

НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНСТИТУТ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ И ПИЩЕВОЙ БИОТЕХНОЛОГИИ

**РЕОЛОГИЯ**

Методические указания  
по выполнению практических занятий, самостоятельной и  
контрольной работы

НОВОСИБИРСК, 2024

УДК 637.1 (075)

Кафедра технологии пищевых производств и индустрии питания

Составители: С.Л. Гаптар, к.т.н., доц.; Е.В. Тарабанова, к.б.н., доц.,  
О.В. Лисиченок, к.т.н., доц.

Рецензент: Городок О.А., к.т.н., доцент

Реология: метод. указания по выполнению практических занятий, самостоятельной и контрольной работы /Новосиб. Гос. Аграр. Ун-т. ИЭиПБ; сост.: С.Л. Гаптар, к.т.н., доц.; Е.В. Тарабанова, к.б.н., доц.; О.В. Лисиченок, к.т.н., доц. – Новосибирск, 2024. - 76 с.

Методические указания содержат теоретический материал по дисциплине, дан состав практических работ, контрольные задания и рекомендации к их выполнению, вопросы для самопроверки и рекомендованная литература. В методических указаниях отражены теоретические основы инженерной реологии, основные структурно-механические свойства пищевых продуктов, приборная техника для измерения структурно-механических свойств продуктов.

Методические указания предназначены для студентов по направлениям подготовки: 19.03.01 Биотехнология (бакалавриат); 19.03.02 Продукты питания из растительного сырья (бакалавриат), 19.03.03 Продукты питания животного происхождения (бакалавриат); 19.04.03 Продукты питания животного происхождения (магистратура) всех форм обучения и повышения квалификации.

Утверждены и рекомендованы к изданию учебно-методическим советом института экологической и пищевой биотехнологии (протокол № 2 от 12.02.2024 г.).

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|          |   |    |
|----------|---|----|
|          | ВВЕДЕНИЕ  | 4  |
| 1        | Основы реологии пищевых продуктов   | 7  |
| 2        | Общие положения и определения   | 9  |
| 3        | Классификация реологических тел и их основные структурно-механические свойства                              | 14 |
| 4        | Методы и приборы измерения структурно-механических свойств  | 17 |
| 5        | Методы и приборы для измерения сдвиговых свойств  | 20 |
| 6        | Методы и приборы для измерения компрессионных характеристик пищевых продуктов                               | 24 |
| 7        | Методы и приборы для измерения характеристик продуктов на границе раздела с твердыми телами                 | 26 |
| 8        | Сдвиговые свойства твердообразных пищевых продуктов   | 29 |
| 9        | Сдвиговые свойства жидкообразных пищевых продуктов  | 32 |
| 10       | Компрессионные характеристики продуктов   | 34 |
| 11       | Поверхностные характеристики продуктов  | 37 |
| 12       | Течение неньютоновских жидкостей  | 40 |
| 13       | Приборы, стенды и методы исследования   | 45 |
| 14       | Уравнения движения пластично-вязких продуктов   | 48 |
| 15       | Устройства для перемещения пластично-вязких пищевых продуктов   | 50 |
| <b>2</b> | <b>Практические занятия</b>   |    |
| 2.1      | Определение усилий среза продуктов  | 53 |
| 2.2      | Определение сдвиговых свойств на коническом пластометре   | 55 |
| 2.3      | Определение предельного напряжения сдвига и эффективной вязкости на ротационном вискозиметре РВ-8           | 57 |
| 2.4      | Определение предельного напряжения сдвига и эффективной вязкости на ротационном вискозиметре типа «Реотест» | 60 |
| 2.5      | Определение вязкости на вискозиметре Энглера  | 64 |
| 2.6      | Определение липкости продуктов  | 66 |
| 3        | Контрольные вопросы и задачи для выполнения контрольной работы  | 68 |
| 4        | Вопросы для зачета  | 73 |
| 5        | Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины (модуля)  | 75 |

## ВВЕДЕНИЕ

Современные пищевые производства требуют от специалиста глубоких знаний в области реологии продовольственных продуктов. Инженер - технолог обязан не только уметь управлять производственными процессами в соответствии с требованиями технологии, но и должен обеспечивать их оптимальное проведение на высоком техническом уровне, который бы отвечал последним достижениям науки в данной области. Для достижения данных целей специалист обязан уметь выполнять различные инженерные расчёты в соответствии с возникающими задачами. Указанное обстоятельство предопределяет необходимость высокого уровня подготовки будущих специалистов в области инженерной реологии с учетом последних достижений в науке, технике и технологии.

Дисциплина «Реология» относится к обязательной части, в которой излагаются основные принципы интенсификации процессов формирования пищевых масс, влияния поверхностных свойств и параметров продукции на работу технологического оборудования; использование инструментальных методов измерения свойств сырья на этапах его поступления и переработки с целью контроля, регулирования и управления качеством готовой продукции.

Целью дисциплины является изучение основ инженерной реологии пищевых материалов, формирование у студентов знаний, умений и навыков в области структурообразования пищевых масс, методов и приборов для определения структурно-механических свойств пищевых материалов в целях контроля, регулирования и управления показателями сырья, готовой продукции на стадиях технологического процесса.

Основные задачи дисциплины:

- приобретение теоретических знаний в области прикладной инженерной реологии как составной части науки физико-химической механики пищевых производств;
- приобретение знаний в области структурообразования пищевых масс, построения реологических моделей для моделирования технологических процессов;
- приобретение знаний в области методологии измерения и приборной техники для определения структурно-механических свойств пищевых масс.

В результате изучения дисциплины «Инженерная реология» студент должен *знать*: теоретические основы структурообразования пищевых масс и поведение пищевых материалов в ходе технологической обработки; классификацию основных структурно-механических свойств материалов; методы и приборы для определения структурно-механических характеристик сырья, полуфабрикатов и готовой продукции; методы расчета результатов измерений, построение зависимостей структурно-механических характеристик от технологических параметров; основные направления в области оптимизации, контроля и управления технологическими процессами.

*Уметь*: определять структурно-механические свойства пищевого сырья, полуфабрикатов и готовой продукции; проводить анализ характера изменения структурно-механических свойств пищевых масс в ходе технологической обра-

ботки и давать рекомендации по их регулированию; составлять схемы оптимизации технологических процессов для получения продукции высокого качества.

*Иметь навыки:* составления механических моделей для реальных пищевых продуктов; обращения с приборной техникой и методами измерения структурно-механических характеристик пищевых масс; анализа влияния технологических факторов на характер изменения структурно-механических свойств сырья и готовой продукции; формирования практических рекомендаций по оптимизации, контролю и управлению качеством продукции.

Дисциплина «Реология» предназначена для подготовки инженеров-технологов по направлениям подготовки: 19.03.01 Биотехнология; 19.03.03 Продукты питания животного происхождения (бакалавриат); 19.04.03 Продукты питания животного происхождения (магистратура) всех форм обучения и повышения квалификации.

## **Лекция 1 Основы реологии пищевых продуктов**

### **План лекции:**

1. Предмет изучения курса реологии.
2. Краткие исторические сведения о развитии науки.
3. Основные задачи инженерной физико-химической механики, методы исследований.

1. Реология — наука о деформации и течении различных тел. Слово «реология» происходит от греческого и означает «теку». Деформацией называется относительное смещение частиц материального тела, при котором не нарушается непрерывность самого тела. Если под действием конечных сил деформация тела увеличивается во времени непрерывно и необратимо, то это означает, что материал течет. При деформации обычно происходит изменение формы или размеров данного тела; однако есть случаи, в которых эти явления не обнаружены, например при ламинарном потоке в зазоре ротационного вискозиметра.

Исследование различных видов деформации в зависимости от сопровождающих их напряжений и составляет предмет реологии.

Феноменологическая реология изучает однородные или квазиоднородные материалы в предположении, что они являются сплошными средами.

Макрореология рассматривает все материалы в том виде, в каком они предстают перед наблюдателем при поверхностном осмотре невооруженным глазом, т.е. как однородные и лишенные структуры. Однако феноменологически однородными являются только чистые жидкости и совершенные микрокристаллы. Большая часть материалов, исследуемых реологией, представляет собой дисперсные системы, состоящие из двух или более фаз. С точки зрения реологии дисперсные системы можно разделить на золи, которые ведут себя как жидкости, и на гели, обладающие свойствами твердых тел. В золях сплошная фаза, или дисперсионная среда, является жидкостью; дисперсная фаза может быть жидкой в случае эмульсии или твердой в случае суспензии.

Микрореология рассматривает реологическое поведение двух- и многофазных систем в зависимости от реологических свойств их компонентов.

К основным реологическим свойствам материалов относятся: упругость, пластичность, вязкость и прочность. У одного и того же материала в зависимости от его состояния и условий нагружения проявляются в разной степени те или иные реологические свойства. Например, макаронное тесто при мгновенном воздействии нагрузки ведет себя в основном как упругое тело; при других условиях нагружения больше проявляются вязкие и пластические свойства. Поэтому в первую очередь необходимо выяснить, какие свойства исследуемого материала при заданных условиях деформирования являются основными, определяющими.

Среди пищевых масс встречаются материалы, весьма разнообразные по своим реологическим свойствам. Известно много случаев, когда в процессе

технологической обработки один и тот же продукт переходит из одного реологического состояния в другое, часто противоположное по свойствам первому. Например, шоколад при отливке в форму с последующим охлаждением переходит из вязкого (текучего) состояния в твердое (хрупкое), такая же картина наблюдается и при производстве конфет.

**2. Реологические методы** получили быстрое и широкое развитие при изучении структурно-механических свойств различных материалов, при решении вопросов, связанных с пластичностью, ползучестью и физико-химической механикой материалов, а также при решении разнообразных технологических задач. Этому способствовали фундаментальные труды по реологии дисперсных систем и физико-химической механике П.А. Ребиндера, Г.В. Виноградова, М.П. Воляровича, Б.В. Дерягина; по теории вязко-пластичного течения — А.А. Ильюшина, А.Х. Мирзаджанзаде, А.М. Гуткина, а также работы в области реологии пищевых масс Л.Я. Ауэрмана, Н.И. Назарова, О.Г. Лунина, Б.А. Николаева, А.В. Горбатова, И.А. Рогова и др.

Успехи реологии пищевых продуктов, обуславливают все более широкое использование реологических методов в промышленности не 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. При этом первоначальной, главной задачей является изучение и определение значений структурно-механических характеристик в широком диапазоне изменения основных определяющих технологических, механических и других параметров.

**3. Качественное развитие реологии**, которая играет важную роль в инженерной физико-химической механике, видно из следующих этапов ее изменения.

Классическая реология как наука о течении и деформации реальных тел (техническая механика реальных тел или дисперсных систем) ставит своей задачей изучение свойств существующих продуктов и разработку методов расчета процессов течения их в рабочих органах машин.

**Физико-химическая механика** как наука о способах и закономерностях формирования структур дисперсных систем с заранее заданными свойствами ставит своей задачей:

а) установление существа образования и разрушения структур в дисперсных и нативных системах в зависимости от совокупности физико-химических, биохимических, механических и других факторов;

б) исследование, обоснование и оптимизацию путей получения структур с заранее заданными технологическими свойствами.

В задачу управляющей реологии входит исследование и обоснование такого сочетания различных видов воздействий, при которых обеспечивается заданный уровень реологических характеристик в течение всего технологического процесса.

Инженерная физико-химическая механика решает перечисленные выше задачи и, кроме того, разрабатывает способы приложения установленных закономерностей для расчета машин и аппаратов и оперативного контроля основных показателей качества по значениям величин структурно-механических характеристик.

Реализация исследований методами инженерной физико-химической механики позволяет стабилизировать выход изделий, получать готовые продукты постоянного, заранее заданного качества, научно обосновать понятие качества продуктов, рассчитывать, совершенствовать и интенсифицировать технологические процессы, «конструировать» те или иные виды пищевых продуктов и т. д. Это показывает, что реология и инженерная физико-химическая механика пищевых продуктов превратились из пассивных отраслей знания в производительную силу, позволяющую активно вмешиваться в производственные процессы с целью разработки новых и совершенствования существующих.

### **Вопросы для самоконтроля:**

1. Что такое реология?
2. Что называется деформацией? Что изучает феноменологическая реология? Что рассматривают макрореология и микрореология? Назовите основные реологические свойства материалов? Назовите известных ученых в области реологии? Что ставит своей задачей классическая реология? Что рассматривает физико-химическая механика

## **Лекция 2 Общие положения и определения**

### **План лекции:**

1. Аксиомы реологии и основные определения.
2. Классификация структур дисперсных систем. Основные уравнения напряжений и деформаций.
3. Неньютоновские жидкости.

1. Напряжение является мерой интенсивности внутренних сил упругости. Под действием внешних сил происходит изменение формы и размеров тела. Величина и характер деформации зависят от свойств материала тела, его формы и способа приложения внешних сил. Деформация сопровождается возникновением внутренних сил взаимодействия между частицами тела. Различают полное, нормальное и касательное напряжения.



Рассмотрим некоторые основные физико-механические и математические понятия, широко используемые в реологии.

**Деформация** - это изменение формы или линейных размеров тела под действием внешних сил, при изменении влажности, температуры и пр., при котором частицы или молекулы смещаются одна относительно другой без нарушения сплошности тела. Деформации могут быть сдвиговыми, одноосными и объемными.

Относительная деформация при сдвиге - отношение абсолютной величины сдвигового смещения слоя под действием касательных сил к его толщине.

Скорость деформации (градиент скорости) учитывают, если деформации изменяются во времени при неустановившемся процессе; при установившемся процессе деформирования изменение деформации в единицу времени постоянно.

### **Виды деформации**

В большинстве практических случаев наблюдаемая деформация представляет собой совмещение нескольких одновременных простых деформаций. В конечном счёте, однако, любую деформацию можно свести к двум наиболее простым: *растяжению* (или сжатию) и *сдвигу*.

**Напряжение  $\sigma$  (в Па)** - мера внутренних сил  $P$  (в Н), возникающих в теле под влиянием внешних воздействий на единицу площади  $F$  (в м<sup>2</sup>), нормальной к вектору приложения силы [16]:

$$\sigma = P / F$$

**Упругость** - способность тела после деформирования полностью восстанавливать свою первоначальную форму или объем, т. е. работа деформирования равна работе восстановления. Упругость тел характеризуется модулем упругости первого (Па) или второго (Па) рода, соответственно при растяжении — сжатии и сдвиге. Величины деформаций определяются законом Гука.

**Адгезия  $p_0$  (в Па)** - слипание разнородных твердых или жидких тел, соприкасающихся своими поверхностями. Аутогезия - самопроизвольное слипание однородных тел. Адгезия (липкость) определяется по уравнению как удельная сила нормального отрыва пластины от продукта

$$\sigma_0 = P_0 / F_0$$

где  $P_0$  - сила отрыва, Н;  $F_0$  - геометрическая площадь пластины, м<sup>2</sup>.

**Пластичность** - способность тела под действием внешних сил необратимо деформироваться без нарушения сплошности. Пластическое течение начинается при величине напряжения, равной пределу текучести. В реологии в этом смысле при сдвиговых деформациях используется понятие «пределное напряжение сдвига», обозначенное  $\theta_0$ .

**Вязкость** - способность тела оказывать сопротивление относительному смещению его слоев. Полная вязкость движущейся жидкости складывается из ламинарной (ньютоновской), турбулентной и объемной вязкости.

2. Для научного обоснования задач технологической обработки пищевых материалов большое значение имеет изучение процессов структурообразования

систем. П.А. Ребиндером структуры в коллоидных и микрогетерогенных системах предложено разделить на коагуляционно-кристаллизационные (тиксотропнообратимые) и конденсационно-кристаллизационные (необратимо разрушающиеся).

Коагуляционно-кристаллизационные структуры возникают под действием ван-дер-ваальсовых молекулярных сил сцепления коллоидных частиц, участвующих в интенсивном броуновском движении, и более крупных частиц, находящихся в суспензии. Кинетика тиксотропного восстановления структуры вызывается интенсивным броуновским движением, в результате которого частицы сцепляются друг с другом и более крупными зернами по коагуляционным участкам или по местам наибольшего сближения поверхностей.

Конденсационно-кристаллизационные структуры образуются в результате срастания мелких кристаллов, возникающих из жидкой среды, в пространственные системы или развития сетки химических связей. Такие структуры весьма прочны и после механического разрушения не восстанавливаются. Прочность этих структур значительно больше прочности коагуляционных.

Для ряда пластично-вязких тел применимо кинетическое уравнение деформации

$$\varepsilon(p, \tau) = a_\varepsilon p^{a_1} (1 + a_2 \lg \tau),$$

где  $a_\varepsilon$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  - коэффициенты, зависящие от геометрических и механических факторов, физического состояния продукта, его состава и особенности исходного сырья.

Кинетическое уравнение является основным для расчетов, связанных с определением энергии деформации и величины самой деформации.

Уравнение применимо также и для описания процессов сдвигового деформирования

$$\gamma(\theta, \tau) = a_\gamma \theta^{a_1} (1 + a_2 \lg \tau)$$

Уравнения напряжений и деформаций бывают линейными и нелинейными.

*Линейные уравнения напряжений и деформаций.*

Процессы в релаксирующей жидкообразной среде (Максвеллова вязкоупругая жидкость), когда вызванные внешним воздействием напряжения уменьшаются во времени, описываются уравнением Максвелла. Под действием напряжения  $\theta$  в теле возникает деформация  $\gamma$ , имеющая во времени определенную скорость  $\dot{\gamma} = d\gamma/d\tau$ , которая складывается из упругой  $\dot{\gamma}_{\text{оїđ}}$  и вязкой  $\dot{\gamma}_{\text{ăŷĸ}}$  составляющих. Упругую составляющую находят дифференцированием по времени закона Гука

$$\left(\frac{d\gamma}{d\tau}\right)_{\text{оїđ}} = \frac{d\theta}{Gd\tau} = \frac{\dot{\theta}}{G}$$

Вязкую составляющую определяют из уравнения Ньютона

$$\left(\frac{d\gamma}{d\tau}\right)_{\text{ăŷĸ}} = \frac{\theta}{\eta}$$

При сложении упругих и вязких напряжений для упруго-вязкого твердого тела Фойгта-Кельвина получают следующее уравнение:

$$\theta = G(\gamma + \frac{\eta}{G} \cdot \dot{\gamma})$$

При снятии напряжения ( $\theta=0$ ) и интегрировании в пределах от  $\gamma_{\max}$  до  $\gamma$  и от 0 до  $\tau$  получают экспоненциальную функцию для релаксации деформации

$$\gamma = \gamma_{\max} \exp(-\frac{\tau}{\tau_p})$$

При сложении напряжений, соответствующих пластическому и вязкому течениям, получают уравнение Бингама для пластично-вязкой среды

$$\theta = \theta_0 + \eta \frac{d\gamma}{d\tau}$$

Это уравнение неоднократно использовали для описания деформационного поведения многих пищевых продуктов (колбасный фарш, тесто, пралиновые массы для конфет и т.п.).

*Нелинейные эмпирические уравнения напряжений и деформаций* широко используются в реологии в связи с тем, что нередко классические реологические модели не позволяют достаточно точно описать кривую течения. Этот пробел интенсивно восполняется публикациями различных эмпирических и полумпирических уравнений, которых к настоящему времени появилось несколько десятков. При этом они могут содержать несколько (три-пять) констант, определяемых из опыта, что делает их ненадежными и сложными для практического использования. Значимость этих уравнений также оценивается по-разному. Ниже приведены два основных уравнения, используемых для описания течения пищевых масс; ряд других можно получить из них в виде частных случаев.

**3. К жидкостям относятся** такие вещества, у которых при постоянном напряжении сдвига наблюдается течение, т.е. деформация с постоянной или переменной скоростью. Свойства жидкостей проявляются и у пластичных тел после превышения предела текучести.

Например, при простом сдвиге ньютоновской жидкости с напряжением  $\tau$  возникает деформация с определенной скоростью  $\dot{\gamma}$ . Отношение напряжения сдвига к скорости деформации  $\tau/\dot{\gamma}$  является реологической константой жидкости и называется ньютоновской вязкостью  $\eta$

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

Реологическое уравнение состояния ньютоновской жидкости имеет вид

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

Неньютоновские жидкости – это жидкости, поведение которых не подчиняется закону Ньютона. Они бывают максвелловские, дилатантные, бингамовские, тиксотропные и т.д.

Основным свойством жидкостей является вязкость. Для неньютоновских жидкостей вязкость — функция скорости сдвига, поэтому ее называют «кажущейся», или эффективной, вязкостью  $\eta_{\text{эф}}$  (Па·с). Она достаточно полно характеризует поведение текучего материала, если известна во всем интересующем исследователя диапазоне скорости сдвига.

Инструментальное определение эффективной вязкости предусматривает измерение пар значений в обширной области  $\dot{\gamma}$  для изображения кривой течения и функции вязкости.

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

Математическое описание поведения жидкости является предпосылкой для инженерного расчета процесса течения. Для ньютоновских жидкостей применяются модели, которые достаточно точно описывают их поведение в интересующей области напряжения.

Модели неньютоновских жидкостей содержат по крайней мере две реологические характеристики материала. Если неньютоновские жидкости исследуют в широком диапазоне скоростей сдвига, начиная с  $\dot{\gamma} \approx 0$ , то получают полные кривые течения. При малых скоростях сдвига такая жидкость имеет постоянную начальную вязкость  $\eta_0$ . С повышением скорости сдвига происходит постепенное разрушение структуры и достигается постоянная конечная вязкость  $\eta_{\infty}$ .

### **Вопросы для самоконтроля:**

1. Чем является напряжение?
2. Какие различают напряжения?
3. Что такое деформация?
4. Объясните понятие относительная деформация при сдвиге?
5. Назовите единицу измерения напряжения?
6. Запишите формулу для определения напряжения?
7. Что такое упругость?
8. Что вы понимаете под адгезией и аутогезией?
9. Как определяется адгезия?
10. Что такое пластичность и вязкость?
11. На какие системы предложил разделить П.А. Ребиндер?
12. Запишите кинетическое уравнение деформации для пластично-вязких тел?
13. Какие бывают уравнения напряжений и деформаций?
14. Запишите уравнение Фойгта-Кельвина для упруго-вязкого твердого тела?
15. Запишите уравнение Бингама для пластично-вязкой среды?
16. Что относится к жидкостям?
17. Что такое неньютоновские жидкости?
18. Какие они бывают?
19. Для чего используют реограммы?

### **Лекция - 3 Классификация реологических тел и их основные структурно-механические свойства**

#### **План лекции:**

1. Механические модели простейших реологических тел.
2. Классификация реальных тел на основе механических моделей.
3. Основные группы структурно-механических свойств.

1. Известны следующие механические модели простейших реологических тел: модель Ньютона, модель Гука, модель Сен-Венана, модель Рэнкина и модель Пелега.

Моделью Ньютона является демпфер (рис. 1, а), или модель вязкой жидкости. Соответствующей математической моделью является реологическое уравнение состояния ньютоновского тела для простого сдвига  $\theta = \eta \cdot \dot{\gamma}$ , реологической константой — вязкость  $\eta$ .

Моделью Гука является пружина (рис. 1, б), или модель упругого твердого тела. Соответствующей математической моделью является реологическое уравнение гуковского твердого тела для простого сдвига  $\sigma = \varepsilon \cdot E$  или (для растяжения — сжатия  $\theta = \gamma \cdot G$ ), а реологической константой — модуль сдвига  $G$ .

Модель Сен-Венана изображается в виде пары трения и определяется как модель идеально пластичного тела (рис. 1, в). Оно неподатливо при нагрузке ниже предела текучести, а после его превышения неограниченно деформируется. Предел текучести  $\theta$  является реологической константой элемента пластичности.

При изучении структурно-механических свойств пищевых продуктов их испытывают на разрушение, которому предшествуют мгновенные необратимые деформации.

Модель Рэнкина или модель твердого тела, изображается как пара сцепленных пластин (рис. 1, г). Реологическая константа данного элемента — предел прочности  $\theta_B (\sigma_B)$ . Если при осевом нагружении достичь предела прочности, сцепленные пластины необратимо разъединяются. Для этой модели действительны две области нагружения.

Модель Пелега и модель твердого тела, учитывающая мгновенную необратимую деформацию, была введена Пелегом [14 Мачихин, Горбатов]. При нагружении модели Пелега (рис. 1, д) сначала деформируется в пределах 0, а после достижения контакта ведет себя как жесткое тело.

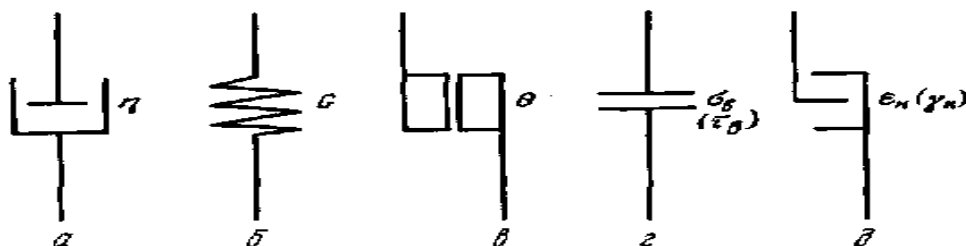


Рис. 1. Механические модели, отражающие элементарные реологические свойства:

*a* - модель Ньютона; *б* - модель Гука; *в* - модель Сен-Венана; *г* - модель Рэнкина; *д* - модель Пелега.

При последовательном соединении все тела имеют одинаковое напряжение  $\sigma$ , а их деформации складываются

$$\sigma = \sigma_i; \varepsilon = \sum \varepsilon_i$$

При параллельном соединении все тела деформируются на одинаковую величину  $\varepsilon$ , а общее напряжение модели состоит из напряжений отдельных тел

$$\sigma = \sum \sigma_i; \varepsilon = \varepsilon_i$$

Для элементарных модельных тел справедливо правило сложения производных напряжений и деформаций по времени:  $\dot{\sigma} = \sum \dot{\sigma}_i$ ;  $\ddot{\sigma} = \sum \ddot{\sigma}_i$ ;  $\dot{\varepsilon} = \sum \dot{\varepsilon}_i$ ;  $\ddot{\varepsilon} = \sum \ddot{\varepsilon}_i$ .

2. Деформационное поведение элементарных и сложных модельных тел при одноосном напряженном состоянии может быть описано единым дифференциальным уравнением вида

$$\sigma + A_1 \dot{\sigma} + A_2 \ddot{\sigma} + A_3 \ddot{\sigma} + \dots = \hat{A}_0 \varepsilon + \hat{A}_1 \dot{\varepsilon} + \hat{A}_2 \ddot{\varepsilon} + \hat{A}_3 \ddot{\varepsilon} + \dots + \tilde{N}$$

В левой части этого уравнения находятся напряжение  $\sigma$  и его производные по времени  $\dot{\sigma}$ ,  $\ddot{\sigma}$  и  $\ddot{\sigma}$ , а также константы материала  $A_1, A_2, A_3, \dots$ . В правой части — деформация  $\varepsilon$ , ее производные  $\dot{\varepsilon}$ ,  $\ddot{\varepsilon}$  и  $\ddot{\varepsilon}$ , а также константы материала  $B_0, B_1, B_2, B_3, \dots$  и коэффициент  $C$ . У элементарных модельных тел существует только одна константа, в то время как другие имеют нулевые значения.

Согласно уравнению твердыми телами считают такие, которые в структурном дифференциальном уравнении содержат коэффициент  $B_0$ , в то время как коэффициент  $C$  равен нулю. Негуковские вязкоупругие твердые тела в соответствующих дифференциальных уравнениях, кроме коэффициента  $B_0$ , содержат еще коэффициенты  $B_1$  и  $A_1$ , причем  $C=0$ . Негуковские упругопластичные твердые тела имеют дополнительно коэффициент  $C>0$ .

Модель упруго-пластического тела получается при последовательном соединении упругого элемента Гука и пластического элемента Сен-Венана (рис. 2). При  $\theta < \theta_0$  происходит упругая деформация материала, при  $\theta = \theta_0$  - пластическое течение.

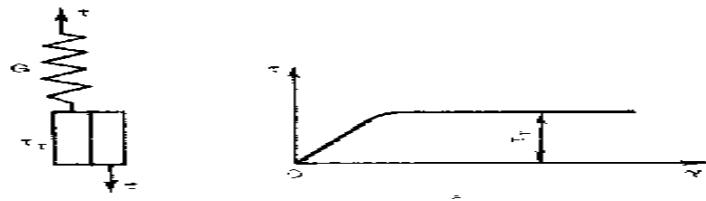


Рис. 2. Модель упруго-пластического тела и диаграмма  $\theta$ - $\gamma$ .

Вязко-упругое тело Кельвина-Фойгта представлено механической моделью, полученной при параллельном соединении упругого элемента Гука и вязкого элемента Ньютона.

Механическая модель Максвелла представляет собой последовательное соединение элементов Гука и Ньютона. На оба элемента действует одинаковое напряжение.

Обобщенные модели Кельвина и Максвелла сочетают в себе свойства вязкости и упругости, так что их деформация под действием напряжения определяется как сумма составляющих элементов соответственно тела Кельвина-Фойгта и тела Максвелла.

Двухэлементная механическая модель вязко-пластического тела Шведова-Бингама состоит из соединенных параллельно элементов Ньютона и Сен-Венана. Если  $\theta \leq \theta_{\dot{\gamma}_0}$ , то тело ведет себя как абсолютно твердое недеформируемое. Реологическое уравнение этого тела при  $\theta > \theta_0$

Механическая модель Бингама состоит из элементов Гука, Ньютона и Сен-Венана. Элементы Ньютона и Сен-Венана соединены взаимно параллельно, а вместе - последовательно с элементом Гука.

Механическая модель Шведова состоит из элементов Гука, Сен-Венана и Максвелла. При  $\theta \leq \theta_0$  деформация модели Шведова происходит только благодаря элементу Гука. При  $\theta > \theta_0$  деформируются все элементы модели.

**3. Основные структурно-механические свойства** можно классифицировать по характеру приложения к продукту внешних усилий и вызываемым ими деформациям: сдвиговые свойства проявляются при воздействии касательных усилий, компрессионные — при воздействии нормальных усилий и поверхностные — при сдвиге или отрыве продукта от твердой поверхности. При этом поверхностные явления, возникающие в межфазных разделах дисперсных гетерогенных систем и характеризующие внутреннюю структуру продукта, в последней группе свойств рассматриваются только частично, т.е. в данное понятие вложен смысл, несколько отличающийся от традиционного. В зависимости от принятой модели реального тела в каждой группе свойств может существовать множество показателей: вязкость, пределы текучести, периоды релаксации, модули упругости, коэффициенты внешнего трения и т. п. Для измерения величин характеристик разработаны и используются самые различные приборы периодического и непрерывного действия.

Структурно-механические свойства характеризуют поведение пищевых продуктов в условиях напряженного состояния, основными показателями которого при приложении силы являются напряжение, величина и скорость деформации. В зависимости от характера приложения усилий свойства делятся на сдвиговые (касательные напряжения), компрессионные нормальные напряжения растяжения-сжатия и поверхностные им границе разделу с другим материалом (нормальные и касательные).

Например, структурно-механические свойства колбасных фаршей, как коагуляционных структур, зависят от особенностей строения и размеров дисперсной фазы, доли дисперсионной среды и их взаимодействия. Так как в колбасных фаршах дисперсионной средой является вода, то СМС находятся в прямой зависимости от количества и формы связи влаги с дисперсной фазой.

### **Вопросы для самоконтроля:**

1. Какие Вам известны механические модели простейших реологических тел?
2. Что является моделью вязкой жидкости?
3. Что является моделью упругого твердого тела?
4. Что представляет собой модель идеально пластичного тела?
5. Что такое модель твердого тела?
6. Что такое модель Пелега?
7. Каким уравнением описывается деформационное поведение элементарных и сложных модельных тел при одноосном напряженном состоянии?
8. Как получается модель упруго-пластического тела?
9. Что представляет собой модель Кельвина-Фойгта?
10. Из каких элементов состоит механическая модель Бингама?
11. Как классифицируются основные структурно-механические свойства продуктов?
12. Что характеризуют структурно-механические свойства?

## **Лекция - 4    Методы и приборы измерения структурно-механических свойств**

### **План лекции:**

1. Классификация приборов для измерения структурно-механических свойств.
2. Приборы для измерения сдвиговых характеристик.
3. Приборы для измерения компрессионных характеристик.
4. Приборы для поверхностных характеристик.

1. Приборы для измерения значений каждой группы реологических свойств сырья имеют свою специфику. Однако общими будут следующие, не считая температуры и технологических характеристик, четыре переменные: сила, момент или напряжение; расстояние, деформация, площадь или объем; время, скорость деформации или линейная скорость; 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 методу измерения величины реологические приборы делят на четыре группы. Эта классификация в определенной мере условна, так как не-



которые приборы позволяют варьировать две величины при постоянной третьей.

Первые два метода получили наибольшее распространение, особенно в вискозиметрии. 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, время измерения обычно постоянно ( $180 \div 300$  с) и принимается несколько больше, чем период релаксации. В приборах 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 того, в приборах этой группы энергия может быть вычислена по мощности, если прибор снабжен самопишущим или показывающим ваттметром или счетчиком.

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 при постоянных исходных технологических показателях продукта.

**2. 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.

Основной предпосылкой научной обоснованности и объективности полученных данных на ротационных и капиллярных вискозиметрах является отсутствие турбулизации потока.

При работе на капиллярных вискозиметрах критерий Рейнольдса не должен превышать 150, при движении шарика в жидкости ламинарный режим наблюдается при числовых значениях критерия Рейнольдса меньше 0,2; ориентировочно при работе на ротационных вискозиметрах: если вращается внутренний цилиндр, то комплекс  $\Omega_v/v$  не должен превышать  $70 \cdot 10^4 \text{ м}^{-2}$ ; если вращается наружный цилиндр то комплекс  $\Omega_n/v$  не должен превышать значения  $0,19/[R_n/R_n - R_v]$ .

Ротационные вискозиметры обладают рядом преимуществ по сравнению с другими. Наряду со многими преимуществами ротационных вискозиметров по сравнению с другими типами возникают затруднения, которые вызывают тепло выделения в слое испытуемой массы, находящейся в узком кольцевом зазоре. Поэтому необходимо работать в условиях, при ко-

торых выделение теплоты заведомо ничтожно, либо нужно пользоваться методами пересчета экспериментальных данных с учетом тепловыделений.

Общим для капиллярных вискозиметров является наличие капилляра, устройства для измерения расхода или объема жидкости или системы, обеспечивающей создание гидростатического давления.

Приборы с плоскопараллельным зазором служат для измерения сдвиговых характеристик в области практически неразрушенных структур при малых величинах деформаций.

Пенетрометры и пластометры предназначены для измерения вязкости и предельного напряжения сдвига методом погружения индентора в емкость с продуктом.

3. Наряду со сдвигом объемное или осевое сжатие, а также осевое растяжение являются основными типами механической деформации продуктов. Основные способы измерения названных характеристик могут быть следующие: осевое сжатие, осевое растяжение, одностороннее объемное сжатие и двустороннее объемное сжатие.

Приборы для осевого сжатия продукта. Методика работы практически одинакова для всех приборов. Конструктивные схемы различаются по способу привода пластины: снизу и сверху, от электродвигателя или непосредственно от груза. К ним можно отнести универсальный прибор ВНИИМПа и дефометр МТИММПа.

К приборам для объемного сжатия продукта можно отнести компрессионный акалориметр Мосмясокомбината и МТИММПа, консистометр Геплера, прибор Ю.А. Мачихина и А.С. Максимова. Они позволяют определять как реологические, так и теплофизические свойства пластично-вязких продуктов при различных давлениях.

В приборах для растяжения продукта деформации подвергают образцы с постоянными размерами. К ним относятся прибор Ю.А. Мачихина, В.Н. Данилова и Г.П. Комогорова; прибор Н.И. Назарова и Ю.В. Калинина; экстенсограф фирмы «Брабендер»; универсальная испытательная машина «Инстрон» и т.д.

4. Поверхностные свойства пищевых продуктов – адгезия и внешнее трение – проявляются на границе раздела между продуктом и твердой поверхностью. Приборы для измерения поверхностных характеристик пищевых продуктов делятся на адгезиометры и приборы для определения внешнего трения.

Принцип действия адгезиометров основан на разрушении адгезионного шва путем приложения внешнего усилия. По способу приложения усилия различают методы отрыва (равномерного и неравномерного) и сдвига. К адгезиометрам относятся универсальный адгезиометр МТИММПа; адгезиометр В.А. Данилова, Ю.А. Мачихина и О.Г. Силаева; адгезиометр Ю.А. Клаповского; адгезиометр МТИППа АМ-1.

Классический тип прибора для определения внешнего трения представляет собой пару тел, соприкасающихся плоскими поверхностями, площадь которых может быть от долей квадратных миллиметров до десятков квадратных санти-

метров. Одно из тел смещения (трения) измеряется тензометрическими, пружинными или какими-либо другими датчиками. Для малых скоростей трения реализуется прямолинейное смещение поверхности.

Одними из распространенных приборов для определения внешнего трения являются трибометр и устройство Н.Н. Мозенина.

### **Вопросы для самоконтроля:**

1. На какие группы реологические приборы по методу измерения величины?
2. Какие приборы для измерения сдвиговых свойств продуктов Вы знаете?
3. Какой принцип работы у ротационных вискозиметров?
4. Каково устройство капиллярных вискозиметров?
5. Для чего предназначены пенетрометры и пластометры?
6. Какие основные типы механической деформации продуктов Вы знаете?
7. Что относится к приборам для осевого и объемного сжатия продукта?
8. Какие поверхностные свойства пищевых продуктов Вы знаете?
9. На чем основан принцип действия адгезиометров?

## **Лекция 5 Методы и приборы для измерения сдвиговых свойств**

### **План лекции:**

1. Ротационные вискозиметры. Геометрические формы роторов. Теоретическое обоснование ротационных вискозиметров.
2. Капиллярные вискозиметры. Принципиальные схемы капиллярных вискозиметров для вязких жидкообразных продуктов. Теория капиллярных вискозиметров.
3. Пенетрометры, консистометры и другие вискозиметры. Принципиальные схемы вискозиметров и пенетрометров.

1 Ротационные вискозиметры обладают рядом преимуществ по сравнению с другими. Наряду со многими преимуществами ротационных вискозиметров по сравнению с другими типами возникают затруднения, которые вызывают тепловыделения в слое испытуемой массы, находящейся в узком кольцевом зазоре. Поэтому необходимо работать в условиях, при которых выделение теплоты заведомо ничтожно, либо нужно пользоваться методами пересчета экспериментальных данных с учетом тепловыделений.

Принципиальные схемы ротационных вискозиметров показаны на рис. 1.

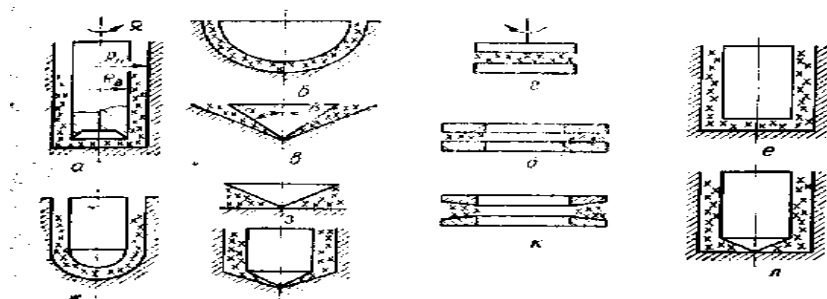


Рис. 1. Принципиальные схемы ротационных вискозиметров.

Они могут иметь одну геометрическую форму: коаксиальные цилиндры (рис. 1, а), сферы или полусферы (рис. 1, б), два конуса (рис. 1, в), две плоскопараллельные пластины (рис. 1, г), два плоских кольца (рис. 1, д) или два конических кольца (рис. 1, к). Рабочий зазор или рабочий орган может быть комбинированным, т.е. состоять из двух различных поверхностей: цилиндр—диск (рис. 1, е), цилиндр — полусфера, (рис. 1, ж), конус — диск (рис. 1, з), цилиндр — конус (рис. 1, и), цилиндр — конус — диск (рис. 1, л) и др. Между рабочими поверхностями находится исследуемый продукт, сила сопротивления внутри которого при вращении одной из поверхностей измеряется. Момент сопротивления можно измерять двумя способами: на вращающейся поверхности, тогда вторая поверхность закрепляется жестко, и вращая одну поверхность, тогда другая соединяется с динамометром.

Наибольшее распространение в пищевой промышленности получили коаксиально-цилиндрические комбинированные поверхности для измерения характеристик вязких и пластично-вязких продуктов (см. рис. 1, а, ж, л).

Известны два основных варианта прибора с коаксиальными цилиндрами. В первом испытуемое вещество помещается в цилиндр, приводимый в равномерное вращательное движение. Подвешенный на упругой нити второй цилиндр находится коаксиально с первым. Вязкость вычисляется по величине скорости вращения первого цилиндра и по углу поворота второго цилиндра от его первоначального положения. Этот метод применяется для исследования жидкостей и газов. Второй вариант: внешний цилиндр неподвижен, внутренний крепится на оси, вмонтированной для уменьшения трения в шариковых подшипниках, и приводится во вращение с помощью падающего груза. На ротационных приборах экспериментально получают зависимости крутящих моментов от угловой скорости вращения измерительной поверхности.

**2. Принципиальные схемы капиллярных вискозиметров** для ньютоновских и неньютоновских продуктов показаны на рис. 2. Общим для всех 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. Получаемые результа-

ты, как правило, инвариантны, т. е. не зависят от диаметра трубки. Для неньютоновских жидкостей с более высокой вязкостью и пластично-вязких систем диаметр капилляра может достигать нескольких десятка миллиметров, а результаты измерений часто зависят от диаметра, т.е. не инвариантны. Диаметр капилляра входит в теоретически полученные формулы для соответствующих моделей тел.

Наиболее простые, традиционные и вместе с тем универсальные капиллярные вискозиметры Оствальда (рис. 2, а) и Уббелодде (рис. 2, б) имеют капилляр и два полых шарика для жидкости.

**3. Конический пластометр КП-3** (рис. 3, а) предложен П.А. Ребиндером и Н.А. Семененко. На пластометре исследуемый продукт помещается в сосуде на подъемный столик, вершина конуса приводится в соприкосновение с поверхностью продукта. Конус нагружается гирями и с помощью индикатора определяется величина погружения конуса до его остановки.

В МТИППе разработан малогабаритный пенетрометр (рис. 3, б), который состоит из основания, на котором закреплены подвижный столик и вертикальная стойка. На стойку, устанавливается скоба с датчиком дифференциально-трансформаторной системы передач. К одному концу нити прикреплен подвижный шток датчика. На штоке расположены тарелка, служащая для уставки дополнительных грузов, и сменная насадка. На другом конце нити закреплен груз для уравнивания массы штока с тарелкой и насадкой. В комплект входят конусы с углами при вершине 30, 45, 60, 90, 120°, а также диски.

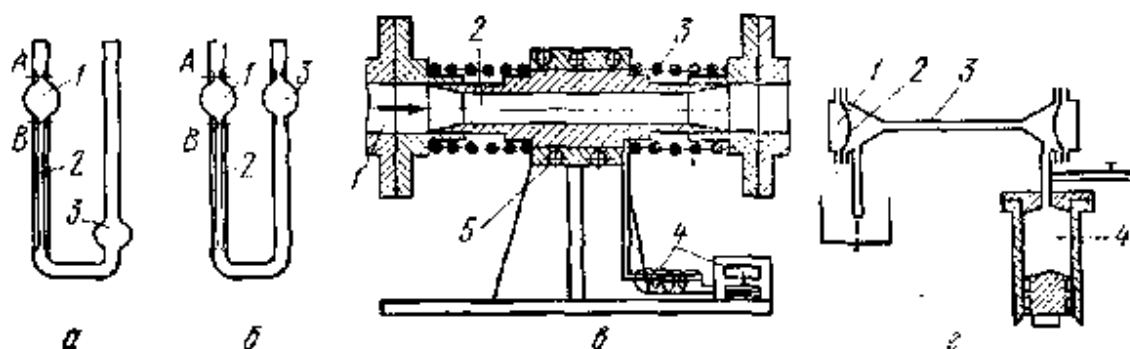


Рис. 2. Принципиальная схема капиллярных вискозиметров для вязких жидкообразных продуктов:

а — Оствальда; б — Уббелодде; 1 — шарик для измерения объема протекающей через капилляр жидкости; 2 — капилляр; 3 — шарик для сбора жидкости для пластично-вязких (неньютоновских) продуктов; в — вискозиметр Горбатова, Сухановой и др.; 1 — магистральный трубопровод; 2 — подвижный капилляр; 3 — упругие элементы (сильфоны, пружины); 4 — индукционный датчик перемещения капилляра с регистрирующим прибором; 5 — импульсный подогреватель для удаления жировой пленки; г — вискозиметр постоянного расхода Г.В. Виноградова и др.: 1 — буферная жидкость для измерения перепада давления; 2 — мембрана; 3 — капилляр; 4 — цилиндр с поршнем для продукта.

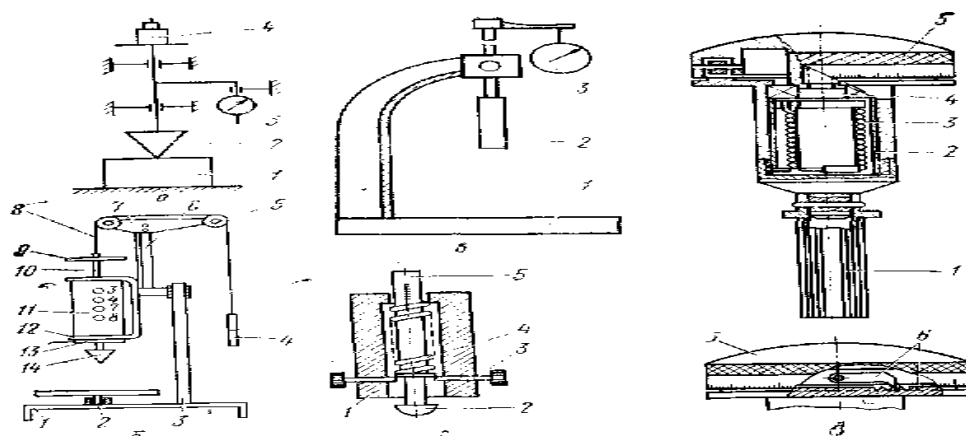


Рис. 3. Схемы пенетрометров:

а — конический пластометр КП-3: 1 — сосуд с образцом; 2 — конус; 3 — индикатор; 4 — груз; б — малогабаритный пенетрометр МТИППа: 1 — основание; 2 — подвижный столик; 3 — стойка; 4 — груз; 5 — блок; 6 — стойка; 7 — кронштейн; 8 — нить; 9 — тарелка; 10 — подвижный шток; 11 — датчик перемещения штока; 12 — скоба; 13 — стопор; 14 — сменный рабочий орган; в — пластинчатый пластометр С. С. Жуковского и А. М. Гуткина: 1 — подставка с кронштейном; 2 — плоский нож; 3 — индикатор; г — переносной консистометр Е и В Шарнер: 1 — корпус; 2 — индентор; 3 — фиксатор; 4 — пружина; 5 — хвостовик штока; д — консистометр В.П. Горбачникова и Е.Я. Баркова: 1 — корпус-пробоотборник; 2 — динамометр; 3 — пружина; 4 — подшипник; 5 — головка прибора; б — собачка и храповой венец.

Пластометр с пластиной (рис. 3, в) применен С. С. Жуковским и А. М. Гуткиным для измерения предельного напряжения сдвига.

Прибор состоит из плоского ножа 0,2X0,025 м со штоком и индикатора или линейки для регистрации перемещений штока.

Полусферический консистометр Е. и В. Шарнер (рис. 3, г) для оценки консистенции мяса и колбас имеет полый корпус с подпружиненным полусферическим индентором. Когда индентор прижимают к продукту, сжимается пружина и хвостовик штока с нанесенными на него делениями выходит из корпуса. Измерения заканчивают при соприкосновении корпуса прибора с продуктом, т.е. изменяются две величины: перемещение штока относительно корпуса и усилие вдавливания, которое определяется степенью сжатия пружины.

Консистометр Е.Я. Баркова и др. предназначен для отбора пробы и одновременного определения предельного напряжения сдвига сыра и подобных ему продуктов (рис. 3, д).

### Вопросы для самоконтроля:

1. Какую геометрическую форму имеют ротационные вискозиметры?
2. Какие Вам известны два основных варианта прибора с коаксиальными цилиндрами?
3. Что является общим капиллярных вискозиметров?
4. Каков принцип работы конического пластометра КП-3?

5. Из чего состоит малогабаритный пенетрометр?
6. Для чего применяется пластометр с пластиной?
7. Каково устройство полусферического консистометра Е. и В. Шарнера?

## **Лекция - 6 Методы и приборы для измерения компрессионных характеристик пищевых продуктов**

### **План лекции:**

1. Устройства для измерения компрессионных характеристик при осевом сжатии продуктов.
2. Приборы для измерения компрессионных характеристик при объемном сжатии продуктов.
3. Консистомер Геплера.

1. Методика работы практически одинакова для всех приборов. Конструктивные схемы различаются по способу привода пластины: снизу и сверху от электродвигателя или непосредственно от груза.

Универсальный прибор ВНИИМПа состоит из основания, к которому жестко присоединены реверсивный электродвигатель с редуктором и коробка передач. На выходном валу коробки установлен подвижный шток с держателем рабочего органа с образцом продукта. На основании установлена стойка с кронштейном, на котором расположена тензобалка с тензорезисто-рамн. В центре тензобалки установлен полый патрон, имеющий сквозное отверстие, в которое вставляют одно из измерительных приспособлений. В центре кронштейна имеется отверстие, через которое в отверстие измерительного приспособления входит хвостовик держателя грузов.

Измерительное приспособление для определения осевого сжатия и адгезии состоит из держателя и измерительного органа, которые представляют собой круглые пластины одинаковой площади. Держатель образца закреплен на подвижном штоке, а измерительный орган крепится в полой патроне.

Дефометр МТИММПа позволяет регистрировать одновременно деформации и нагрузки во времени. Сжатие образца осуществляется между двумя полированными пластинами благодаря перемещению верхней пластины толкателем, установленным в направляющих.

Дефометр позволяет исследовать характеристики продуктов при осевом сжатии и растяжении. В верхней части корпуса установлен столик с тензометрической балкой, которая фиксируется на призмах. На тензометрической балке, в средней ее части, жестко закреплена бобышка для установки и крепления нижней пластины. Подвижная штанга-гайка получает возвратно-поступательное движение от вращающегося винта, соединенного с электродвигателем через редуктор и вариатор.

Прибор Б.А. Николаева и А.С. Шпигельгласа состоит из станины, в которой перемещается опорная стойка столика. Испытуемый продукт помещается

между параллельными плоскостями дисков; верхний из них может перемещаться под действием груза; он связан с рейкой, входящей в зацепление с шестерней, на оси которой закреплена стрелка.

На столике укладывают образец и определяют его первоначальный размер, затем быстро поднимают столик и устанавливают груз. Определяют величину мгновенной деформации по шкале, а также изменение деформации, отсчитывая время по секундомеру. На описанном приборе можно определить мгновенно-упругую деформацию, модуль упругости сжатия, а также вязкость и предельное напряжение сдвига материала.

Определение характеристик пищевых продуктов при осевом сжатии может производиться также на некоторых типах пенетрометров, например АР4/2, при замене индентора рабочим органом в виде круглой пластины.

**2. Компрессионный акалориметр** Мосмясокомбината и МТИММПа (рис. 1, а) позволяет определить как реологические, так и теплофизические свойства пластично-вязких продуктов при различных давлениях.

Прибор состоит из подвешенного на пружинах цилиндра, внутри которого с противоположных сторон установлены поршни. Верхний поршень закреплен неподвижно на корпусе, нижний поршень закреплен на подвижном штоке, с которым неподвижно соединен плунжер индукционной катушки. Деформации можно наблюдать визуально и записывать с помощью потенциометра по сигналам, полученным от перемещения сердечника в индукционной катушке.

Для вычисления коэффициента бокового давления и определения характера распределения давления по высоте цилиндра разработан прибор. Давление на продукт от поршня можно рассчитать по массе грузов, давление на стенку — измерить месдозами. Зная боковое давление в трех точках по высоте цилиндра, можно составить полную картину распределения давлений в цилиндре.

Для изучения влияния вибрации при объемном сжатии продукта используют прибор Ю. А. Мачихина и А. С. Максимова (рис. 1, з). Он имеет цилиндр с водяной рубашкой, датчик давления и поршень, нагружаемый винтовой системой: реализуется метод постоянной деформации. В нижней части прибора установлен вибропоршень, жестко связанный с эксцентриковым вибратором и создающий колебания в продукте.

**3. Консистометр Генплера** (рис. 1, б) используется в исследовательских и производственных лабораториях. К недостаткам прибора можно отнести то, что измерительный цилиндр вмещает малое количество (несколько граммов) продукта. Модернизация прибора, заключающаяся в изготовлении новых цилиндров различного диаметра, позволила устранить этот недостаток.

Реологические свойства продуктов определяют при одностороннем объемном сжатии. В цилиндре установлен поршень, сжимающий продукт. Усилие сжатия передается через шток от рычага с грузами. Величину линейного перемещения поршня определяют визуально по индикатору часового типа. Имеется возможность для исследования кинетики компрессионных свойств при нагреве - вокруг цилиндра имеется водяная рубашка. Прибор прост и удобен в обращении.



нии, позволяет проводить исследования в широком диапазоне - от 0 до  $15,6 \cdot 10^5$  Па.

Результаты экспериментов, проведенных на этих приборах, позволяют вычислить относительные деформации и построить кинетические зависимости. Поскольку масса продукта в цилиндре известна, эти же эксперименты дают возможность определить плотность при различных давлениях.

### **Вопросы для самоконтроля:**

1. Из чего состоит универсальный прибор ВНИИМПа?
2. Что позволяет измерять дефометр МТИММПа?
3. Каков принцип работы прибора Б.А. Николаева и А.С. Шпигельгласа?
4. Каково устройство компрессионного акалориметра Мосмясокомбината и МТИММПа?
5. Для чего используют прибор Ю. А. Мачихина и А. С. Максимова?
6. Каков принцип работы консистометра Гепплера?

## **Лекция -7 Методы и приборы для измерения характеристик продуктов на границе раздела с твердыми телами**

### **План лекции:**

1. Приборы для измерения адгезионной прочности.
2. Приборы для измерения коэффициента внешнего трения при малых и высоких скоростях движения продукта.
3. Методика проведения экспериментов на адгезиометрах и трибометрах.

1. 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 (рис. 1).

Наиболее часто в адгезиометрах для пищевых, мясных и молочных продуктов реализуется схема (рис. 1, а), она может отличаться способами приложения силы и регистрации отрывающего усилия. Например, в приборе Б.А. Николаева «мгновенно» отрывается верхний диск с помощью рычажного механизма; в приборе А. Г. Кульмана постепенно отрывается нижний диск при наполнении подвешенной к нему емкости водой.

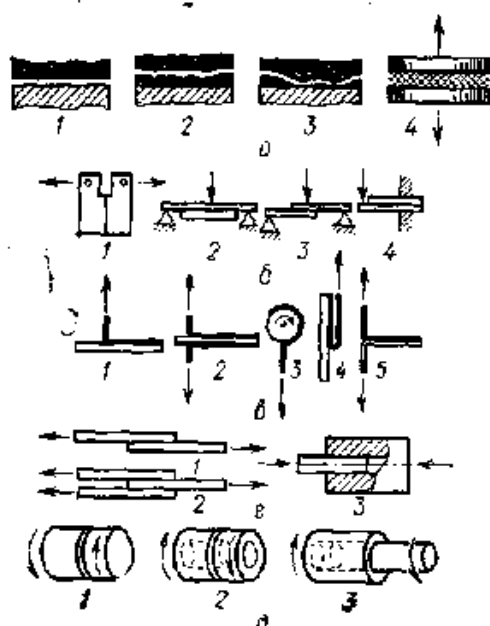


Рис. 1. Методы измерения адгезионной прочности:

а — способ нормального отрыва: 1 — адгезионный; 2 — когезионный; 3 — смешанный; 4 — схема устройства для осуществления отрыва; б — способы расщипывания жестких материалов: 1 — внецентренное растяжение; 2 — изгиб для плиточного и листового материалов; 3 — изгиб для листового материала; 4 — консольный изгиб для листового материала; в — способы расщипывания гибких материалов: 1, 2, 3 — от жесткой подложки под углом  $90^\circ$ ; 4 — то же, под углом  $180^\circ$ ; 5 — от гибкой подложки; г — способ сдвигового разрушения: 1 — при растяжении одностороннего соединения; 2 — то же двустороннего; 3 — при сжатии соединения цилиндра со стержнем; д — способ сдвигового разрушения при кручении: 1 — по торцу цилиндров; 2 — по кольцевой поверхности торца полых цилиндров; 3 — по боковой поверхности цилиндра и стержня.

Универсальный адгезиометр МТИММПа позволяет менять в широком диапазоне геометрические, кинематические, динамические и другие параметры измерения. Он имеет корпус, устройство с микрометрическим винтом для установки пластины.

С.В. Сорокин и С.А. Мачихин разработали маятниковый вискозиметр. Прибор имеет точное теоретическое обоснование только для ньютоновских жидкостей.

Вибрационный вискозиметр ВНИММПа состоит из зонда, погружаемого в фарш, и электронного блока. Он позволяет измерять вязкость ньютоновских и неньютоновских сред в диапазоне от сотых долей до  $10^6$  Па·с и могут использоваться для непрерывного измерения вязкости.

2. Классический тип прибора для измерения коэффициента внешнего трения представляет собой пару тел, соприкасающихся плоскими поверхностями, площадь которых может быть от долей квадратных миллиметров до десятков квадратных сантиметров. Одно из тел смещается относительно другого (рис. 2).

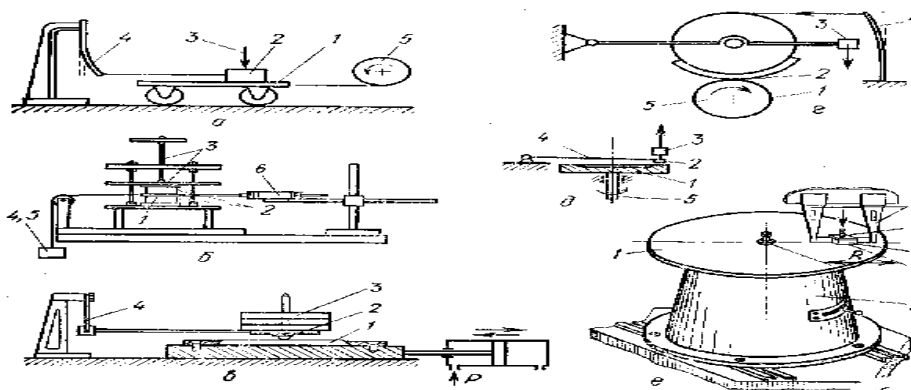


Рис. 2. Схемы приборов для измерения коэффициента внешнего трения при малых (а, б, в) и высоких (г, д, е) скоростях движения продукта:

а — трибометр с тележкой и электроприводом; б — трибометр с параллельным смещением пластины и приводом от падающих грузов; в — трибометр с приводом от гидроцилиндра; г — трибометр проволочного типа; д — кинетический адгезиометр-трибометр; е — трибометр дискового типа; 1 — материал, по которому определяется трение продукта; 2 — исследуемый продукт (или слой продукта); 3 — устройство для создания давления контакта; 4 — устройство для измерения силы трения и отрыва (тензометрическое или грузовое); 5 — система привода; 6 — устройство для измерения перемещения (индикатор).

Для исследования трения мясопродуктов был использован трибометр с тележкой (рис. 2, а), который позволяет определить и вычислить истинный коэффициент внешнего трения и эффективный коэффициент внешнего трения. Исследуемый продукт помещается в рамку, установленную на плоскую поверхность тележки. Она перемещается от электродвигателя посредством тянущей нити. Рамка соединена с тензометрической балкой.

Привод пластины от груза с подпрессовкой образцов винтовым механизмом (рис. 2, б) реализован в устройстве Н. Н. Мозенина, предназначенном для изучения характеристик твердых продуктов, например сыра.

Устройство (рис. 2, в) с приводом подвижной части от гидроцилиндра и регистрацией усилий с помощью тензометрической балки используется для изучения трения при малой поверхности контакта и больших нормальных усилиях.

3. **Универсальный адгезиометр МТИММПа** имеет корпус, устройство с микрометрическим винтом для установки пластины. Она фиксируется держателем, который смонтирован на тензобалке, и имеет хвостовик для обеспечения соосности подвижной части системы. Для создания предварительного контакта на тензобалку устанавливают грузы.

Техническая характеристика: давление предварительного контакта  $300 \div 3,5 \cdot 10^5$  Па; пределы измерения адгезионного давления  $300 \div 6180$  Па, длительность предварительного контакта произвольная.

В процессе эксперимента сила нарастает линейно, скорость нарастания характеризуется тангенсом угла наклона линии на осциллограмме.

**Адгезиометр Ю.В. Клаповского** предназначен для изучения свойств кондитерских масс. Исследуемую массу помещают в кювету, имеющую крышку с отверстием в которое с малым зазором входит пластина, изготовленная из материала адгезионные свойства которого надо определить. Пластина через упругое измерительное кольцо крепится к штоку, скользящему в направляющих. С другой стороны шток шарнирно прикреплен к неравноплечему рычагу. Для определения усилия отрыва на измерительное кольцо наклеены тензорезисторы. Перемещение контактирующей пластины измеряется при помощи шторки, по обеим сторонам которой находятся осветитель и фотодиод.

Ю. В. Ашкерев провел исследования трения и кинетической адгезии. В приборе ползун, установленный на масляной пленке, отрывается от вращающегося диска нормально, усилие отрыва измеряется по деформации тензобалки (рис. 2, д).

Трение мяса по стали изучали на установке, изображенной на рис. 2, е. Диск приводится во вращение от электродвигателя постоянного тока, частота вращения его может плавно регулироваться, обеспечивая окружную скорость в месте контакта с продуктом от 0,1 до 72 м/с. Исследуемый продукт помещают в рамку, которая укреплена на двух тензобалках; они служат для измерения силы трения.

#### **Вопросы для самоконтроля:**

1. На чем основан принцип работы приборов и методов измерения адгезии?
2. Из чего состоит универсальный адгезиометр МТИММПа?
3. Что позволяет измерять вибрационный вискозиметр ВНИММПа?
4. Что представляет собой классический тип прибора для измерения коэффициента внешнего трения?
5. Для чего был использован трибометр с тележкой?
6. Что имеет универсальный адгезиометр МТИММПа?
7. Для чего предназначен адгезиометр Ю.В. Клаповского?

### **Лекция -8 Сдвиговые свойства твердообразных пищевых продуктов**

#### **План лекции:**

1. Структурно-механические свойства в области практически неразрушенных структур.
2. Структурно-механические свойства от начала течения до предельного разрушения структуры.
3. Влияние различных технологических факторов на структурно-механические свойства.

1. Деформационное поведение продуктов при напряжениях, меньших предельного напряжения сдвига, обычно характеризуют кинетическими кривыми

деформации, модулями упругости, периодами релаксации формулы и наибольшей эффективной вязкостью практически неразрушенной структуры.

При деформировании сосисочного фарша касательными напряжениями различной величины с помощью вискозиметра РВ-8 со специальными приставками получены типичные кинетические кривые развития и спада деформаций. По ним определены основные характеристики фарша в названной области (табл. 1).

Табл. 1. Структурно-механические характеристики сосисочного фарша в области практически неразрушенных структур.

| Наименование характеристики                           | Пределы изменения напряжения, Па | Значения величины |
|---|----------------------------------|-------------------|
| Модуль мгновенной упругости, Па                       | меньше 100                       | $1,23 \cdot 10^4$ |
| Модуль упругого последствия, Па                       | 100÷150                          | $0,8 \cdot 10^4$  |
| Эффективная вязкость при деформациях ползучести, Па·с | 150÷200                          | $16 \cdot 10^5$   |
| Статическое предельное напряжение сдвига, Па          | -                                | 250 (300)         |
| Наибольшая эффективная вязкость, Па·с                 | 250÷350                          | $5 \cdot 10^5$    |

По кинетическим кривым определен спектр распределения периодов релаксаций деформаций при различных, но постоянных для каждого опыта напряжениях сдвига. При длительности  $\tau$  действия касательных напряжений более 25, 50, 75 и 100 с величина периодов релаксаций деформаций  $\tau_0$  будет иметь соответственно следующие значения: 310, 150, 97, 72 с. Это с ошибкой до 6% описывается зависимостью  $\tau_0 = 7300 / \tau$ .

**2. Деформационное поведение продуктов (колбасного, рыбного и мясного фарша и т. п.)** при напряжениях, превышающих предельное напряжение сдвига, характеризуют предельным напряжением сдвига (пределом текучести) и вязкостями в зависимости от вида принятой математической модели. Поскольку эти характеристики определяются при сравнительно высоких градиентах скорости и напряжениях сдвига, они являются наиболее существенными по сравнению с другими для расчета перемещения продуктов в рабочих органах машин и аппаратов. Они же более глубоко характеризуют внутреннюю сущность объекта, т. е. его качественные показатели.

Кривые течения различных видов мясного и рыбного колбасного фарша показывают, что в области лавинного разрушения структуры зависимость эффективной вязкости от градиента скорости степенная. Кроме того, фаршу присущи гистерезисные явления. Обобщают гистерезисные явления криволинейные поверхности зависимости эффективной вязкости от напряжения сдвига и длительности его приложения. Степенная зависимость характеризует расположение линий на криволинейной поверхности по ее диагонали.

Значения основных сдвиговых характеристик производственных композиций ряда мясных продуктов, измеренные при температуре около 10° С, представлены в справочниках. Они получены с помощью ротационного виско-

зиметра РВ-8, а также учитывают результаты измерений с помощью пластометра и сдвигомера с трубкой.

При расчете трубопроводного транспорта и рабочих органов машин и аппаратов для обеспечения их работоспособности следует исходить из наибольших или наиболее вероятных значений величин характеристик, которые могут иметь место на практике.

Для различных видов колбасного фарша, изготавливаемого на Ленинградском мясокомбинате, определены с помощью вискозиметра «Реотест» реологические константы к уравнению. Температуру продукта поддерживали  $10^{\circ}\text{C}$ , градиент скорости изменяли от 3 до  $145\text{ c}^{-1}$ . Результаты измерений представлены в справочниках. Сравнение результатов в справочниках показывает, что значения эффективной вязкости по данным Горбатова А.В. различаются незначительно.

**3. На структурно-механические свойства продуктов** оказывают влияние различные технологические факторы.

Например, рассмотрим влияние продолжительности измельчения и влагосодержания колбасного фарша на его структурно-механические свойства, а именно на предельное напряжение сдвига, пластическую вязкость и липкость. Колбасный фарш состоит из 50% говядины и 50% свинины.

При измельчении в подготовительном периоде (до 4 мин), когда частицы имеют размер немного меньше начального и добавленная влага образует толстые прослойки, облегчающие деформацию, величина предельного напряжения сдвига уменьшается. При увеличении продолжительности измельчения (до  $8\div 10$  мин, первый период) происходит интенсивное разрезание частиц, их общая поверхность увеличивается, влага из свободной переходит в поверхностно-связанную. В этот период величина предельного напряжения сдвига и эффективной вязкости при единичном значении скорости возрастает и достигает максимального значения, а пластическая вязкость убывает до минимальных значений. Во второй период измельчения (более 12 мин) происходит некоторое размочаливание мышечных волокон мяса, температура массы продолжает повышаться, увеличиваются число мельчайших частиц, аэрирование массы и эмульгирование жира, что ведет к вторичному структурообразованию, а также к уменьшению величины предельного напряжения сдвига и увеличению пластической вязкости.

Подобно предельному напряжению сдвига липкость во время измельчения увеличивается, достигая максимального значения, а затем уменьшается. Изменение липкости обусловлено в основном теми же причинами, что и при изменении предельного напряжения сдвига.

Сдвиговые свойства характеризуют энергию взаимного действия между элементами структуры, т.е. свойства всего объема системы в условиях напряженного состояния. Липкость характеризует энергию свободной поверхности системы. Сдвиговые свойства и липкость нетождественны,

поэтому в процессе измельчения максимальное значение свойств на поверхности достигается быстрее, чем в объеме.

### **Вопросы для самоконтроля:**

1. Чем характеризуют деформационное поведение продуктов при напряжениях, меньших предельного напряжения сдвига?
2. Что определяют по кинетическим кривым?
3. Что показывают кривые течения различных видов мясного и рыбного колбасного фарша?
4. На какие структурно-механические свойства колбасного фарша оказывают влияние продолжительность измельчения и влагосодержания?
5. Как изменяется предельное напряжение сдвига колбасного фарша при измельчении?
6. Как изменяется пластическая вязкость и липкость при измельчении?

## **Лекция 9 Сдвиговые свойства жидкообразных пищевых продуктов**

### **План лекции:**

1. Общие сведения.
2. Вязкость мясокостного, клеевого и желатинового бульонов.
3. Вязкость крови, меланжа и топленых животных жиров.

1. Сдвиговые свойства представляют собой фундаментальные физические свойства продуктов. Они проявляются при механическом воздействии на обрабатываемый продукт и характеризуют его сопротивляемость приложенным извне усилиям, обусловленную строением и структурой продукта. Эти характеристики используются для расчета процессов течения продуктов в рабочих органах машин с целью определения их механических параметров (геометрических, кинематических и динамических); они отражают существенные аспекты качества продуктов. Кроме того, структурно-механические характеристики учитываются при расчете различных физических процессов: гидромеханических, термических (кондуктивный, высокочастотный и другие виды нагрева, выпаривание и пр.), массообменных и т. д.

Сдвиговые свойства жидкообразных пищевых продуктов описываются вязкостью или эффективной вязкостью и не имеют статического предельного напряжения сдвига. Жидкообразные продукты обладают слабой структурной сеткой, которая разрушается при течении в рабочих органах машин с высокими значениями градиентов скорости или при изменении температуры.

2. Температурные зависимости вязкости  $\eta$  (в Па·с) в области 40÷90° С описываются степенным уравнением, где эмпирические коэффициенты имеют следующие значения:  $a_1=0,01905 \exp(19,3 \text{ c})$ ;  $a_2=1,26 \text{ c}+0,92$ ;  $t_{\text{нр}} = 1^\circ\text{C}$ ;  $c$  — кон-

центрация сухих веществ, пределы изменения от нуля до 0,2 кг сухих веществ на 1 кг бульона; при  $c$ , равном от 0,01 до 0,05, оно дает заниженные результаты.

Величины вязкости мясокостного бульона при различной концентрации и температуре приведены в справочниках. Эти данные получены на капиллярных вискозиметрах и вискозиметре Гепплера. Обобщение данных по вязкости бульона с концентрацией 0,01 дает  $T_{пр} = 313 \text{ К}$  и  $B_{0пр}^* = 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$ .

Клеевые и желатиновые бульоны при одной и той же концентрации имеют различную вязкость, что определяется способом получения бульона и количественным соотношением белков в нем, т.е. размером частиц продуктов распада глютина. Величина условной вязкости стандартного раствора клея (17,75% сухого вещества) при 30°С от 1,8 до 6° Е (от 0,01 до 0,045 Па·с). Вязкость мясокостного бульона при этих же условиях — более стабильная величина и равна 2,1° Е (около 0,013 Па·с). Растворы желатина той же концентрации при 40° С имеют вязкость порядка 6÷40° Е (от 0,045 до 0,3 Па·с). Следует отметить, что вязкость желатиновых растворов зависит от многих технологических факторов и молекулярного строения; изучены они еще недостаточно.

Для оценки качества желатина по его вязкости рекомендуют использовать капиллярные вискозиметры ВПЖ-1, ВПЖ-2 и ВПЖ-4, измерения проводить при температуре 40° С и концентрации 10% вместо 17,75%.

3. При увеличении концентрации сухих веществ вязкость крови возрастает и уменьшается при увеличении температуры. В таблицах приведены данные исследований пищевой стабилизированной крови и плазмы, полученной из этой же крови промышленным сепарированием.

Концентрирование осуществляется ультрафильтрацией на лабораторной установке. Вязкость измеряли с помощью вискозиметра Гепплера и реовискозиметра Ротовиско, градиент скорости для последнего определяли по зависимости. Данные получены при градиенте скорости  $380 \text{ с}^{-1}$  и при температуре 20° С. Следует отметить, что при концентрации 0,261 кровь представляет собой типичную степенную жидкость, для которой коэффициенты имеют следующее значение:  $B_0^* = 0,3 \text{ Па}\cdot\text{с}$ ,  $m = 0,27$ .

При меньшей концентрации изменения эффективной вязкости в зависимости от градиента скорости не описываются степенным законом, а плазма крови представляет собой ньютоновскую жидкость. При повышении концентрации сухих веществ вязкость крови возрастает менее интенсивно по сравнению с вязкостью бульона.

Для меланжа осеннего и весеннего сбора после фильтрации и частичной гомогенизации вязкость определяли с помощью вискозиметра Пинкевича. Различия в значениях вязкости обусловлены изменением характера откорма и содержания птицы в разное время года.

Вязкость производственных композиций жира определяли с помощью вискозиметров Гепплера и капиллярных. Ее зависимость от температуры описывается уравнением, где температура приведена 1° С, а значения



эмпирических коэффициентов и величины вязкости показаны в справочниках. Производственные композиции жира отличаются по вязкости от величин, вычисленных по уравнению, в пределах  $\pm 4\%$ .

### Вопросы для самоконтроля:

1. Как проявляются сдвиговые свойства продуктов?
2. Что относится к сдвиговым свойствам?
3. С помощью каких приборов измеряют вязкость мясокостного бульона при различной концентрации и температуре?
4. Какова вязкость клеевых и желатиновых бульонов?
5. От чего зависит вязкость крови?
6. Какие приборы используют для измерения вязкости крови?
7. С помощью каких приборов измеряют вязкость жира?

## Лекция -10 Компрессионные характеристики продуктов

### План лекции:

1. Компрессионные характеристики при осевом сжатии.
2. Компрессионные характеристики фарша при объемном сжатии
3. Плотность продуктов.

1. Компрессионные характеристики исследовали на приборе, с механическим приводом одной из пластин при постоянной скорости ее перемещения. Исходя из формулы, относительную деформацию сжатия  $\varepsilon$  вычисляли по зависимости

$$\varepsilon = [h(\tau) - \Delta] / H_0,$$

где  $h(\tau) = \omega\tau$  — абсолютная деформация слоя продукта за время  $\tau$  (в с) при скорости сжатия  $\omega$  (в м/с);  $\Delta$  — величина прогиба тензобалки в момент измерения, м; определяется по тарировочным графикам; относительная доля этой величины в общей деформации не превышает  $3\div 4\%$ ;  $H_0$  — начальная высота слоя продукта, м.

Результаты экспериментов по осевому сжатию, представленные в виде таблицы и эмпирической зависимости, были обобщены также с помощью уравнения для модели стандартного линейного тела, которое в приложении к случаю осевого сжатия имеет вид

$$\sigma + \tau_\varepsilon \cdot \dot{\sigma} = E_R \cdot (\varepsilon + \tau_\sigma \cdot \dot{\varepsilon}),$$

где  $\sigma$  — напряжение сжатия, Па;  $\dot{\sigma} = d\sigma/d\tau$  — скорость увеличения напряжения, Па/с;  $\dot{\varepsilon} = d\varepsilon/d\tau$  — скорость деформации, с<sup>-1</sup>;  $\tau_\varepsilon$  — период релаксации напряжения при постоянной деформации, с;  $\tau_\sigma$  — период релаксации деформации при постоянном напряжении, с;  $E_R$  — релаксационный модуль упругости, который определяется соотношением между упругими и пластичными характеристиками продукта, Па.

Исследования компрессионных характеристик при осевом сжатии целых тканей мяса проводились на четырехглавом мускуле говядины аналогично осевому сжатию фарша. Образец имел размеры  $0,03 \times 0,03 \text{ м}^2$  при высоте от 0,01 до 0,02 м. Используя для обобщения экспериментов сложную математическую модель, состоящую из трех последовательно соединенных звеньев: модели Фойгта — Кельвина, нелинейно-упругого элемента и параллельно соединенных модели Максвелла с нелинейно-упругим элементом в одном плече и элементом, фиксирующим определенное значение деформации — в другом, авторы установили величины реологических характеристик (феноменологических постоянных) при изменении напряжения сжатия  $\sigma$  от 0 до  $1,2 \cdot 10^5$  Па.

2. Компрессионные характеристики изучали с помощью консистометра Гепплера и специальных приборов — цилиндров с поршнем и водяной рубашкой. Кривые кинетики относительной деформации объемного сжатия имеют логарифмический характер и описываются уравнением.

По кинетическим кривым для равновесного состояния может быть вычислен коэффициент объемного сжатия по формуле при времени действия гидростатического давления  $p$  (в Па) 180 с:

$$\beta(\delta, 180) = \varepsilon(\delta, 180) / \delta = \dot{\alpha}_\varepsilon^* \cdot \delta^{\dot{\alpha}_1} / \delta = \dot{\alpha}_\varepsilon^* \cdot \delta^{\dot{\alpha}_1 - 1}$$

Общую деформацию фарша можно рассматривать состоящей из трех зон. При напряжениях, меньших предела упругости, который в среднем равен  $10^5$  Па, реализуется зона мгновенно-упругих деформаций. Для нее модуль упругости составляет  $0,6 \cdot 10^7$  Па. Величина максимальной упругой относительной деформации достигает  $1,6 \cdot 10^{-2}$ , при увеличении нагрузки она остается постоянной. Вторая зона — упругого последствия — лежит в пределах напряжений  $(1 \div 3,5) \cdot 10^5$  Па. Третья зона — пластических деформаций — лежит в области напряжений, превышающих  $3,5 \cdot 10^5$  Па. При этом общая деформация зависит не только от напряжения, но и от длительности его действия.

Обработкой экспериментальных данных подобраны коэффициенты к уравнению для всех экспериментальных кинетических кривых; их величины показаны в таблицах.

Для исследования коэффициента бокового давления колбасного фарша и распределения давления в нем по высоте цилиндра использовали установки с тензодатчиками.

Зависимости между осевым и боковым давлениями, полученные более чем для ста опытов, позволили рассчитать величины коэффициента бокового давления.

Комплексные исследования объемного сжатия фарша при термообработке в форме представляют интерес в связи с тенденцией развития аппаратостроения, направленной на создание автоматизированных линий изготовления колбасных изделий без оболочки.

3. Плотность продуктов определяют пикнометром и ареометром. В зависимости от концентрации она может быть определена по уравнению (, для кото-

рого значения коэффициентов приведены в таблицах.. Точность определения — до третьей значащей цифры, что вполне достаточно для технических расчетов. Незначительные отклонения экспериментальных данных от вычисленных по формуле объясняются различным химическим составом сухого остатка.

При температуре, отличающейся от приведенной в таблицах, плотность может быть вычислена по уравнению, где среднее значение коэффициента температурного расширения для многих водно-белковых систем в интервале температур  $40\div 95^\circ\text{C}$  такое же, как и для воды:  $\beta_t = 56 \cdot 10^{-5} \text{ 1/K}$ .

Плотность нативного меланжа [26] при изменении температуры от  $20$  до  $60^\circ\text{C}$  уменьшается линейно от  $1033$  до  $1031 \text{ кг/м}^3$  (осенний сбор). Вычисления с использованием формулы (1—3ба) дают значения  $1033$  и  $1010 \text{ кг/м}^3$ , что, по нашему мнению, более соответствует действительности. Коэффициенты к формуле (1—366) при  $20^\circ\text{C}$  имеют величины  $998$  и  $130 \text{ кг/м}^3$ .

Плотность была исследована для фаршей докторской колбасы и русских сосисок. В процессе экспериментов влажность  $W$  изменяли от  $0,65$  до  $0,73 \text{ кг}$  влаги на  $1 \text{ кг}$  фарша, жирность  $\varphi$  — от  $0,15$  до  $0,22 \text{ кг}$  жира на  $1 \text{ кг}$  фарша. На основании полученных данных, обработанных графоаналитически, выведено уравнение

$$\rho = 1037 - (290\varphi + 10,5U) + 22 \lg p$$

Уравнение справедливо при давлении  $p = (0,1\div 16) 10^5 \text{ Па}$ . Оно получено в расчете на начальное влагосодержание  $U$  от  $1,8$  до  $2,7 \text{ кг}$  влаги на  $1 \text{ кг}$  сухого вещества фарша. Так как при повышении давления отделение влаги незначительное, то ошибка в вычислении плотности не превышает  $3\div 4\%$ . Величины плотности, определенные экспериментально с помощью компрессионного прибора и вычисленные по приведенной выше формуле, даны в таблицах. Зависимость плотности фарша от степени измельчения и вида измельчающей машины обнаружить не удалось.

Плотность целых размороженных рыб определяют путем поштучного взвешивания; объем рыбы измеряют при опускании ее в мерный сосуд с водой. Средние значения плотности различных видов рыб приведены в справочниках.

Плотность сухих животных кормов определяли без уплотнения кормов с помощью мерного стакана по формуле, влажность — высушиванием до постоянной массы, гранулометрический состав — ситовым анализом, находя средний диаметр частиц.

Плотность кости приведена в таблицах. Данные довольно близки по значению. Некоторое различие объясняется, по-видимому, тем, что авторы по-разному именовали кости, а также различием животных, кости которых брали в качестве образцов для исследования. Имеются данные о плотности реберной кости, величина которой определена равной  $1300\text{—}1380 \text{ кг/м}^3$ . Однако они существенно превышают данные других авторов.

Насыпная плотность кости интенсивно меняется с увеличением давления. Этот процесс сопровождается разрушением и уплотнением кости. Масса кости характеризует ее с естественными внутренними полостями и макропорами. Масса плотной части кости без учета этих естественных пустот будет больше.

### Вопросы для самоконтроля:

1. Что относится к компрессионным характеристикам продуктов?
2. Какие реологические модели использованы при исследовании компрессионных характеристик при осевом сжатии целых тканей мяса?
3. С помощью каких приборов исследуют компрессионные характеристики?
4. Из каких зон состоит общая деформацию фарша?
5. Какими приборами определяют плотность продуктов?
6. От чего зависит плотность продуктов?
7. Каким образом исследуют плотность фаршей докторской колбасы и русских сосисок?
8. Как определяют плотность целых размороженных рыб и сухих животных кормов?
9. Какова особенность определения плотности кости?

## **Лекция 11 Поверхностные характеристики продуктов**

### **План лекции:**

1. Адгезионные характеристики (липкость) мясных продуктов.
2. Липкость молочных продуктов.
3. Фрикционные характеристики продуктов. Коэффициент внешнего трения.

1. К поверхностным характеристикам продуктов, обуславливающих их взаимодействие с твердыми телами, относятся липкость, или адгезия, и коэффициент внешнего трения. В некоторых опубликованных работах, посвященных изучению этих характеристик, отсутствуют исследования влияния на липкость и трение геометрических, кинематических и динамических параметров прибора, т.е. полученные величины имеют не количественное, а качественное технологическое значение. Использовать их для расчетов машин и аппаратов затруднительно. Сравнительно подробно исследованы величины липкости и внешнего трения мясопродуктов и внешнее трение целых рыб.

Липкость фарша русских сосисок была исследована при различных толщинах слоя и влагосодержании методом нормального отрыва. Фарш измельчали на куттере с тремя серповидными ножами, продолжительность куттерования оптимальная. Толщину слоя фарша меняли в пределах  $(0,3 \div 1,0) \cdot 10^{-3}$  м, влагосодержание  $U$  (в кг воды на 1 кг сухого вещества) имело значения: 2,21; 2,44; 2,70; 3,01.

Данные получены при давлении контакта 2350 Па и длительности предварительного контакта 300с с пластинами из нержавеющей стали площадью  $0,001 \text{ м}^2$  при скоростях: отрыва —  $0,00358 \text{ м/с}$ , приложения силы — около  $25 \text{ Н/с}$ .

В широком диапазоне изменения влагосодержания, температуры и некоторых других факторов адгезионные характеристики при определенных значениях названных параметров могут иметь экстремальную величину. В противоположность этому при увеличении влагосодержания и температуры сдвиговые характеристики мясных продуктов непрерывно уменьшаются.

С увеличением длительности  $\tau_k$  (в с) и величины  $p_k$  (в Па) предварительного контакта липкость  $p_0$  (в Па) увеличивается; ее изменения описываются кинетическим уравнением

$$p_0 = p_{01} + a \lg \tau_k$$

где  $p_{01}$ ,  $a$  — эмпирические коэффициенты; первый представляет собой липкость при времени контакта 1 с, второй характеризует темп нарастания липкости при увеличении времени контакта, Па; пределы применимости уравнения от 3 до 600 с; значения коэффициентов приведены в таблицах.

Увеличение давления контакта  $p_k$  ведет к увеличению липкости. При высоких  $p_k$  толщину слоя не удается сохранить постоянной. Начальная толщина слоя 0,0003 м сохраняется практически неизменной до  $p_k=8000$  Па. Затем отрыв происходит уже при меньшей толщине, что связано с вытеканием фарша из зазора между пластинами. При  $p_k$  больше  $2,5 \cdot 10^5$  Па толщина слоя перед отрывом достигает наименьшей величины — около  $0,00001 \div 0,00002$  м, которая соизмерима с размером частиц куттерованного мяса. Таким образом, начальные условия не совпадают с условиями отрыва. Наибольшие величины липкости, полученные при наименьшей толщине, имеют постоянное значение около 72000 Па.

Материал пластин оказывает влияние на величину липкости; значения липкости для разных материалов приведены в табл. 3—42 при толщине слоя фарша 0,0003 м, давлении контакта 4900 Па. Коэффициент поверхностного натяжения составляет около 4,2 Н/м.

Понижение температуры фарша от  $17 \div 18$  до  $4 \div 5^\circ \text{C}$  ведет к уменьшению липкости на 30÷40%. Наибольшее значение липкость имеет при температуре  $23 \div 27^\circ \text{C}$ . Эксперименты проведены при времени предварительного контакта 3 с, давлении 3440 Па и скорости отрыва 0,00358 м/с.

**2. Поверхностное натяжение цельного и обезжиренного молока уменьшается с повышением температуры. Поверхностное натяжение обезжиренного молока выше, чем цельного, однако с повышением температуры разница уменьшается.**

На величину поверхностного натяжения молока влияет его гомогенизация. Повышение давления гомогенизации сырного непастеризованного молока приводит к некоторому снижению величины поверхностного натяжения молока, что, можно объяснить не только дроблением жировых шариков молока, но и механическим повреждением белковых частиц, т. е. частичным разрушением белково-жировых агрегатов.

Поверхностное натяжение сгущенного молока на выходе из вакуумного выпарного аппарата несколько ниже, чем у молока до сгущения, однако со временем он увеличивается настолько, что уже через 2÷3 ч оказывается выше, чем у исходного молока.

Липкость творожной массы (влажность 0,84 кг на 1 кг сухого остатка, жирность 0,25 кг на 1 кг и содержание белка 0,18 кг на 1 кг) к различным материалам, определенная при давлении контакта 4910 Па, площади контакта  $0,001 \text{ м}^2$ , толщине 0,001 м при скорости отрыва 0,00358 м/с, указана в таблицах.

Определена также величина липкости творожной массы при давлении контакта 4910 Па и толщине слоя 0,001 м в зависимости от скорости отрыва и времени контактирования.

Липкость сыров голландской группы. Липкость сыров к различным материалам, по данным ВНИИМСа, приведена в справочниках.

Измерения проводились при температуре 20° С по методике ВНИИМСа. Адгезив наносили на поверхность сыра, затем на нее помещали перфорированную или стальную пластинку, отверстия которой также заливали адгезивом. После выдержки в течение двух часов проводили нормальный отрыв пластинки со скоростью 0,001 м/с с помощью адгезиометра конструкции МТИМПа, одновременно регистрируя самописцем усилие отрыва. Точность метода 15%.

Липкость плавленого сыра вычисляется по формуле

$$p_0 = a_0 \tau_k^b,$$

где  $\tau_k$  — продолжительность контактирования сыра с материалом, с;  $a_0$  — липкость при времени контакта 1 с, Па;  $b$  — темп нарастания липкости при изменении  $\tau_k$  от 3 до 420 с.

3. Фрикционные характеристики продуктов рассмотрим на примере внешнего трения мяса и фарша. Исследования проводили на трибометре с тележкой, движение которой сообщалось от электродвигателя. Образец продукта высотой 0,005 м закладывали в рамку площадью 0,0010 м<sup>2</sup>, рамку устанавливали на исследуемую поверхность, в течение 60 с создавали предварительный контакт, затем включали осциллограф и электродвигатель. Тележка имела четыре скорости смещения: 0,00547; 0,0171; 0,0342; 0,0513 м/с.

В справочнике приведены значения истинного коэффициента внешнего трения и сдвиговой липкости для некоторых мясопродуктов. В динамическом режиме истинные коэффициенты трения зависят от скорости смещения, материала пластин, но не зависят от давления контакта; при этом липкость остается практически постоянной, что обусловлено весьма малым (доли секунд) временем контакта продукта с поверхностью. Для начала движения процесс усложняется. При различных давлениях контакта липкость, как видно из предыдущего, должна была бы быть также различной, но нередко через экспериментальные точки можно в пределах ошибки эксперимента провести одну линию, т. е. для различных давлений контакта липкость остается постоянной. Из этого видно, что использование двучленного закона трения связано с существенными трудностями. Они обусловлены тем, что необходимо иметь величины «сдвиговой липкости», т. е. липкости, найденной из опытов по трению. Наличие величин «нормальной липкости» и «сдвиговой липкости», которые часто не совпадают, создает путаницу и неудобство для практических целей.

Коэффициенты внешнего трения получены по минимальному углу наклона поверхности материала, при котором брусок сыра голландской группы начинает скользить по ней.

При смачивании поверхности материала коэффициент внешнего трения, как правило, уменьшается за счет образования смазывающей пленки. При скольжении сыра после пресса до поверхности резины, смоченной рассолом, коэффициент трения уменьшается в 2,3 раза. В таких же условиях при скольжении по алюминию и дереву коэффициент трения снижается в  $1,3 \div 1,6$  раза. При смачивании поверхности материала (алюминий, нержавеющая сталь, дерево) водой коэффициент трения коркового слоя сыра без покрытия уменьшается в  $1,5 \div 2$  раза, исключение составляет резина, для которой трение уменьшается в 1,1 раза. Трение коркового слоя сыра, покрытого парафином, по смоченной водой поверхности нержавеющей стали и дерева возрастает в  $1,1 \div 1,4$  раза, а по резине — уменьшается в 1,2 раза.

### **Вопросы для самоконтроля:**

1. Что относится к поверхностным характеристикам продуктов?
2. Как исследуют липкость фарша русских сосисок?
3. От каких факторов зависит липкость?
4. Как изменяется поверхностное натяжение цельного и обезжиренного молока?
5. При каких условиях определяют липкость творожной массы?
6. Как проводят измерения липкости сыров?
7. Что относится к фрикционным характеристикам продуктов?
8. Какие приборы используют для измерения липкости?
9. Как изменяется коэффициент внешнего трения при смачивании поверхности материала?

## **Лекция 12 Течение неньютоновских жидкостей**

### **План лекции:**

1. Общие положения.
2. Виды движения жидкостей.
3. Основные закономерности жидкостей (ньютоновская жидкость, бингамовский пластик, «степенная» жидкость).

1. В природе имеется много материалов, которые не подчиняются закону Ньютона; вязкость их при заданных температуре и давлении не остается постоянной, а зависит от скорости деформации, от предыстории материала; поэтому зависимость напряжения от скорости сдвига имеет нелинейный характер. Такие материалы называют неньютоновскими (аномальными). Отношение напряжения к скорости сдвига называют эффективной или кажущейся вязкостью.

Аномалия вязкости связана со «структурой» жидкости и ее изменением при течении: при малых скоростях сдвига структура разрушается и полностью восстанавливается, при этом жидкость имеет наибольшую вязкость; с

увеличением скорости разрушение структуры начинает преобладать над восстановлением, вязкость резко уменьшается; при больших скоростях течения структура полностью разрушается, жидкость имеет наименьшую (ньютоновскую) вязкость.

Для научного обоснования задач технологической обработки пищевых материалов большое значение имеет изучение процессов структурообразования систем. П. А. Ребиндером структуры в коллоидных и микрогетерогенных системах предложено разделить на коагуляционно-кристаллизационные (тиксотропнообратимые) и конденсационно-кристаллизационные (необратимо разрушающиеся).

Коагуляционно-кристаллизационные структуры возникают под действием ван-дер-ваальсовых молекулярных сил сцепления коллоидных частиц, участвующих в интенсивном броуновском движении, и более крупных частиц, находящихся в суспензии. Кинетика тиксотропного восстановления структуры вызывается интенсивным броуновским движением, в результате которого частицы сцепляются друг с другом и более крупными зернами по коагуляционным участкам или по местам наибольшего сближения поверхностей.

Конденсационно-кристаллизационные структуры образуются в результате срастания мелких кристаллов, возникающих из жидкой среды, в пространственные системы или развития сетки химических связей. Такие структуры весьма прочны и после механического разрушения не восстанавливаются. Прочность этих структур значительно больше прочности коагуляционных.

У. Л. Уилкинсон предложил реальные жидкости с нелинейной кривой течения разбить на следующие три группы:

- 1) Системы, для которых скорость сдвига в каждой точке представляет собой некоторую функцию только напряжения в той же точке. К этой группе относятся неньютоновские материалы, течение которых не зависит от времени.
- 2) Системы, в которых связь между напряжением и скоростью сдвига зависит от времени действия напряжения или от предыстории жидкости (тиксотропные и реопектические жидкости).
- 3) Системы, обладающие свойствами как упругого твердого тела, так и жидкости и частично проявляющие упругое восстановление формы после снятия напряжения (вязко-упругие жидкости).

## 2. В природе существуют два режима движения жидкости:

**1. Ламинарное течение** (от лат. *lamina* — пластинка), упорядоченное течение жидкости или газа, при котором жидкость (газ) перемещается как бы слоями, параллельными направлению течения (*рис.1*). Л. т. наблюдаются или у очень вязких жидкостей, или при течениях, происходящих с достаточно малыми скоростями, а также при медленном обтекании жидкостью тел малых размеров. С увеличением скорости движения данной жидкости Л. т. может в некоторый момент перейти в неупорядоченное [турбулентное течение](#).





Рис.1 – фотография ламинарного течения

**2. Турбулентное течение** (от лат. *turbulentus* — бурный, беспорядочный), форма течения жидкости или газа, при которой их элементы совершают неупорядоченные, неустановившиеся движения по сложным траекториям, что приводит к интенсивному перемешиванию между слоями движущихся жидкости или газа (рис.2).



Рис.2 – фотография турбулентного течения

Режим движения может быть оценен значением числа Рейнольдса.

Рейнольдса число, один из подобию критериев для течений вязких жидкостей и газов, характеризующий соотношение между инерционными силами и силами вязкости:  $Re = \rho v l / \mu$ , где  $\rho$  — плотность,  $\mu$  — динамический коэффициент вязкости жидкости или газа,  $v$  — характерная скорость потока,  $l$  — характерный линейный размер. Так, при течении в круглых цилиндрических трубах обычно принимают  $l = d$ , где  $d$  — диаметр трубы, а  $v = v_{\text{ср}}$ , где  $v_{\text{ср}}$  — средняя скорость течения; при обтекании тел  $l$  — длина или поперечный размер тела, а  $v = v_{\infty}$ , где  $v_{\infty}$  — скорость невозмущённого потока, набегающего на тело. Назван по имени О. Рейнольдса.

От Р. ч. зависит также режим течения жидкости, характеризуемый критическим Р. ч.  $Re_{\text{кр}}$ . При  $Re < Re_{\text{кр}}$  возможно лишь ламинарное течение жидкости, а при  $Re > Re_{\text{кр}}$  течение может стать турбулентным. Значение  $Re_{\text{кр}}$  зависит от вида течения. Например, для течения вязкой жидкости в круглой цилиндрической трубке  $Re_{\text{кр}} = 2300$ .

**Подобия критерии**, безразмерные (отвлечённые) числа, составленные из размерных физических параметров, определяющих рассматриваемые физические явления. Равенство всех однотипных П. к. для двух физических явлений и систем — необходимое и достаточное условие физического подобия этих систем. П. к., представляющие собой отношения одноимённых физических параметров системы (например, отношения длин), называются тривиальными и при установлении определяющих П. к. обычно не рассматриваются: равенство их для двух систем является определением физического подобия. Нетривиальные безразмерные комбинации, которые можно составить из определяющих параметров, и представляют собой П. к. Всякая новая комбинация из П. к. также является П. к., что дает возможность в каждом конкретном случае выбрать наиболее удобные и характерные критерии. Число определяющих нетривиальных П. к. меньше числа определяющих физических параметров с различными размерностями на величину, равную числу определяющих параметров с независимыми размерностями.

Известно, что течение неньютоновских жидкостей зависит от его физико-химических особенностей: от формы и расположения молекул, концентрации, температуры, влажности, мицеллообразования. Добавлением ингредиентов к чистому растворителю, т.е. повышением концентрации, можно увеличить вяз-

кость вещества и тем самым изменить характер его течения. Высокомолекулярные вещества в растворе дают с повышением напряжения понижение вязкости. Такое течение называют псевдопластическим.

Большинство неньютоновских материалов не имеют предела текучести (предельного напряжения сдвига), а кривые течения имеют линейную зависимость между напряжением и скоростью сдвига только при очень малых и очень больших значениях скорости.

Для описания течения различных пищевых материалов чаще других применяется степенное уравнение Оствальда-де-Вилля. В логарифмических координатах зависимость для многих неньютоновских материалов часто становится линейной в довольно широком диапазоне скоростей сдвига, чем и объясняется широкое использование уравнения Оствальда.

Уравнение Оствальда имеет две константы:  $K$  — коэффициент консистенции, зависящий как от природы материала, так и от вида и размеров измерительной аппаратуры, и  $n$  — индекс течения. Коэффициент  $K$  наиболее чувствителен (по сравнению с  $n$ ) к изменению температуры материала, что особенно важно отметить для пищевых сред. Константы уравнения справедливы только для определенного диапазона скоростей сдвига.

Степенной закон получил широкое распространение для выражения течения различных неньютоновских пищевых материалов: томатных концентратов, сахарных растворов, абрикосового пюре, хлебопекарного теста, конфетных масс, крахмальных суспензий, майонеза, мыла и некоторых других. Однако уравнение Оствальда имеет ряд недостатков: отсутствие физического смысла формулы при предельных значениях скорости сдвига; при линейной аппроксимации в логарифмических координатах сильно нелинейных кривых течения в значения констант вносятся значительные погрешности, что снижает точность реологических расчетов.

Встречаются и такие вещества, у которых присутствует предельное напряжение сдвига. Течение их подчиняется уравнению Бингама. Примером систем, довольно близко следующих уравнению Бингама, могут служить маргарин, шоколадные смеси, сырково-творожные и пралиновые массы, зубная паста жидкие мыла и моющие средства.

3. Известны реологические уравнения течения псевдопластических материалов:

$$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n \text{ - Оствальд-де-Виль}$$

$$\tau = \frac{1}{c + A \cdot \tau^2} \cdot \dot{\gamma} \text{ - Штейгер}$$

$$\tau = (\eta_0 + K \cdot \dot{\gamma}^{n-1}) \cdot \dot{\gamma} \text{ - Эллис}$$

$$\tau = \eta_\infty \cdot \dot{\gamma} + b \cdot \dot{\gamma}^n \text{ - Сиско}$$

$$\tau = \frac{\eta_0}{1 + c \cdot \tau^n} \cdot \dot{\gamma} \text{ - Хавен}$$

Большая группа пищевых материалов относится к так называемым вязкопластичным жидкостям, которые проявляют как вязкие, так и пластичные свойства. Их поведение в основном описывается уравнением Бингама

$$\tau = \tau_0 + \eta_{nl} \cdot \dot{\gamma}$$

Кривые течения некоторых пищевых материалов описываются уравнением Балкли-Гершеля, состоящим из предельного напряжения сдвига и степенного закона

$$\tau = \tau_0 + (\eta_{nl} \cdot \dot{\gamma})^{n_1}$$

Уравнением Кассона было описано течение расплавленного шоколада, крови, сливочного масла, вафельного теста и сгущенного молока

$$\tau^{1/2} = \tau_k^{1/2} + (\eta_k \cdot \dot{\gamma})^{1/2}$$

Если изменения вязкости связаны не только со скоростью, но и со временем, то говорят о тиксотропии, антитиксотропии или реопексии. Условием этого является переход гель — золь.

Материал считается тиксотропным, когда вязкость его является функцией времени, причем предполагается, что структура после определенного времени покоя возвращается к первоначальному состоянию. Время тиксотропного разрушения, так же как и восстановления, для различных структур изменяется в очень широких пределах. Примером тиксотропных пищевых материалов могут служить: бараночное тесто, пралиновые и трюфельные конфетные массы, какао тертое, мясной фарш.

Материалы, состояние течения которых во времени является противоположным тому, какое дают тиксотропные системы, называют антитиксотропными.

Материалы, структура которых во времени упрочняется, обладают свойствами реопексии. Такие материалы, относимые иногда к антитиксотропным, относительно редко встречаются в нашей практике.

Пригодность того или иного реологического уравнения для описания течения реального материала проверяется экспериментально для интересующего нас диапазона скоростей сдвига, который должен включать скорости, соответствующие процессу переработки пищевого материала. Поэтому одной из ответственных и часто сложных задач является определение скорости сдвига материала в рассматриваемой конструкции технологической машины или устройства.

### **Вопросы для самоконтроля:**

1. Какие материалы называют неньютоновскими?
2. Что называют эффективной вязкостью?
3. На какие структуры предложил разделить П.А. Ребиндер пищевые продукты?
4. Как образуются конденсационно-кристаллизационные структуры?
5. На какие группы предложил разбить У.Л. Уилкинсон реальные жидкости с нелинейной кривой течения?
6. Какие два режима движения жидкости существуют в природе?

7. От каких физико-химических особенностей зависит течение неньютоновских жидкостей?
8. Какое течение называют псевдопластическим?
9. Какое степенное уравнение чаще других применяется для описания течения различных пищевых материалов?
10. Назовите известные реологические уравнения течения псевдопластических материалов?
11. Что относится к вязко-пластичным жидкостям?

### **Лекция 13      Приборы, стенды и методы исследования**

#### **План лекции:**

1. Датчики давления пластично-вязких продуктов.
2. Экспериментальные стенды для реологических исследований.
3. Вискозиметрические исследования.

1. Существующие механические манометры, пьезометры, дифманометры и другие приборы неприменимы для измерения давления пластично-вязких мясных продуктов, так как исследуемый продукт проникает в измерительный элемент и прибор оказывается нечувствительным к изменению давления. Это проблема решается путем использования механических датчиков с буферной жидкостью, где в качестве регистрирующего прибора применен обычный или контактный манометр.

Для измерения давления пластично-вязких систем с помощью обычного механического манометра фирма VEB MESSGERATEWERK BEIER-FELD (Германия) используют промежуточные обменники давления. Они состоят из двух полостей, разьединенных между собой мембраной. Полость в сторону манометра заполнена буферной жидкостью для передачи давления, а другая полость соприкасается с измеряемой средой.

Для более широкого использования аналогичных датчиков давления в трубопроводах при транспортировании по ним сильновязких и пластично-вязких жидкостей и материалов с механическими включениями С.Ф. Коган разработал устройство, снабженное дополнительным цилиндром с фланцами, которые расположены коаксиально чувствительному элементу, выполненному в виде патрубка. Внутренняя поверхность дополнительного цилиндра образует с наружной поверхностью патрубка (чувствительный элемент) герметичную камеру, которая заполнена буферной жидкостью и соединена с измерительным манометром и компенсационным устройством. При заполнении камеры буферной жидкостью с помощью компенсационного устройства создают давление, величину которого выбирают такой, чтобы напряжение в стенке чувствительного элемента не превышало расчетного. Затем устройство тарируют.

Механические датчики с буферной жидкостью просты по конструкции, но требуют частых смен резиновых мембран и диафрагм.

С целью повышения точности замера А.С. Лев и Г.И. Гераскин разработали тензометрический датчик, состоящий из упругого элемента, выполненного в виде цилиндрической тонкостенной трубки, закрытой с одной стороны штуцером, а с другой крышкой. В этих датчиках силовым элементом является упругая стальная мембрана, регистрирующим - тензометр, пьезоэлемент, потенциометр.

Для упрощения конструкции тензодатчиков В.К. Зайцев предложил рабочий и компенсационный тензорезисторы в виде одного витка тензопровода в стеклоизоляции, уложенного в прорези на торце упругого элемента.

2. В лабораторных условиях вязкость сред определяют на специальных стендах. Принципиальные схемы стендов для измерения вязкости капиллярными вискозиметрами состоят из вискозиметров, помещенных в открытый или герметичный сосуд, и термостатов. Термостатирование исследуемой жидкости в приборе занимает от 10 до 30 мин в зависимости от объема. За это время температура достигает температуры жидкости в термостате и восстанавливается структура, т. е. создаются условия, идентичные предыдущему измерению. При кратковременном термостатировании температурные ошибки дают существенные отклонения значений вязкости от истинной ее величины.

Стенд для измерения вязкости стеклянным капиллярным вискозиметром при различной температуре показан на рис. 1, а. Он включает вискозиметр 1, сосуд с термостатирующей жидкостью 2 и ультратермостат 3.

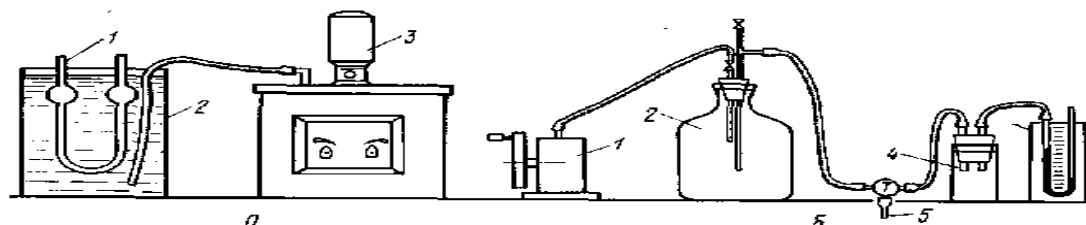


Рис. 1. Стенды для измерения вязкости:  
а - при различной температуре, б - при различном давлении.

При измерениях вязкости вискозиметрами типа Уббелодде необходимо с одной стороны капилляра создавать давление или вакуум. Для этого используют установку (см. рис. 1, б), состоящую из воздушного насоса 1, который может работать как компрессор или вакуум-насос, бутылки-моноста 2 объемом 8÷10 л с пробкой, U-образного жидкостного манометра 3 или микроманометра, сосуда 4, который является ловушкой жидкости, выбрасываемой из манометра, и трехходового крана 5 для регулирования подачи воздуха. Перед началом измерения давление во всех емкостях должно быть выравнено. Избыточное давление при течении жидкости по капилляру создает возможность турбулизации потока, поэтому проверку на ламинарность по критерию Рейнольдса следует провести особенно тщательно.

Общими условиями в методике работы на всех приборах являются компоновка стенда и строгая горизонтальная или вертикальная установка прибора; заполнение сухого тщательно промытого прибора исследуемым продуктом и его термостатирование при выбранной температуре; измерение времени истечения определенного объема, которое обусловлено вязкостью и разностью высот или гидростатических давлений.

3. Методика ротационной реометрии принципиально подобна капиллярной, т.е. измерительные стенды должны позволять варьировать геометрические, кинематические, динамические, энергетические и технологические факторы. Обобщение экспериментально полученных величин также аналогично.

Однако в вопросах методологии ротационной реометрии в большей мере, чем в капиллярной, существует формальный подход к трактовке экспериментальных данных.

Поэтому применительно к задачам ротационной реометрии целесообразно выделить следующие общие приемы практического проведения исследований.

- 1) Изучение теории вопроса.
- 2) Критический анализ существующих исследований в данной области.
- 3) Проведение предварительных экспериментов, которые нужны для проверки прибора и его градуировки.
- 4) Разработка теории прибора или использование существующей на основе полученной математической модели деформации.
- 5) Основные эксперименты проводят с учетом предыдущего. Особого внимания заслуживает отбор проб, который следует проводить в соответствии с принятой в техноконтроле методикой. Кроме того, реализация поставленных задач реометрии требует комплексного изучения влияния на реологические характеристики составных частей продукта и технологических факторов.
- 6) Обобщение экспериментов проводят традиционно: по разработанной теории (п. 4) определяют константы прибора, затем рассчитывают величины характеристик. Их зависимость от технологических факторов может быть установлена, когда: а) вид формулы известен (например, исходя из теории процесса) и б) вид формулы неизвестен, его устанавливают графоаналитической обработкой экспериментальных данных, т. е. подбором наиболее приемлемой для целей практики эмпирической зависимости.

Для облегчения вычислений используют ЭВМ, для которой программу к той или иной математической зависимости удобнее всего представить по методу наименьших квадратов. При этом точность вычислений, особенно представления конечных данных, должна быть соизмерима с ошибкой экспериментов. Обычно для малоструктурированных систем и ньютоновских жидкостей ошибки не превышают  $\pm 3\%$ , для вязкопластичных продуктов  $\pm 10\%$ .

- 7) Проверку выполняют путем расчета характеристик по полученным формулам. При этом может быть составлена многомерная таблица, в которой аргу-

менты — независимые переменные — представлены в виде чисел, удобных для интерполяции.

### **Вопросы для самоконтроля:**

1. Какие приборы неприменимы для измерения давления пластично-вязких мясных продуктов?
2. Какие датчики используются для измерения давления пластично-вязких мясных продуктов?
3. Каково устройство промежуточных обменников давления?
4. Какое устройство разработал С.Ф. Коган?
5. Из чего состоит тензометрический датчик, разработанный А.С. Львом и Г.И. Гераскиным?
6. Что предложил В.К. Зайцев?
7. Какова конструкция стендов для измерения вязкости?
8. В чем заключается методика работы на стендах?
9. В чем сущность методики ротационной реометрии?

## **Лекция 14 Уравнения движения пластично-вязких продуктов**

### **План лекции:**

1. Эпюры относительных скоростей при течении «степенной» жидкости в круглой трубе.
2. Эпюры градиентов скоростей при течении «степенной» жидкости в круглой трубе.
3. Опытные эпюры деформационного поведения мясного фарша по поперечному сечению потока.

1. Течение вязкопластичного тела, описываемого уравнением Букингама, может быть представлено в виде трех зон: центральная часть потока (ядро) движется как твердый стержень с максимальной скоростью, испытывая незначительные деформации; в следующем цилиндрическом слое — промежуточном — скорость уменьшается несколько быстрее, чем в ядре; в пристенном слое скорость достигает нулевого значения, т. е. тончайший слой продукта прилипает к стенке трубы вследствие высокой адгезии. Такой механизм движения может вызывать перемещение к стенке мельчайших частиц третьей фазы, особенно заметное, если они обладают пониженной когезионной способностью к двум другим фазам и повышенной адгезионной способностью к материалу стенки трубы.

Структурный режим может быть осложнен проскальзыванием продукта относительно стенки, что наблюдается у пластичных высококонцентрированных грубодисперсных систем, например при движении обезжиренного творога или измельченного мяса со средним размером частиц 0,003 м и более, если содержание жировых частиц очень мало.

Значительно расширяет представление о режимах течения модель движения степенной жидкости, эпюры относительных скоростей которой при течении по круглой трубе показаны на рис. 1.

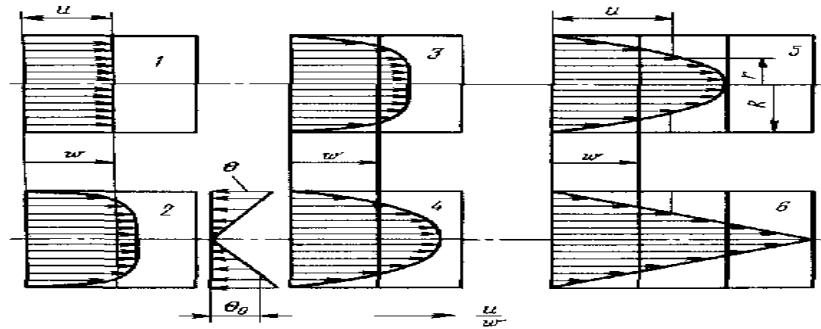


Рис. 1. Эпюры относительных скоростей при течении по круглой трубе степенной жидкости, имеющей различные индексы течения: 1 - 0; 2 - 0,1; 3 - 0,2; 4 - 0,5; 5 - 1,0; 6 -  $\infty$ ;  $\omega$  - средняя скорость по объемному расходу;  $u$  - локальная скорость элементарного слоя;  $\theta$  - напряжение сдвига;  $\theta_0$  - предельное напряжение сдвига.

Сравнение эпюр скоростей и градиентов скоростей показывает, что при малых индексах течения (0,1; 0,2; 0,3) относительная скорость смещения в ядре потока очень мала, градиент скорости практически равен нулю. Это позволяет распространить действие закона степенной жидкости на вязкопластичные системы, обладающие предельным напряжением сдвига, что значительно облегчает практические расчеты и повышает их точность и достоверность.

3. Важное значение в реометрии имеет правильный выбор математической модели течения продукта. Модель определяет реограмма (кривая течения) при условии, что константы, вычисленные вдоль всей кривой течения, остаются неизменными. Правильность выбранной модели могут подтвердить эпюры скоростей и деформаций. Рассмотрим в качестве типичного примера течение мясного фарша по трубам длиной 1,33 и 2,62 м при различных скоростях продукта и температурах стенки. В соответствии с разработанной ранее методикой использовали разрезанную по оси трубу, которую заполняли продуктом, снимали со стенда, в торец заполненной трубы помещали тонкий слой подкрашенного продукта, устанавливали трубу на стенд и с заданной скоростью прокачивали продукт на определенное расстояние. Затем трубу снимали, замораживали продукт в ней и разрезали его по оси. Эпюры деформаций фотографировали (рис. 3).

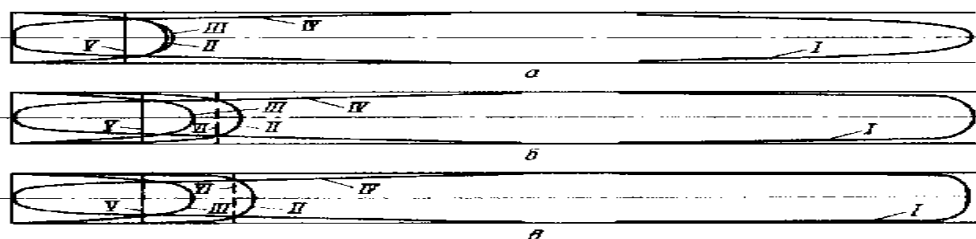


Рис. 3. Эпюры деформационного поведения мясного фарша по поперечному сечению потока при различных температурах стенки трубы (в °C): а - 20; б -



37;  $v$  – 44; *I* - опытная эпюра деформаций; *II* – опытная эпюра скоростей, *III* - расчетная эпюра скоростей; *IV* - эпюры градиентов скоростей; *V* - средняя скорость потока; *VI* - средняя скорость потока в трубопроводе с равномерно обогреваемой стенкой.

Опытные эпюры скоростей строили путем деления длины удаления соответствующей точки от начала трубы на время замера. Одновременно при известной средней скорости строили теоретическую эпюру с последующей проверкой по формуле (1). Как видно из рис. 3, теоретическая и экспериментальная эпюры скоростей хорошо совпадают. Эпюры градиентов скоростей строили по формуле (3).

### **Вопросы для самоконтроля:**

1. Из каких зон состоит течение вязкопластичного тела?
2. По каким выражениям вычисляют абсолютные значения локальной и среднеобъемной скоростей степенной жидкости?
3. По какому уравнению определяются градиенты скоростей степенной жидкости?
4. Что представляют собой эпюры градиентов скоростей степенной жидкости?
5. Что показывает сравнение эпюр скоростей и градиентов скоростей?
6. Как можно подтвердить правильность выбранной модели?
7. Каким образом исследовали течение мясного фарша по трубам длиной 1,33 и 2,62м при различных скоростях продукта и температурах стенки?

## **Лекции 15    Устройства для перемещения пластично-вязких пищевых продуктов**

### **План лекции:**

1. Общие сведения о насосах. Основные типы насосов.
2. Общая схема насосной установки.
3. Принципиальные схемы винтовых и объемных насосов.

**1. Гидравлическими машинами** называются устройства, которые служат для преобразования механической энергии двигателя в энергию перемещаемой жидкости, повышая ее удельную энергию (насосы), или для преобразования энергии движущегося потока жидкости в механическую энергию (гидравлические турбины). Гидравлическим приводом называется гидравлическая система, которая состоит из насоса и гидродвигателя с соответствующей регулирующей и распределительной аппаратурой и служит для передачи, посредством рабочей жидкости, энергии на расстояние.

Насос – гидравлическая машина, служащая для транспортирования жидкости и, повышая удельную энергию потока капельной жидкости, независимо от того, какими средствами эта задача выполняется.

Насосы являются одной из наиболее распространенных машин в любом производстве и по принципу действия могут быть классифицированы следующим образом

- 1) Лопастные насосы (энергия потоку сообщается при помощи вращающегося лопастного колеса;
- 2) Объемные насосы – поршневые и ротационные (действуют по принципу механического вытеснения жидкости твердым телом);
- 3) Струйные насосы (для повышения удельной энергии жидкости используется кинетическая энергия струи другой жидкости);
- 4) Гидравлические тараны (удельная энергия в потоке жидкости повышается за счет энергии гидравлического удара);
- 5) Эрлифты или газлифты (подъем жидкости осуществляется за счет уменьшения ее объемного веса путем смешения с воздухом или газом).

2. Общая схема насосной установки представлена на рис. 1.

Для того чтобы установить степень экономичности и рациональные методы эксплуатации насосной установки, наметить пути ее технического совершенствования, необходимо знать основные рабочие параметры насоса, характеризующие его работу:

|  |                              |
|--|------------------------------|
| 1. объемная секундная подача (подача насоса) | $V_c, \text{ м}^3/\text{с};$ |
| 2. напор насоса                              | $H, \text{ м};$              |
| 3. мощность насоса                           | $N, \text{ кВт};$            |
| 4. коэффициент полезного действия насоса     | $\eta.$                      |

Подача насоса – количество жидкости, подаваемое насосом в единицу времени;

Напор насоса – разность полных напоров на выходе из насоса и на входе в насос. Обычно напор выражается в метрах столба перекачиваемой жидкости.

Мощность насоса – количество затрачиваемой насосом энергии для перемещения жидкости в единицу времени. Различают теоретическую (полезную) мощность и полную мощность, затрачиваемую двигателем.

Коэффициент полезного действия насоса – отношение полезной мощности к полной. Он равен произведению трех коэффициентов полезного действия (к.п.д.): объемного, гидравлического и механического. Объемный к.п.д. учитывает потери объема жидкости (уменьшение подачи). Гидравлический к.п.д. и механический к.п.д. – соответственно уменьшение напора насоса и трение между элементами машин.

3. **Классификация роторных насосов**, принцип действия. Устройство и особенности роторных насосов различных типов: а) роторно-поршневых; б) пластинчатых (шиберных); в) винтовых; г) шестеренных. Определение рабочих объемов. Подача и ее равномерность. Регулирование подачи. Характеристики насосов, их работа на трубопровод.

Насосы для транспортирования пластично-вязких продуктов бывают винтовые и объемные. В основу расчета винтовых насосов положены следующие допущения: обрабатываемый продукт принимается несжимаемым, полностью заполняет межвитковое пространство и движется в нем сплошным потоком; режим течения ламинарный; ускорением продукта и силами инерции пренебрегаем; теплообмен продукта с окружающей средой отсутствует.

Для материалов, течение которых описывается степенным законом, уравнения расхода, перепада давления и потребной мощности для шнека, имеющего малый угол подъема винтовой линии и число заходов.

Объемные насосы. Общие положения, принцип действия, общие свойства и классификация. Область применения.

Устройство, конструктивные схемы и области применения поршневых насосов.

Графики подачи и способы ее выравнивания. Индикаторная диаграмма. КПД поршневых насосов. Определение высоты всасывания. Регулирование подачи поршневых насосов. Воздушные колпаки. Диафрагменные насосы. Поршневые компрессоры.

### **Вопросы для самоконтроля:**

1. Что называют гидравлическими машинами?
2. Дайте определение гидравлическому приводу?
3. Что такое насос?
4. Как классифицируются насосы?
5. Из чего состоит насосная установка?
6. Какие основные рабочие параметры насоса необходимо знать, для того чтобы установить его степень экономичности и рациональные методы эксплуатации?
7. Что такое подача и напор насоса?
8. Как определяется мощность насоса?
9. Какие различают виды мощности?
10. Что такое коэффициент полезного действия насоса?
11. Как классифицируются роторные насосы?
12. Какие бывают насосы для транспортирования пластично-вязких продуктов?

## 2 ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ

### 2.1 Определение усилий среза продуктов

#### **Цель занятия:**

Ознакомиться с конструкцией, принципом работы и эксплуатацией прибора ПМ-3 для определения усилия среза, приобрести практический опыт определения усилия среза продуктов.

**Методические рекомендации** по проведению работы и обработке экспериментальных данных:

#### 1. Конструкция приборов для определения усилий среза.

Усилие среза характеризует прочность и жесткость системы, которые тесно связаны с качественным составом белков в мясе и стадиями автолиза мышечной ткани. Оно используется для объективной оценки их консистенции.

Прибор для испытания на срез колбасных изделий представляет собой устройство, состоящее из рабочего органа, установленного на рейках. Поступательное движение сообщается ему от электродвигателя через редуктор. Усилие среза образца передается на балку, которая, изгибаясь, деформирует тензодатчик, сигнал передается на потенциометр. Чем больше усилие среза, тем больше отклонение стрелки потенциометра. Пик кривой показывает максимальное усилие. Эксплуатация прибора в промышленных условиях показала, что дает четкие и стабильные результаты для однородных по структуре колбас.

Прибор для определения нежности мяса, рыбы, овощей и других пищевых продуктов основан на измерении усилия среза образца, имеющего определенные размеры. Прибор снабжен ножом толщиной 1 мм. В квадратном сечении ножа помещается цилиндрический образец продукта. Нож передвигается в узкой щели между двумя пластинами, а усилие среза указывается прибором.

Тендерометр – это прибор, в котором сделана попытка имитировать жевание продукта зубами. Образец исследуемого продукта с размерами по сечению  $12,7 \times 6,35$  мм сжимается между нижним неподвижным клином и верхним опускающимся клином. При этом регистрируется постепенное нарастание усилия при внедрении клиньев до момента их встречи.

В США создан так называемый зубной тендерометр, в котором жевательный процесс имитируется пластмассовым рядом зубов, щеками и языком. Верхняя челюсть приводится в движение электродвигателем. Слюна служит смазывающим веществом. Усилие жевания измеряется с помощью тензометрического датчика, а усиленный сигнал поступает в электронный осциллограф. Зубной тендерометр успешно применен для измерения нежности и других механических параметров плодов, овощей, мяса и кондитерских изделий.

Сектилометр позволяет определять консистенцию твердых и полутвердых материалов. Тонкая проволока, натянутая на раму, представляет собой режущее приспособление. Проба стандартного размера помещается на платформу и ее поверхность приводится в соприкосновение с проволокой. При движении платформы вверх с постоянной скоростью 0,07 мм/с проволока разрезает пробу.

Давление на проволоку передается от металлической рамы у уравнивающего рычагу, где оно регистрируется.

## 2. Методика определения усилия среза продуктов.

Метод определения усилия среза основан на измерении давления, необходимого для разрушения образца путем среза в камере постоянного объема. Усилие среза определяют на приборе ПМ-3.

Для определения усилий среза образцов на приборе ПМ-3 на специальном устройстве для вырезания образцов легким нажимом ломтика сырого или вареного продукта на вращающийся трубчатый нож вырезают ровный цилиндрический образец диаметром 10 мм. Полученный образец извлекают с помощью выталкивателя.

Для определения усилий среза включают прибор ПМ-3 тумблером ВК в электросеть. Рукояткой выводят стрелку прибора на нуль и совмещают отверстия в пластине рабочего органа и смещающегося хомута. Подготовленный образец продукта осторожно помещают в образовавшееся цилиндрическое отверстие, вставляют прижимные пластины с ножевой поверхностью на конце в направляющие для срезания излишков продукта и фиксирования образца. Нажатием кнопки «Пуск» приводят в движение привод рабочего органа, смещающаяся пластина которого производит срез образца.

Усилие, необходимое для среза образца, передается тензобалке и через тензодатчик в виде пика на ленте потенциометра.

Экспериментально полученные данные оформляют в виде таблицы 1.1:

Таблица 1.1

| Наименование и характеристика образца | Усилие среза |
|---------------------------------------|--------------|
|                                       |              |

## 3. Измерение и расчет усилий среза.

### Вопросы для самопроверки и защиты лабораторной работы:

1. Что характеризует усилие среза?
2. Что представляет собой прибор для испытания на срез колбасных изделий?
3. Как работает прибор для испытания на срез колбасных изделий?
4. На чем основан принцип действия прибора для определения нежности мяса, рыбы, овощей и других пищевых продуктов?
5. Что такое тендерометр?
6. Что представляет собой тендерометр, созданный в США?
7. Что позволяет определять сектилометр?
8. На чем основан метод определения усилия среза?
9. Какой прибор используют для определения усилия среза?
10. Как работает прибор ПМ-3?

## 2.2 Определение сдвиговых свойств на коническом пластометре

**Цель занятия:** Ознакомиться с конструкцией, принципом работы и эксплуатацией конического пластометра для определения сдвиговых свойств, приобрести практический опыт определения сдвиговых свойств продуктов.

### Методические рекомендации:

#### 1. Конструкция приборов для определения сдвиговых свойств.

Сдвиговые свойства проявляются при касательном смещении слоев продукта, который может представлять собой жидкую или твердообразную систему, а также твердое тело, т.е. неразрушенную структуру (целые ткани мяса, кость, сы, твердый жир и пр. К сдвиговым свойствам относятся предельное напряжение сдвига (ПНС), напряжения сдвига, модуля сдвига, вязкость и др.

Приборы для измерения величин сдвиговых свойств пищевых систем имеют определенную специфику. К ним можно отнести пластометры, ручной пенетромтр, прибор КЗТ-1, полуавтоматические и автоматические пенетромтры и текстурограф.

Конические пластометры получили широкое распространение в реологических исследованиях из-за простоты устройства и надежности в работе. Устройство приборов такого типа состоит из кюветы с исследуемым продуктом, конуса со штангой и поперечиной, обоймы для осевого перемещения штанги с фиксатором и индикатора часового типа для измерения перемещения штанги.

#### 2. Методика определения сдвиговых свойств продуктов.

Пластометр устанавливают по уровню с помощью трех винтов в станине. Готовят модельный материал соответствующей консистенции. Исследуемый образец помещают в кювету прибора. Выравнивают металлической линейкой поверхность модельного фарша так, чтобы масса в сосуде находилась на уровне с его краями. Кювету с исследуемым образцом устанавливают на столик прибора и поднимают вверх до соприкосновения поверхности с острием конуса. Для значительных перемещений ослабляют стопорный винт механизма подъема столика и свободно перемещают столик. Для точной регулировки положения поверхности материала относительно острия конуса пользуются микрометрической гайкой. При необходимости контролируют и устанавливают нулевое положение индикатора. Нажимают пусковую кнопку, включают секундомер и, слегка придерживая в начальный момент штангу, опускают конус. По мере погружения конуса в материал через каждую минуту фиксируют глубину погружения рифленого конуса по индикатору. Следует считать, что погружение заканчивается через 3-5 мин, так как по истечении этого времени конус опускается на незначительную глубину, чем практически можно пренебречь. Длительность погружения 180-300 с соответствует наибольшему периоду релаксации используемых для исследования материалов.

Для каждого исследуемого образца следует выполнить 5-6 измерений.

Фиксируют величину угла  $2\alpha$  при вершине конуса, константу конуса  $K$  (м/кг), общую массу  $m_{\text{общ}}$  (кг) штанги, конуса и дополнительного груза при его наличии.

При использовании дополнительного груза строят тарировочную кривую пружины индикатора в виде зависимости между массой грузов и вызываемых ими перемещений штока индикатора

$$h_{\text{инд}} = f(m_{\text{общ}})$$

Для каждого значения величины перемещения штока индикатора  $h_{\text{инд}}$  фиксируют соответствующую массу груза  $m_{\text{д}}$ . Расчетное значение массы грузов определяют из выражения

$$m_{\text{общ}} = m_0 + m_{\text{инд}}$$

Для каждого образца вычисляют значения ПНС  $\theta$  (Па) при фиксированной длительности погружения:

$$\theta = K \frac{m}{h^2} = K \frac{m_{\text{общ}} - m_{\text{инд}}}{h^2}$$

Находят среднеарифметическое значение ПНС для каждого из вариантов исследуемых образцов

$$\theta_0 = \frac{\sum \theta_i}{i}$$

где  $i$  – количество измерений.

Для каждого варианта исследуемого образца строят график зависимости глубины погружения конуса прибора от длительности погружения.

Экспериментальные величины и расчетные данные вносят в таблицы 2.1 рекомендуемых ниже форм:

Таблица 2.1

| Угол при вершине конуса $2\alpha$ , град | Константа конуса $K$ , м/кг | Общая масса $m_{\text{общ}}$ , кг | Масса дополнительного груза $m_{\text{инд}}$ , кг |
|--|-----------------------------|-----------------------------------|---|
|  |                             |                                   |   |

| Наименование и характеристика образца | Длительность погружения конуса, с | Глубина погружения $h$ , м | Предельное напряжение сдвига $\theta_0$ , Па | Среднеарифметическое значение ПНС $\theta_0$ , Па |
|---------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------|--|---|
|                                       |                                   |                            |  |   |

### 3. Измерение и расчет предельного напряжения сдвига продукта.

#### Вопросы для самопроверки и защиты лабораторной работы:

1. Что такое сдвиговые свойства?
2. Какие свойства продуктов относятся к сдвиговым?

3. Какие приборы относят к приборам для измерения величин сдвиговых свойств?
4. Каково устройство конических пластометров?
5. В чем заключается методика определения сдвиговых свойств продуктов?
6. Как определяют расчетное значение массы грузов?
7. По какой формуле вычисляют значения ПНС при фиксированной длительности погружения?
8. Как находят среднеарифметическое значение ПНС для каждого из вариантов исследуемых образцов?

### 2.3 Определение предельного напряжения сдвига и эффективной вязкости на ротационном вискозиметре РВ-8

**Цель занятия:** Ознакомиться с конструкцией, принципом работы и эксплуатацией ротационного вискозиметра для определения сдвиговых свойств, приобрести практический опыт определения сдвиговых свойств продуктов.

#### **Методические рекомендации:**

##### 1. Конструкция ротационного вискозиметра.

В настоящее время насчитывается несколько сотен конструкций ротационных вискозиметров, которые можно разделить на две основные группы. К первой группе относятся приборы, имеющие постоянный момент вращения ротора при переменной частоте вращения, ко второй – приборы, имеющие постоянную частоту вращения ротора при переменном вращающем моменте.

В странах СНГ наибольшее распространение получили вискозиметры РВ-8 системы профессора Воларовича, относящиеся к первой группе. При исследовании структурно-механических свойств с помощью ротационных вискозиметров особо важное значение приобретают правильный выбор и учет размеров рабочих органов прибора, а также математическая модель для обобщения экспериментальных данных.

Вискозиметр РВ-8 предназначен для испытания относительно вязких материалов и используется для определения вязкости и ПНС широкого круга пищевых материалов: мучного теста, полуфабрикатов хлебопекарного производства, различных видов мясного и рыбного фарша, плодово-ягодной мезги, абрикосового сока, томатных концентратов, конфетной массы, сахарно-паточно-молочного сиропа и молочной помады, эмульсий для сахарного и затяжного печенья, какао тертого, теста для пирожных и т.д. Опыты могут вестись при температуре от -60 до 150 °С. Пределы измерения вязкости – от 0,5 до  $10^6$  Па·с, напряжение сдвига от 5 до  $10^4$  Па.

Наружный цилиндр ( $R_n = 1,9$  см) неподвижен. Внутренний цилиндр ( $R_v = 0,605$  см) приводится во вращение при помощи падающих грузов. Длина ротора  $L_v = 8$  см. отсчет углов поворота производится визуально по шкале и указателю с использованием секундомера.



Устройство вискозиметра РВ-8. Внутренний ротор с полусферическим днищем установлен внутри неподвижного наружного цилиндра. Переходная втулка соединяет внутренний ротор с валом, который вращается на двух шариковых подшипниках, установленных в установочной шайбе. На верхнем конце вала закреплен шкив, который стопорится специальным фиксатором. При нажатии на фиксатор шкив с цилиндром освобождаются и приводятся во вращение под действием падающих грузов, подвешенных на тросе через балку. Угол поворота цилиндра определяется по перемещению стрелки на неподвижной шкале. Время вращения ротора определяется по секундомеру. Наружный цилиндр закреплен в текстолитовой шайбе и застопорен в ней штифтами. Стенки сосуда покрыты теплоизоляционным материалом, в них закреплены электронагревательные элементы. Для испытаний при температуре ниже комнатной термостат заполняют керосином или спиртом, в который бросают кусочки твердой углекислоты.

### **Методика определения ПНС и эффективной вязкости на ротационном вискозиметре РВ-8.**

Методика сводится к подготовке прибора, измерениям и разборке. Подготовка включает установку вискозиметра по уровню, определение силы трения в подшипниках, заполнение рабочего объема исследуемым материалом и его термостатирование. Для определения реологических характеристик исследуемый образец массой 15-17 г помещают в наружный цилиндр вискозиметра. Находящийся в крайнем нижнем положении. В случае изучения зависимости реологических свойств исследуемых образцов от температуры включают термостат и материал обрабатывают в течение 20-30 мин при температуре, заданной преподавателем. Наружный цилиндр при помощи подъемного устройства приводят в рабочее положение и фиксируют с помощью винта. Излишки образца убирают скальпелем, шпателем или ножом. Конкретные условия определения сдвиговых свойств апробируют применительно к изучаемому объекту. Устанавливают фиксированный груз на блоке, освобождают шкив со стопора, одновременно включая секундомер. После остановки системы и прекращения вращения шкива секундомер выключают. Фиксируют массу груза  $m$  (г), число оборотов шкива  $n$  и время вращения шкива.

Во время измерений меняют массу грузов  $M$  (кг) и для каждого груза определяют частоту вращения ротора  $N$  (максимальная частота вращения может достигать  $2-2,5 \text{ с}^{-1}$ ). Каждый опыт состоит из 30-40 замеров, проводимых несколько раз с постепенным увеличением и уменьшением массы грузов. Одновременно строят реограммы  $N=a(M)$ . После этого определяют константы опыта по формулам. Вычисляют эффективную вязкость для каждой опытной точки по уравнению

$$\eta_{эф} = kM / N$$

По окончании измерений приводят прибор в исходное положение. При этом отмечают высоту контакта рифленной поверхности внутреннего цилиндра с

исследуемым материалом  $h$  (см). Строят график зависимости эффективной вязкости от окружной скорости  $\omega = 2\pi R_B N$  в логарифмических шкалах. Через полученные экспериментальные точки проводят прямую линию так. Чтобы она делила относительные отклонения расстояний между точками и прямой на равные части. Составляют уравнение этой прямой, определяют темп разрушения структуры  $m$ . Значение коэффициента эффективной вязкости определяют по формуле

$$\eta_{эф} = B(\omega / \omega_1)^{-2} = B\omega_*^{-m}$$

где  $B$  - эффективная вязкость при фиксированном значении окружной скорости, Па·с;  $\omega_1$  - фиксированное единичное значение окружной скорости боковой поверхности ротора коаксиально-цилиндрического вискозиметра ( $\omega_1=1$  м/с);  $\omega_*$  - безразмерная окружная скорость.

После определения по полученным экспериментальным данным индекса течения  $n=1-m$  рассчитывают инвариантную для любых коаксиально-цилиндрических ротационных вискозиметров реологическую константу  $B_0^*$  по формуле, учитывающей закон изменения градиента скорости.

Затем вычисляют реологические константы – ПНС  $\theta_0$  и пластическую вязкость  $\eta_{пл}$ , ориентируясь на график зависимости  $N(M)$ . При этом точки для вычислений берут непосредственно с кривой.  $\theta_0$  и  $\eta_{пл}$  определяют в следующей последовательности. ПНС соответствует отрезку, отсекаемому кривой  $N(M)$ , по оси абсцисс ( $M_0$ ). Его определяют по формуле

$$\theta_0 = k_0 M_0$$

Напряжение сдвига на поверхности ротора

$$\theta_0 = k_0 M$$

Пластическую вязкость в зависимости от того, распространяется ли сдвиг на всю толщину кольца продукта (в зазоре между ротором и стаканом), рассчитывают по одной из приведенных ниже формул.

Первый случай – сдвиг распространяется на всю толщину кольца, когда масса нагрузки  $M_0$  больше массы нагрузки  $M_1=k_1\theta_0$ . В этом случае пластическую вязкость определяют по формуле

$$\eta_{пл} = (kM - k_2\theta_0) / N$$

Все расчеты пластической вязкости, когда сдвиг распространяется на всю толщину кольца исследуемого продукта, рекомендуется сводить в таблицу 3.1:

Таблица 3.1

| Константа опыта $k$ |     |      |               |                      | $k_2$                                |
|---------------------|-----|------|---------------|----------------------|--------------------------------------|
| $N$                 | $M$ | $kM$ | $k_2\theta_0$ | $(kM - k_2\theta_0)$ | $\eta_{пл} = (kM - k_2\theta_0) / N$ |
|                     |     |      |               |                      |                                      |

3. Измерение и расчет предельного напряжения сдвига и эффективной вязкости продукта.

### Вопросы для самопроверки.

1. На какие группы можно разделить ротационные вискозиметры?
2. Для чего предназначен вискозиметр РВ-8?
3. На чем основан принцип действия вискозиметра РВ-8?
4. Назовите устройство вискозиметра РВ-8?
5. В чем заключается методика определения ПНС и эффективной вязкости на ротационном вискозиметре РВ-8?
6. какие приспособления используют при определении ПНС и эффективной вязкости на ротационном вискозиметре РВ-8?
7. Какова максимальная частота вращения ротора?
8. Сколько замеров проводят во время опыта?
9. По какому уравнению вычисляют эффективную вязкость?
10. По какой формуле определяют значение коэффициента эффективной вязкости?
11. Каким образом вычисляют реологические константы – ПНС и пластическую вязкость?

### 2.4 Определение предельного напряжения сдвига и эффективной вязкости на ротационном вискозиметре типа «Реотест»

**Цель занятия:** Ознакомиться с конструкцией, принципом работы и эксплуатацией ротационного вискозиметра типа «Реотест» для определения сдвиговых свойств, приобрести практический опыт определения сдвиговых свойств продуктов.

#### Методические рекомендации:

1. Конструкция ротационного вискозиметра типа «Реотест».

Ротационный вискозиметр типа «Реотест» предназначен для определения динамической вязкости ньютоновских жидкостей, так и для проведения глубоких реологических исследований неньютоновских жидкостей. Им можно измерить следующие показатели текучести: структурную вязкость, пластичность (предел текучести) и тиксотропию.

Ротационный вискозиметр состоит из четырех основных узлов: станины с синхронным электроприводом, блока многоступенчатого редуктора с переключателем скоростей и измерительного блока, которые объединены в общем корпусе, а также измерительной головки, состоящей из четырех сменных цилиндрических роторов, двух сменных стаканов со съемным дном и водяной бани. В полностью укомплектованный стенд для проведения исследований помимо прибора входят ультратермостат и самопишущий логометр.

Внутри станины прибора установлен синхронный электродвигатель, соединенный с 12-ступенчатой коробкой передач, которая позволяет изменять частоту вращения внутреннего цилиндра от 0 до  $1500 \text{ с}^{-1}$ . Крутящий момент от коробки передач передается ведущему валу и далее через спиральную пружину - ведомому валу, соединенному с внутренним цилиндром муфтой. Наружный

цилиндр крепится к корпусу вискозиметра специальным зажимом. В приборе имеется термостатирующий сосуд. Величина крутящего момента отсчитывается по шкале прибора, скорость вращения - по указателю. Измеритель моментов торсионного типа с омическими датчиками работает на принципе превращения механических усилий в электрические импульсы. Показания прибора прямо пропорциональны крутящему моменту, а также напряжению сдвига и вязкости исследуемого материала. Частота вращения синхронного электродвигателя и внутреннего цилиндра зависит от напряжения тока в сети. Отклонения от номинальной частоты 50 Гц фиксируются прибором.

#### Методика определения ПНС и эффективной вязкости продуктов.

Предварительно выбирают соответствующую измерительную головку, руководствуясь таблицей 4.1 для определения сдвиговых характеристик того или продукта затем фиксируют при помощи цангового зажима выбранный измерительный ротор на выходном валу измерительного блока.

Таблица 4.1- Пределы измеряемых реологических характеристик, соответствующих индексам измерительных головок

| Индекс измерительных головок | Соотношение радиусов роторов и стаканов $R_B/R_H$ | Область напряжений $\theta$ | Напряжение сдвига $\theta$ , Па | Скорость деформации $\dot{\gamma}$ , $s^{-1}$ | Эффективная (динамическая) вязкость $\eta$ , Па·с |
|------------------------------|---|-----------------------------|---------------------------------|---|---|
| $S_1$                        | 0,98  | I                           | 11-110                          | 1,5-1310                                      | 0,01-75   |
|                              |   | II                          | 55-550                          | 1,5-1310                                      | 0,05-375  |
| $S_2$                        | 0,94  | I                           | 12-120                          | 0,5-437                                       | 0,03-240  |
|                              |   | II                          | 60-600                          | 0,5-437                                       | 0,15-1200   |
| $S_3$                        | 0,81  | I                           | 16-160                          | 1/6-146                                       | 0,12-1000   |
|                              |   | II                          | 80-800                          | 1/6-146                                       | 0,6-5000  |
| H                            | 0,81  | I                           | 60-600                          | 1/6-146                                       | 0,4-3600  |
|                              |   | II                          | 300-3000                        | 1/6-146                                       | 2-18000   |

Для наполнения цилиндрического измерительного устройства в мерный бачок вносят рекомендуемый объем (массу) исследуемого образца.

Таблица 4.2

| Тип измерительной головки            | $S_1$ | $S_2$ | $S_3$ | H  |
|--------------------------------------|-------|-------|-------|----|
| Объем (массы) образца, $cm^3$<br>(г) | 25    | 3     | 50    | 17 |

Константы выбранной измерительной головки определяют в зависимости от жесткости торсиона I-II (положение рукоятки на лицевой панели измерительного блока) из таблицы 4.3.

Таблица 4.3 - Константы измерительных головок

| Тип измеритель- | Константы роторов Z, Па/ед.шкалы |
|-----------------|----------------------------------|
|-----------------|----------------------------------|

| ной головки    | При жесткости торсиона I | При жесткости торсиона II |
|----------------|--------------------------|---------------------------|
| S <sub>1</sub> | 1,19                     | 5,92                      |
| S <sub>2</sub> | 1,23                     | 6,16                      |
| S <sub>3</sub> | 1,69                     | 8,45                      |
| H              | 5,89                     | 29,29                     |

Исследуемый продукт помещают в соответствующий стакан с герметичным закрытым съемным дном и коаксиально ротору по направляющей при помощи винтового зажима фиксируют на измерительном блоке.

При необходимости выполнения измерений при различных значениях температуры стакан герметично фиксируют в водяной бане, которую подключают к ультротермостату, и продукт термостатируют 10-20 мин до установления требуемой температуры.

Прибор подключают к сети напряжением 220В, частотой 50 Гц. Задают требуемую частоту вращения ротора, начиная с минимальной, с помощью переключателя скоростей за счет установки рычага в положение, соответствующее данным таблицы 4.4.

Таблица 4.4

| Степень | Частота вращения $N$ ,<br>$c^{-1}$ | Степень | Частота вращения $N$ ,<br>$c^{-1}$ |
|---------|------------------------------------|---------|------------------------------------|
| 1a      | 0,00926                            | 1в      | 0,00463                            |
| 2a      | 0,01660                            | 2в      | 0,00833                            |
| 3a      | 0,02778                            | 3в      | 0,01389                            |
| 4a      | 0,05000                            | 4в      | 0,02500                            |
| 5a      | 0,08330                            | 5в      | 0,04167                            |
| 6a      | 0,15000                            | 6в      | 0,07500                            |
| 7a      | 0,25000                            | 7в      | 0,12500                            |
| 8a      | 0,45000                            | 8в      | 0,22500                            |
| 9a      | 0,75000                            | 9в      | 0,37500                            |
| 10a     | 1,35000                            | 10в     | 0,67500                            |
| 11a     | 2,25000                            | 11в     | 1,12500                            |
| 12a     | 4,0500                             | 12в     | 2,02500                            |

Для переключения от ступени 1 до ступени 12 требуется 2,5 оборота рукоятки. Промежуточные ступени соответствуют меньшему повороту и индицируются на табло блока многоступенчатого редуктора. Другую частоту вращения ротора можно установить в процессе измерений.

Отклонение показаний измерителя частоты, расположенного на измерительном блоке, от величины 50 Гц требует внесения поправки при расчете частоты вращения ротора по формуле

$$N_{\bar{A}} = Nf / 50,$$

где  $N_{\bar{A}}$  - действительная частота вращения ротора;  $N$  - частота вращения ротора (по табл. 3);  $f$  - индуцируемая частота переменного тока, Гц.

Измеряемое значение напряжения сдвига при различных скоростях вращения ротора выбранной измерительной головки в соответствии с жесткостью торсиона вычисляют по формуле

$$\theta = Z\alpha,$$

где  $Z$  - константа ротора;  $\alpha$  - показания стрелочного логометра.

Для построения реограммы - кривой течения  $N_d(\theta)$  обычно бывает достаточно 12 экспериментальных точек в диапазоне от минимальной до максимальной частоты вращения ротора.

Эффективную вязкость при каждой частоте вращения ротора рассчитывают по формуле

$$\eta_{\text{эф}} = k\theta / N_d,$$

где  $k$  - константа измерительной головки;

$$k = \frac{1 - (R_B / R_H)^2}{4\pi},$$

где соотношение  $R_B/R_H$  для соответствующей измерительной головки берут из таблицы 4.1.

Все данные измерений заносят в журнал наблюдений:

Таблица 4.5

| Номер опыта | Напряжение сдвига $\theta$ , Па | Действительная частота вращения ротора $N_d$ , $\text{с}^{-1}$ | Окружная скорость вращения ротора $\omega = 2\pi R_B N_d$ , $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$ | Эффективная вязкость $\eta_{\text{эф}}$ , Па·с | Температура продукта $t$ , °С |
|-------------|---------------------------------|--|--|--|-------------------------------|
|             |                                 |  |  |  |                               |

По окончании опыта измерительную головку отсоединяют от измерительного блока, разбирают, удаляют исследованный продукт, моют водой, сушат и окончательно обезжиривают при помощи спирта.

### 3. Определение ПНС и эффективной вязкости продуктов.

#### Вопросы для самопроверки и защиты лабораторной работы:

1. Для чего предназначен ротационный вискозиметр типа «Реотест»?
2. Из каких основных узлов состоит ротационный вискозиметр?
3. Каков принцип работы ротационного вискозиметра?
4. Для чего выбирают соответствующую измерительную головку?
5. Для чего вносят рекомендуемый объем (массу) исследуемого образца?
6. В зависимости от чего определяют константы выбранной измерительной головки?
7. Каким образом помещают исследуемый продукт?
8. Сколько времени термостатируют исследуемый продукт?
9. Как подключают прибор к сети?
10. По какой формуле вносят поправку при расчете частоты вращения ротора?
11. Как вычисляют измеряемое значение напряжения сдвига при различных скоростях вращения ротора?
12. По какой формуле рассчитывают эффективную вязкость при каждой частоте вращения ротора?

## 2.5 Определение вязкости на вискозиметре Энглера

**Цель занятия:** Ознакомиться с конструкцией, принципом работы и эксплуатацией вискозиметра Энглера для определения вязкости, приобрести практический опыт определения сдвиговых свойств продуктов.

**Методические рекомендации:**

1. Конструкция вискозиметра Энглера.

Капиллярный вискозиметр Энглера предназначен для определения вязкости некоторых пищевых продуктов, в частности, желатина, клея и т.д.

Вискозиметр Энглера состоит из двух вставленных один в другой металлических сосудов. Внешний сосуд является термостатирующей баней, куда наливают воду или минеральное масло. Для равномерного поддержания температуры жидкость в сосуде перемешивают мешалкой. Внутри резервуара опускают термометр. На внутренней поверхности резервуара имеются три указателя уровня, которые находятся в одной плоскости и служат отметкой для измерения объема жидкости и контроля вертикального положения прибора. Правильным считается положение, когда все три указателя уровня будут едва видны над поверхностью жидкости. В нижней части сосудов находится отверстие для слива испытуемой жидкости, которое закрывается стержнем, проходящим через крышку прибора. Для приема сливаемой жидкости предусмотрена измерительная колба с двумя отметками: на 100 и 200 см<sup>3</sup>.

Метод основан на определении отношения времени истечения испытуемого продукта при заданной температуре ко времени истечения испытуемого продукта ко времени истечения того же объема воды при 20 °С.

Измерение вязкости позволяет охарактеризовать реологические свойства клеевых и желатиновых растворов, которые зависят от молекулярной массы, формы молекул продуктов декструкции коллагена и степени их гидратации. Эти факторы влияют на процесс гелеобразования при охлаждении водных растворов желатина, прочность и температуру плавления студней.

### Методика определения вязкости продуктов

Перед началом работы прибор устанавливают с помощью регулирующих винтов так, чтобы три указателя уровня находились в горизонтальной плоскости. Перед каждым определением прибор и его отверстие для стока следует тщательно промыть спиртом, бензином и высушить продуванием воздуха.

С помощью вискозиметра устанавливают время истечения дистиллированной воды. Для этого в тщательно промытый и высушенный сосуд для испытуемой жидкости при закрытом сточном отверстии немного выше указателей уровня наливают дистиллированную воду температурой 20 °С. Нагревая термостатирующую баню, во внутреннем сосуде в течение 10 мин поддерживают температуру 20 °С. Затем слегка поднимают стержень и выпускают немного воды. Таким образом, все сточное отверстие заполняется водой. Излишки воды отсасывают из сосуда пипеткой, чтобы уровень ее находился на высоте указателя уровня. Под сточное отверстие прибора ставят измерительную колбу. Ус-

тановив прибор, закрывают его крышкой, придерживая при этом рукой стержень, закрывающий сточное отверстие.

Убедившись, что температура воды равна 20 °С, быстро, не трогая прибора, поднимают рукой запирающий стержень и по секундомеру точно отмечают время заполнения колбы до черты, указывающей объем 200 см<sup>3</sup>. Это время  $t_1$  должно быть равно не менее 50 и не более 52 с. Среднее для данного прибора время, принимаемое за единицу, определяют, исходя из трех последовательных измерений, разница между которыми должна быть не более 0,5 с. Такую проверку делают перед каждым новым опытом.

В сосуд немного выше указателя уровня наливают испытуемый образец, подогретый на 2-3 °С выше температуры опыта.

В термостатирующую баню наливают воду на 0,2-0,3 °С выше температуры опыта и поддерживают ее, перемешивая содержимое мешалкой. Подняв немного стержень, дают стечь излишкам образца настолько, чтобы его уровень совпадал с верхними точками указателя уровня и сточная труба была полностью заполнена. После этого прибор закрывают крышкой и под сточное отверстие ставят измерительную колбу.

Температуру испытуемого образца проверяют при перемешивании. Для этого вращают вокруг стержня крышку прибора с термометром. Когда будет достигнута требуемая температура, выдерживают еще 5 мин, а затем быстро поднимают стержень, закрывающий сточное отверстие, одновременно включив секундомер. Секундомер останавливают в тот момент, когда в измерительной колбе уровень жидкости достигнет отметки 200 см<sup>3</sup>. Отметка 100 см<sup>3</sup> на измерительной колбе служит ориентировочно для контроля времени истечения.

Вязкость в градусах Энглера вычисляют по формуле

$$^{\circ}A_{20^{\circ}} = \frac{t_2}{t_1},$$

где  $t_2$  - время истечения образца, с;  $t_1$  - время истечения воды, с.

Для перевода градусов Энглера в Па·с пользуются эмпирической формулой

$$\eta^{20^{\circ}} = \left(6,922\eta_{\text{Э}} - \frac{5,9806}{A}\right) \cdot \rho,$$

где  $\eta^{20^{\circ}}$  - вязкость, Па·с;  $\eta_{\text{Э}}$  - вязкость при температуре опыта, °E;  $\rho$  - плотность жидкости при температуре опыта, г/см<sup>3</sup>.

Полученные экспериментальные данные оформляют в виде таблицы 5.1 рекомендуемой формы:

Таблица 5.1

| Наименование и характеристика образца, условия эксперимента | Номер опыта | Время истечения образца, с | Среднеарифметическое значение истечения образца, с | Время истечения образца, с | Среднеарифметическое значение истечения образца, с |
|---|-------------|----------------------------|--|----------------------------|--|
|   |             |                            |  |                            |  |



Расчетные данные сводят в таблицу 5.2:

Таблица 5.2

| Наименование и характеристика образца | Условия эксперимента | Вязкость    |      |
|---------------------------------------|----------------------|-------------|------|
|                                       |                      | $^{\circ}E$ | Па·с |
|                                       |                      |             |      |

### 3. Измерение и расчет вязкости продукта

#### Вопросы для самопроверки и защиты лабораторной работы:

1. Для чего предназначен капиллярный вискозиметр Энглера?
2. Из каких основных частей состоит вискозиметр?
3. На чем основан метод работы ротационного вискозиметра?
4. Что позволяет охарактеризовать измерение вязкости?
5. Объясните сущность методики определения вязкости продуктов?
6. Как устанавливают прибор перед началом работы?
7. Какова температура дистиллированной воды?
8. Сколько времени термостатируют исследуемый продукт?
9. Каков объем заполнения колбы?
10. Чему равно время заполнения колбы?
11. До какой температуры нагревают испытуемый образец при заливке в сосуд?
12. Каким образом проверяют температуру испытуемого образца при перемешивании?
13. По какой формуле вычисляют вязкость в градусах Энглера?
14. Какой эмпирической формулой пользуются для перевода градусов Энглера в Па·с?

## 2.6 Определение липкости продуктов

**Цель занятия:** Ознакомиться с конструкцией, принципом работы и эксплуатацией лабораторной установки для определения липкости, приобрести практический опыт определения липкости продуктов.

#### Методические рекомендации:

1. Приборы для определения липкости продуктов.

Особое место среди структурно-механических свойств занимает такое поверхностное свойство, как липкость (адгезия). Оно характеризует усилие взаимодействия между поверхностями конструкционного материала и продуктом при нормальном отрыве или сдвиге. При этом для большинства пищевых продуктов липкость обуславливает величину усилия внешнего трения.

**Липкость** - это физическое явление, возникающее при соприкосновении тел. Она возникает при разделении этих тел как усилие, противодействующее разделению (отрыву). Например, исследование липкости колбасного фарша позволяет определить оптимальное время куттерования. На практике это свойство мяса оценивают по прилипаемости фарша к поверхности руки. Липкость исследуют также объективными, измеряя усилие, необходимое для

отрыва от испытываемой поверхности соответственно подобранной пластины. Мерой липкости является величина усилия, приходящаяся на единицу поверхности контакта. Липкость связана с другими явлениями и свойствами продуктов: адгезией, когезией и поверхностным трением.

Приборы для определения адгезионных характеристик по способу приложения нагрузки делят на адгезиометры с постепенным отрывом, адгезиометры с мгновенным отрывом, а также сдвигомеры. При равномерном отрыве нагрузка прикладывается перпендикулярно плоскости субстрата, при этом адгезия характеризуется нормальной силой, отнесенной к единице площади контакта, т.е. нормальным напряжением. При сдвиге определяются касательные напряжения, возникающие при относительном смещении слоев адгезива относительно субстрата. Для исследования адгезии пищевых вязкопластичных материалов используются в основном приборы, основанные на способе нормального отрыва. На таких приборах были определены адгезионные характеристики мясных полуфабрикатов, теста, муки, кондитерских масс многих других пищевых продуктов.

### Методика определения липкости продуктов

Основным элементом лабораторной установки являются технические весы, над одной из тарелок которых устанавливают скамеечку так, чтобы они не соприкасались. На скамеечку помещают испытуемый образец и прикрывают его измерительной пластинкой, которую прикрепляют к коромыслу весов прочной ниткой. На другой тарелке весов помещают химический стакан. Над весами устанавливают бутылку Мариотта с водой.

Испытуемый образец помещают на скамеечку лабораторной установки и накрывают его измерительной пластиной. На пластину в течение заданного времени устанавливают груз определенной массы. Затем груз снимают, открывают бутылку Мариотта, наполняя стакан водой. Кран закрывают в момент отрыва пластины от поверхности образца. Далее уравнивают весы, определяя массу воды в стакане.

Условия эксперимента (высоту слоя продукта, величину нагрузки, продолжительность ее воздействия, массовую долю влаги и жира в модельном продукте) фиксируют в тетради.

Липкость определяется как удельная сила нормального отрыва пластины от продукта

$$\rho_0 = \frac{F_0}{S_0} = \frac{9,81m}{S_0}, \text{ Па}$$

где  $F_0$  - сила отрыва, Н;  $S_0$  - геометрическая площадь пластины, м<sup>2</sup>;  $m$  - масса груза, кг.

Экспериментальные и расчетные данные оформляют в виде таблицы 6.1:

Таблица 6.1

| Образец | Массовая доля модельного продукта, % |      |         | Условия эксперимента |            |                |
|---------|--------------------------------------|------|---------|----------------------|------------|----------------|
|         | влаги                                | жира | пищевых | высота слоя          | масса гру- | продолжительно |

|  |  |  |         |              |        |                            |
|--|--|--|---------|--------------|--------|----------------------------|
|  |  |  | добавок | продукта, мм | за, кг | сть действия<br>груза, мин |
|--|--|--|---------|--------------|--------|----------------------------|

### 3. Измерение и расчет липкости продукта

#### Вопросы для самопроверки и защиты лабораторной работы:

1. Что характеризует липкость?
2. Что такое липкость и причина ее возникновения?
3. Что является мерой липкости? По какой формуле определяется липкость?
4. Каким образом делят приборы для определения адгезионных характеристик?
5. Какие приборы в основном используются для исследования адгезии пищевых вязкопластичных материалов?
6. Что является основным элементом лабораторной установки?
7. Как проводят исследование испытуемого образца на лабораторной установке?
8. Что относят к условиям эксперимента?

### 3 КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

В ходе изучения дисциплины каждый студент получит индивидуальные домашние задания, которые охватывают основные разделы курса и позволяют выяснить, насколько хорошо усвоены теоретические положения и может ли студент применять их для решения практических задач. Каждое задание должно быть выполнено на листах формата А4 и оформлено в соответствии с требованиями, предъявляемыми к оформлению расчетных работ. Работа должна быть написана разборчивым почерком, на обложке расчетно-графической работы необходимо указать специальность, курс, группу, фамилию и имя студента, номер варианта и дату сдачи работы. Решение задач следует сопровождать краткими пояснениями, обязательно приводить все формулы, используемые в задаче, необходимые построения производить с учетом масштаба. После завершения домашней работы необходимо сделать ссылку на использованную литературу.

Номера контрольных задач следует выбрать согласно варианта (табл. 5). Недостающие параметры, необходимые для решения задач, могут быть выбраны из таблиц приложения данного пособия или других справочных пособий.

Таблица 5

| Вариант | Вопросы |   |   | Задачи     |
|---------|---------|---|---|------------|
|         | А       | Б | В |            |
| 01      | 1       | 1 | 1 | 1, 2, 3, 4 |
| 02      | 2       | 2 | 2 | 1, 2, 3, 4 |
| 03      | 3       | 3 | 3 | 1, 2, 3, 4 |
| 04      | 4       | 4 | 4 | 1, 2, 3, 4 |

|    |    |    |    |            |
|----|----|----|----|------------|
| 05 | 5  | 5  | 5  | 1, 2, 3, 4 |
| 06 | 6  | 6  | 6  | 1, 2, 3, 4 |
| 07 | 7  | 7  | 7  | 1, 2, 3, 4 |
| 08 | 8  | 8  | 8  | 1, 2, 3, 4 |
| 09 | 9  | 9  | 9  | 1, 2, 3, 4 |
| 10 | 10 | 10 | 10 | 1, 2, 3, 4 |
| 11 | 11 | 11 | 11 | 1, 2, 3, 4 |
| 12 | 12 | 12 | 12 | 1, 2, 3, 4 |
| 13 | 13 | 13 | 13 | 1, 2, 3, 4 |
| 14 | 14 | 14 | 14 | 1, 2, 3, 4 |
| 15 | 15 | 15 | 15 | 1, 2, 3, 4 |

**Задание 1.** Описать основные определения и зависимости параметров:

- 1- реологических уравнений течения псевдопластических жидкостей.
- 2- основных реологических механических моделей.
- 3- моделей Максвелла и Кельвина-Фойгта.
- 4- моделей Бингама, Шведова и Шведова-Бингама.
- 5- реологических уравнений течения пластических жидкостей.
- 6- течения неньютоновских жидкостей в круглом канале.
- 7- течения неньютоновских жидкостей в прямоугольном канале.
- 8- течения неньютоновских жидкостей между параллельными пластинами.
- 9- течения неньютоновских жидкостей в канале кольцевого сечения.
- 10- течения неньютоновских жидкостей в вискозиметрических системах.
- 11- свойств жидкостей.
- 12- свойств твердых тел.
- 13- теории капиллярных вискозиметров.
- 14- теории ротационных вискозиметров.
- 15- насосов для транспортирования неньютоновских жидкостей.

**Задание 2.** Описать требования, предъявляемые к приборам, конструкцию узлов и рабочих механизмов. Представить кинематическую или принципиальную схему приборов.

- 1- Капиллярные вискозиметры.
- 2- Ротационные вискозиметры.
- 3- Адгезиометры.
- 4- Трибометры.
- 5- Шариковые вискозиметры.
- 6- Пенетрометры.
- 7- консистометры.
- 8- Приборы сжатия и растяжения.
- 9- Приборы среза.
- 10- Приборы для относительных измерений, контроля свойств и готовности продукта.
- 11- Процессные и непрерывнодействующие приборы.
- 12- Конические пластометры.

- 13- Капиллярные вибровискозиметры.
- 14- Ротационные вибровискозиметры.
- 15- Виброреометры.

**Задание 3.** Описать основные свойства пищевых продуктов и привести примеры значения этих свойств.

- 1- вязкость и ПНС колбасного фарша.
- 2- вязкость рыбного сырья
- 3- вязкость мясокостного сырья.
- 4- вязкость молочных продуктов.
- 5- вязкость и ПНС теста. 6- .
- 7- компрессионные свойства колбасного фарша.
- 8- компрессионные свойства мяса.
- 9- компрессионные свойства рыбопродуктов.
- 10- компрессионные свойства молочных продуктов.
- 11- компрессионные свойства мучных продуктов.
- 12- компрессионные свойства кондитерских изделий.
- 13- липкость колбасного фарша.
- 14- липкость теста.
- 15- липкость молочных продуктов.

### **Задача 1.**

Одноцилиндровый насос двойного действия при скорости вращения вала  $n$  имеет объемный коэффициент полезного действия  $\eta_o = 0,88$ .

Определить часовую производительность насоса  $V_c$  и степень неравномерности подачи, если диаметр цилиндра насоса  $D$ , диаметр штока  $d$ , радиус кривошипа вала  $r$ . Построить график изменения подачи насоса за время одного оборота вала.

### **Задача 2.**

Поршневой насос дозатора перекачивает фарш, температура которого  $T^0C$ . Поршень, диаметр которого  $D$ , делает  $n$  двойных ходов, совершая при этом ход  $S$ .

Определить допустимую высоту всасывания  $h_v$  для начала процесса всасывания и для случая, когда скорость фарша во всасывающем трубопроводе наибольшая. Диаметр всасывающей трубы, изготовленной из нержавеющей стали,  $d_v$ , ее длина  $l_v$ . Скорость вращения вала насоса  $n$ . При расчете учесть потери напора во всасывающем клапане. Объемными потерями фарша в насосе пренебречь.

### **Задача 3.**

Центробежный насос, характеристика которого задана, перекачивает молоко при температуре  $T^0C$  из открытого резервуара в закрытый. Уровни жидкости в резервуарах остаются без изменения, а геометрическая высота, на которую насос подает молоко, равна  $H_r$ . Манометр, установленный на выходе из на-



|   |   |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|---|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 4 | $(k_1=k_2)$   | 0,050 | 0,060 | 0,055 | 0,048 | 0,080 | 0,065 | 0,072 | 0,051 | 0,053 | 0,047 |
|   | $\cdot 10^{-6}, \text{с}^2/\text{М}^5$<br>$k_2 \cdot 10^{-6},$<br>$\text{с}^2/\text{М}^5$ | 0,100 | 0,090 | 0,110 | 0,100 | 0,142 | 0,130 | 0,148 | 0,098 | 0,115 | 0,098 |

### 3.1 Перечень вопросов для выполнения контрольной работы

- 1 Механические модели простейших реологических тел.
- 2 Общая характеристика пищевых прессов. Определение давления прессования.
- 3 Основные уравнения напряжений и деформаций.
- 4 Приборы для измерения сдвиговых характеристик.
- 5 Приборы для измерения компрессионных характеристик.
- 6 Приборы для поверхностных характеристик.
- 7 Конструкции ротационных вискозиметров.
- 8 Пенетрометры, консистометры и другие вискозиметры.
- 9 Конструкция консистометра Геплера.
- 10 Приборы для измерения адгезионной прочности и коэффициента внешнего трения.
- 11 Типы структур мясных продуктов и их классификация.
- 12 Структурно-механические свойства жидкообразных мясных продуктов. Вязко-пластическое тело Бингама. Какова цель определения структурно-механических свойств пищевых продуктов.
- 13 Виды движения жидкостей. Течение неньютоновских жидкостей.
- 14 Вязкость жидких сред. Адгезия, внешнее трение, пластичность, вязкость. Эффективная вязкость.
- 15 Физико-механические свойства материалов.

### 4 ВОПРОСЫ ДЛЯ ЗАЧЕТА

1. Консистенция и текстура пищевых продуктов. Методы и приборы для определения физико-механических свойств пищевых продуктов.
2. Классификация структур дисперсных систем (акад. П.А. Ребиндер). Формы связи влаги с пищевыми продуктами.
3. Виды связи влаги с материалом. Что характеризует показатель  $\alpha_w$ ?
4. Объясните принцип действия прибора для определения активности воды?
5. Определение предельного напряжения сдвига пищевых материалов. Теория капиллярных, ротационных вискозиметров
6. Адгезия и трение, их роль в процессах пищевых производств. Что влияет на формирование адгезионной связи между пищевыми и конструкционными материалами.
7. Основные понятия реологии, теории напряженного и деформированного состояния. Пищевые продукты как реологические тела.
8. Капиллярные и ротационные вискозиметры, типы вискозиметров.

9. Активность воды. Что характеризует показатель  $\alpha_w$ ? Объясните принцип действия прибора для определения активности воды? Классификация структур дисперсных систем (акад. П.А. Ребиндер).
10. Приборы для определения сдвиговых свойств пищевых продуктов
11. Контроль технологических процессов и качества продуктов по структурно механическим характеристикам
12. Свойства жидкостей. Вязкость ньютоновские и неньютоновские жидкостей.
13. Свойства твердых тел. Упругость гуковских и негуковских твердых тел.
14. Назовите определение реологии.
15. Чем отличаются реальные тела от моделей?
16. Охарактеризуйте тело Гука
17. Охарактеризуйте тело Ньютона.
18. Какие свойства проявляет тело Кельвина?
19. Что такое релаксация напряжений?
20. Что такое прочность?
21. У каких тел прочность зависит от скорости деформации?
22. В каком случае негуковские тела достигают максимальной прочности?
23. Дайте определение твердости?
24. Что происходит при сжатии образца?
25. Какими свойствами обладают твердые пищевые продукты?
26. В чем заключается закон вязкого течения Ньютона? Какие допущения и ограничения имеет теория капиллярных вискозиметров?
27. Какой режим движения жидкости должен быть в капиллярном вискозиметре?
28. Какие виды материалов исследуются данным методом?
29. Почему время истечения одинакового объема различных жидкостей через капилляр различно?
30. Запишите формулу касательных напряжений и ньютоновской жидкостей?
31. Назовите основные элементы капиллярного вискозиметра?
32. Каков принцип действия капиллярного вискозиметра?
33. Охарактеризуйте вискозиметр Уббелюде.
34. Приведите примеры способов определения вязкости в ротационных вискозиметрах.
35. Для исследования каких пищевых масс используются ротационные вискозиметры.
36. В каком случае и почему не представляется возможным
37. использование ротационных вискозиметров.
38. Назовите основные элементы ротационного вискозиметра Воляревича.
39. Опишите работу ротационного вискозиметра Воляревича.
40. Какие виды гравитационного транспорта используются в пищевой промышленности?
41. Назначение и область применения гравитационного транспорта.
42. Достоинства и недостатки гравитационного транспорта.



43. Возможное регулирование скорости движения груза.
44. Пути снижения величины коэффициента трения.
45. Опишите работу лабораторной установки.
46. Что понимается под адгезией?
47. Что понимается под специфической адгезией?
48. Что понимается под механической адгезией?
49. Что влияет на формирование адгезионной связи между пищевыми
50. и конструкционными материалами?
51. Перечислите способы влияния на адгезию пищевых материалов.
52. Требования, предъявляемые к адгезиометрам.
53. Виды адгезиометров по способу приложения нагрузки.
54. Назовите основные реологические свойства материалов?
55. Назовите известных ученых в области реологии?
56. Какие ставит задачи классическая реология?
57. Что рассматривает физико-химическая механика
58. Запишите уравнение Фойгта-Кельвина для упруго-вязкого твердого тела?
59. Запишите уравнение Бингама для пластично-вязкой среды?
60. Неньютоновские жидкости?
61. Какие Вам известны механические модели простейших реологических тел?
62. Из каких элементов состоит механическая модель Бингама?
63. Как классифицируются основные структурно-механические свойства продуктов?
64. Для чего предназначены пенетрометры и пластометры?
65. Какие основные типы механической деформации продуктов Вы знаете?
66. Какие поверхностные свойства пищевых продуктов Вы знаете?
67. На чем основан принцип действия адгезиометров?
68. Принцип работы конического пластометра КП-3?
69. Как изменяется предельное напряжение сдвига колбасного фарша при измельчении?
70. Как изменяется пластическая вязкость и липкость при измельчении мясного сырья?
71. Что характеризует показатель  $\alpha_w$ ? Объясните принцип действия прибора для определения активности воды?
72. В чем сущность методики ротационной реометрии?
73. С помощью каких приборов измеряют вязкость мясокостного бульона при различной концентрации и температуре?
74. Какова вязкость клеевых и желатиновых бульонов?
75. От чего зависит вязкость крови?
76. Какие приборы используют для измерения вязкости крови?
77. С помощью каких приборов измеряют вязкость жира?

## **5. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)**

### **5.1 Основная литература:**

1. Инженерная реология. Физико-механические свойства и методы обработки пищевого сырья / Ю. М. Березовский, С. А. Бредихин, В. Н. Андреев, А. Н. Мартеха ; под редакцией В. Н. Андреева. — 2-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2022. — 192 с. — ISBN 978-5-507-45214-9. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/262460> — Режим доступа: для авториз. пользователей.
2. Волошин, Е. В. Реология и реометрия пищевых масс : учебное пособие / Е. В. Волошин. — Оренбург : ОГУ, 2019. — 108 с. — ISBN 978-5-7410-2419-5. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/160029> (дата обращения: 05.03.2024). — Режим доступа: для авториз. пользователей.
3. Серегин, С. А. Реология: практикум : учебное пособие / С. А. Серегин. — Кемерово : КемГУ, 2020. — 73 с. — ISBN 978-5-8353-2745-4. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/172674> — Режим доступа: для авториз. пользователей.

### **5.2 Дополнительная литература:**

1. Никитин, В. В. Реология : учебно-методическое пособие / В. В. Никитин. — Брянск : Брянский ГАУ, 2018. — 125 с. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/133079> — Режим доступа: для авториз. пользователей.
2. Ильиных, В. В. Реология : учебное пособие / В. В. Ильиных. — Кемерово : КемГУ, 2018. — 128 с. — ISBN 979-5-89289-179-9. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/107703> — Режим доступа: для авториз. пользователей.

Составители:  
Гаптар Светлана Леонидовна  
Тарабанова Евгения Викторовна  
Лисиченок Ольга Викторовна

## **РЕОЛОГИЯ**

Методические указания  
по выполнению практических занятий, самостоятельной и  
контрольной работы

Подписано к печати  
Формат 60x84 1/6. Тираж 100 экз.  
Объем 6 уч.-изд.л. Изд. №. Заказ №

---

Отпечатано в издательстве  
Новосибирского государственного аграрного университета  
630039, Новосибирск, ул.Добролюбова, 160, каб. 106  
Тел/факс (383) 267-09-10, E-mail: 2134539@mail.ru