары используются в кондитерской и в меньшей степени в молочной промышленности, в мясопереработке широкого применения они не нашли (их используют частично при производстве мясных консервов). Они не нашли широкого применения в мясной промышленности из-за того, что высокая температура «срабатывания» агаров (примерно 90°C) закрыла им путь в большинство областей мясной промышленности. А вот область рабочих температур каррагинанов (<70°C) делает их привлекательными для мясной и молочной отраслей.

Основными функциональными характеристиками каррагинанов являются критическая концентрация гелеобразования и прочность геля. Однако не менее важным показателем являются и органолептические свойства.

Химическое понятие «каррагинан» включает природные сульфированные полисахариды, содержащиеся в красных морских водорослях. Практическое применение находят каррагинаны, в структуре которых преобладает каппа-каррагинан.

Коммерческое же понятие «каррагинан» еще шире: оно подразумевает стабилизационные системы гидроколлоидов, один из которых каррагинан. Кроме того, в таких системах присутствуют соли калия (как правило, хлорид). В качестве вспомогательных веществ обычно используют камеди.

При не правильном применении пищевых добавок повышается вязкость сырья, например, фарша, а желирующие свойства не достигаются.

Зачем используют другие гидроколлоиды, в частности загустители на фоне каррагинана?

1. Для снижения потери продукта при его термической обработке.
2. Готовая продукция в этом случае меньше подвержена процессу синерезиса. Например, цельномышечная продукция, шприцованная компактным каррагинаном будет постоянно отдавать влагу при хранении, что по сути не допустимо.
3. Функциональная активность смеси (вязкость) превышает сумму вязкостей компонентов. Например, 1% раствор ксантановой камеди имеет вязкость около 1500 Па·с, 1% раствор гуараовой камеди имеет вязкость до 5000 Па·с, а вязкость 1% раствора их смеси в определенных пропорциях достигает 7500 Па·с.

Активность добавок достигает оптимальных показателей при смешивании ингредиентов в правильно подобранных пропорциях, ведь не все пищевые добавки могут быть совместимы, например, добавление гуара приводит к разрыхлению агаровых гелей.

Последние годы все больший интерес вызывает конжак (коньяк глюкоманнан) в сочетании с каррагинаном, обладающий уникальными гелеобразующими свойствами. Его получают из клубней растения Аморфофаллус, произрастающий в Юго-Восточной Азии. Камедь, выделяемую из него, успешно используют в качестве многофункциональной пищевой добавки (для снижения веса, в диетическом питании). Он хорошо растворяется в холодной воде, что делает возможным его использование в рассолах для шприцевания цельномышечной мясной продукции.

В молочной промышленности наиболее подходящими структурообразующими добавками считаются полисахаридные комплексы. Их применение основано на взаимодействии с казеином, в результате которого образуются сеточные структуры в объеме молока, обуславливающие резкое возрастание вязкости и переход системы в гелеобразное состояние. Полисахариды обеспечивают структурообразующий эффект при низких концентрациях.

В пищевой промышленности существует большое многообразие пищевых добавок, которые необходимы при производстве продуктов питания.

Пищевые добавки помогают производителю продукта сделать свой товар более привлекательным, они влияют на вкус, аромат и консистенцию продукта, предотвращают изменение цвета, продлевают срок хранения продукта. Пищевые добавки не предназначены для употребления в пищу в чистом виде. Пищевые добавки вводят в продукт во время технологического процесса. В настоящее время существует около пятисот пищевых добавок, применяемых в различных странах.

Пищевые добавки по природе сырья, из которого они производятся, могут быть микробиологического, растительного и полусинтетического происхождения.

На изменение реологических свойств в большей степени влияют стабилизаторы, эмульгаторы (E 400-599).

**Ароматизаторы, вкусоароматические добавки** придают продуктам неповторимый вкус и аромат, усиливают натуральный вкус продукта, восстанавливают вкус и аромат, утраченный при переработке, хранении или транспортировке продуктов (продукты из замороженного мяса).

Вкусоароматические добавки имеют длительный срок годности, их легко транспортировать и хранить. Они могут проявлять свой вкус и аромат по-разному, что зависит от качества сырья, наличия консервантов в продукте, температуры переработки и т.д. В одном продукте часто используют сочетание нескольких ароматических добавок.

Вкусоароматические добавки высококонцентрированы и требуют определенной дозировки, которая зависит от технологии производства продукта и интенсивности вкуса и аромата.

**Агары (E 406), каррагинаны (E-407)** - пищевые добавки, выделяемые из водорослей.

При производстве сарделек, сосисок, колбас (полукопченых, вареных) и копченостей широко применяют каррагинаны, которые повышают выход готовых продуктов, улучшают структурно-механические характеристики продукта. При производстве цельномышечных продуктов каррагинаны придают монолитную структуру продукту, снижают термопотерю.

Каррагинаны представляют собой природные загустители, получаемые при переработке морских водорослей. Каррагинаны биологически активны, выводят из организма тяжелые металлы.

Каррагинаны широко используются в качестве вяжущего компонента при приготовлении пудингов, фруктовых йогуртов, диетических маргаринов и сливочного мороженого.

Агар – самый сильный желирующий агент. Водный раствор агара образует студни при охлаждении до 45<sup>0</sup>С. Температура плавления водного студня 80-90 °С. Агар используют при производстве мясных и рыбных студней, при изготовлении мороженого, где он предотвращает образование кристалликов льда.

**Пищевые фосфаты** широко применяют в мясоперерабатывающей промышленности. Пищевые фосфаты применяют в производстве мясных продуктов (колбас, сосисок, сарделек) для удержания влаги в продукте, в результате чего готовый продукт обладает нежной текстурой и остается сочным после термообработки, копчения. Пищевые фосфаты повышают выход продукции, обладают антиокислительными свойствами, улучшают консистенцию продукта, а также пищевые фосфаты помогают увеличить сроки хранения продукта. Пищевые фосфаты применяют при изготовлении ветчинных изделий из свинины, говядины, паштетов, различных колбас (полукопченых, ливерных, кровяных), продуктов из птицы, баранины и т.д.

**Животные белки** используют для улучшения структуры продукта, для частичной замены мясного сырья, что позволяет повысить питательную ценность продукции и снизить себестоимость готовой продукции. Животные белки снижают потерю влаги при термообработке, что важно при изготовлении сосисок, сарделек и шпикачек. Животные белки обладают нейтральным вкусом и запахом.

**Камеди** (ксантовая камедь, гуаровая камедь, камедь рожкового дерева и др.) широко используют в производстве соусов, молочных продуктов, напитков, хлебопекарных и мясных продуктов. Камеди обладают отличными структурообразующими свойствами, продлевают срок хранения продуктов. Применение камеди в производстве мясной продукции помогает увеличить вязкость фарша, смешиваемость, готовый продукт получается более пластичным, со стабильной структурой. Камеди уменьшают потерю влаги мясного продукта, что важно при тепловой обработке. Кроме того камеди имеют нейтральный вкус и низкую калорийность.

**Натуральный β-каротин** - наиболее распространенный натуральный пищевой краситель, получаемый методом экстракции из водорослей *Dunaliella salina*, стандартизированный по красящей способности в растительном масле. β-каротин полностью растворим в маслах и жирах.

Используется для придания желто-оранжевой окраски пищевым продуктам (маргарин, майонез, йогурты, сгущенное молоко, сыры, сладкие сырки, сыро-молочные продукты, глазури для мороженого, кондитерские изделия, макароны, хлебобулочные изделия), улучшения внешнего вида, восстановления цвета, утерянного в процессе производства, придания бесцветному продукту соответствующего цвета.

В продуктах с низким содержанием жира (или без жира) используется водорастворимая форма β-каротина. Водорастворимый β-каротин используется для окраски при производстве мороженого, напитков, соков.

Использование β-каротина в продуктах питания позволяет улучшить их органолептические свойства, повысить пищевую ценность, сохранить качество при длительном хранении, расширить ассортимент изделий.

β-каротин вводят в продукты лечебно-профилактического назначения благодаря его высокой антиоксидантной активности. Как провитамин А применяют в качестве функционального ингредиента как в пищевых продуктах, так и в косметологии (антивозрастной и солнцезащитной косметики).

**Пектины E440** представляют собой группу высокомолекулярных полисахаридов. Это пищевые растительные волокна, которые сорбируют и выводят из организма токсичные продукты обмена, тяжелые металлы, шлаки.

Наибольшее количество пектина содержится в плодах и корнеплодах. В пищевой промышленности пектин получают из яблочных выжимок, из свекловичного жома. Цитрусовые пектины, вырабатывают из выжимок цитрусовых плодов.

Пектины высокого качества (высокоэтерифицированные) применяют в качестве студнеобразующего вещества в производстве соков, мороженого, майонеза.

Пектины низкоэтерифицированные применяют при производстве паштетов и студней.

**Карбоксиметилцеллюлоза (КМЦ)** или **натриевая соль (E 466)** используется как стабилизатор консистенции. Применяется при производстве мороженого, соусов, мясных продуктов. Преимущества- ее эффективность при незначительных концентрациях способна значительно улучшить консистенцию, снизить влияние термических перепадов, полная совместимость со всеми компонентами продуктов.

#### **Вопросы для самоконтроля**

1. Влияние технологических факторов на качество пищевых продуктов.
2. Контроль и управление технологическими процессами и качеством пищевых продуктов. Пищевые добавки.

#### **Список литературы**

##### **Основная**

1. Антипова Л.В., Глотова И.А., Рогов И.А. Методы исследования мяса и мясных продуктов. – М.: Колос, 2001. – 376 с.
2. Горбатов А.В. Реология мясных и молочных продуктов. - М.: Пищевая промышленность, 1999. – 383 с.
3. Крусь Г.Н., Шалыгина А.М., Волокитина З.В. Методы исследования молока и молочных продуктов/Под общ. редакцией А.М. Шалыгиной. – М.: Колос, 2002. – 368 с.
4. Рогов И.А., Горбатов А.В., Свинцов В.Я. Дисперсные системы мясных и молочных продуктов. – М.: Агропромиздат, 1990. – 271 с.
5. Структурно-механические характеристики пищевых продуктов: Справочник/Под редакцией А.В. Горбатова. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1982. – 296 с.
6. Органолептические свойства молока и молочных продуктов. Справочник. Шидловская В. П. –М.: Колос, 2000. –280 с.
7. Инженерная реология/ Косой В.Д., Малышев А.Д., Юдина С.Б., 2005. –250с.
8. Основы практической реологии и реометрии: Научное издание/ Шрам Г., пер. с англ. Лавыгина И.А.: - М.: Издательство "КолосС". 2003. – 312 с.
9. Анисимов Е.Н., Скрябина Л.Ю. Методические указания " Структурно-механические свойства молочных и мясных продуктов", Саратов: ФГОУ ВПО «Саратовский ГАУ», 2005.
10. Валентас К.Дж., Ротштейн Э., Сингх Р.П. Пищевая инженерия: справочник с примерами расчетов/Валентас К.Дж., Ротштейн Э., Сингх Р.П.(ред.)\ пер. с англ. под общ. науч. ред. А.Л. Ишевского.- СПб: Профессия, 2004.-848с.
11. Моргунова Н.Л. Методические указания по дисциплине "Инженерная реология", 2009-35с.

##### **Дополнительная**

1. Хлебников В.И. Технология товаров (продовольственных): Учебник. – 2-е изд. – М.: Издательский дом «Дашков и К°», 2002. – 427 с.
2. Пищевые добавки. Булдаков А. С. –М.: ДеЛи принт, 2001. –436 с.
3. Справочник по производству фаршированных и вареных колбас, сарделек, сосисок и мясных хлебов. Забашта А. Г. и др. –М.: Франтэра, 2001. –709 с.
4. Справочник технолога молочного производства. Технология и рецептуры. Т.1. Цельномолочные продукты. Степанова Л. И. –СПб.: ГИОРД, 1999. –384 с.

## Содержание

### Введение

#### Лекции 1

**Теоретические основы реологии.** 4с.

#### Введение

1. Предмет и задачи реологии. Роль в обеспечении контроля, регулирования и управления качеством сырья и готовой продукции.
2. Методы реологии.
3. Основные понятия, определения и уравнения инженерной реологии.

#### Лекция 2,3

**Основные классификации реологии** 9с.

1. Феноменологический способ классификации, основные уравнения инженерной реологии. Механические и математические модели реологических тел.
2. Классификация реологических тел.
3. Классификации дисперсных систем.
4. Реограммы жидких и жидкообразных продуктов.

#### Лекции 4

19с.

**Основные структурно-механические свойства пищевых продуктов**

1. Сдвиговые структурно-механические свойства.
2. Компрессионные структурно-механические свойства.
3. Поверхностные структурно-механические свойства.
4. Оценка консистенции продукта инструментальными методами.
5. Сенсорная оценка качества и текстуры пищевых продуктов.

#### Лекция 5

**Методы и приборы для измерения структурно-механических свойств пищевых продуктов** 23с.

1. Классификация методов и приборов для измерения СМХ.
2. Измерение сдвиговых характеристик.
3. Измерение компрессионных характеристик.
4. Измерение поверхностных характеристик.

#### Лекция 6

**Реологические исследования** 30с.

1. Реологические исследования течения пищевых масс в каналах и органах машин.
2. Приборы и стенды для реологических исследований рабочих органов машин.
3. Основные методы дисперсного анализа пищевых продуктов.

#### Лекция 7

**Реологические расчеты** 33с.

1. Насосы.
2. Устройства для пневмогидротранспортировки продуктов.
3. Реологические расчеты.

#### Лекция 8

**Качество пищевых продуктов** 37с.

1. Актуальность проведения контроля за технологическими процессами и качеством продукции.
2. Применение пищевых добавок для улучшения реологических характеристик пищевых продуктов.