

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Е.В. Закипная, В.В. Зарицкая

# РЕОЛОГИЯ

Учебное пособие

*Рекомендовано*

*Дальневосточным региональным учебно-методическим центром (ДВ  
РУМЦ) в качестве учебного пособия для бакалавров всех форм обучения  
по направлению 19.03.03 (260200.62) и магистров по направлению  
19.04.03 (260200.68) «Продукты питания животного происхождения»  
вузов региона (Протокол № 4 от 13 октября 2014 года)*

Благовещенск  
Издательство Дальневосточного ГАУ  
2016

УДК 664 (075.8)

ББК 36-1

Закипная, Е.В. Реология учебное пособие/ Е.В. Закипная, В.В. Зарицкая. – Благовещенск: Изд-во Дальневосточного ГАУ, 2015. – 108 [4] с.

Учебное пособие предназначено для подготовки бакалавров всех форм обучения по направлению 19.03.03 (260200.62) и магистров по направлению 19.04.03 (260200.68) «Продукты питания животного происхождения». В учебном пособии приведена классификация приборов и методов реометрии, представлена взаимосвязь структурно-механических свойств и органолептической оценки параметров качества готовой продукции, а также приведены примеры реологических свойств в технологии пищевых продуктов, материал дополнен рисунками, схемами, таблицами. Учебное пособие составлено в соответствии с программой и помогает студентам закрепить знания предмета.

Учебное пособие может быть использовано как во время аудиторной, так и при самостоятельном изучении материала. Учебник рекомендован для студентов (бакалавров), обучающихся по программам высшего профессионального образования подготовки по направлению 19.03.03 (260200.62) и магистров по направлению 19.04.03 (260200.68) «Продукты питания животного происхождения» высших учебных заведений. Может использоваться в научно-исследовательских учреждениях, аспирантами, преподавателями.

Рецензенты:

*М.Г. Курбанова,*

д-р техн.наук, зав.кафедрой «Технологии хранения и переработки сельскохозяйственной продукции» ФГБОУ ВПО «Кемеровский ГСХИ»;

*О.В. Елисеева,*

канд.техн.наук, ст. преп. кафедры ОХиТ, ф-та ХиВТ, КубГУ

Редактор А.И. Каземова

ISBN 978-5-9642-0323-0

Издательство Дальневосточного ГАУ, 2016

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ .....</b>	<b>5</b>
<b>ГЛАВА 1 ОБЩЕТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ.....</b>	<b>10</b>
1.1 Основные задачи и понятия реологии пищевых сред.....	10
1.2 Классификация реологических тел и их основные структурно-механические свойства.....	11
1.3 Основные термины в реологии: аксиомы реологии, деформация, упругость, вязкость, пластичность, адгезия и др.....	16
1.4 Реологические модели простых «идеальных» тел.....	21
1.5 Реологические модели сложных реальных тел.....	25
1.6 Основные нелинейные эмпирические уравнения напряжений и деформаций для реальных пищевых масс (продуктов).....	29
1.7 Моделирование реологического поведения пищевых материалов .....	30
<b>ГЛАВА 2 ОСНОВНЫЕ СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ.....</b>	<b>33</b>
2.1 Структурно-механические характеристики пищевых продуктов как объективный показатель воздействия. Основные свойства пищевых материалов.....	33
2.2 Сдвиговые свойства пищевых материалов.....	35
2.3 Компрессионные свойства пищевых материалов.....	42
2.4 Поверхностные свойства пищевых материалов .....	48
<b>ГЛАВА 3 РЕОМЕТРИЯ.....</b>	<b>50</b>
3.1 Классификация приборов и методов реометрии .....	50
3.2 Методология. Классификация методов и приборов для измерения структурно-механических свойств пищевых продуктов.....	52
3.3 Приборы для измерения сдвиговых свойств продуктов.....	55
3.4 Приборы для измерения компрессионных свойств продуктов .....	77
3.5 Приборы для измерения поверхностных свойств продуктов..	85

<b>ГЛАВА 4 СВЯЗЬ СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И ОРГАНОЛЕПТИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ГОТОВОЙ ПРОДУКЦИИ .....</b>	<b>95</b>
<b>ГЛАВА 5 КОНТРОЛЬ ПРОЦЕССОВ И КАЧЕСТВА ПРОДУКТОВ ПО СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКИМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ</b>	<b>97</b>
5.1 Актуальность проведения контроля за технологическими процессами и качеством продукции .....	97
5.2 Автоматизированный контроль качества продуктов .....	98
5.3 Оптимизация технологических процессов на основе реологии .....	102
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>106</b>

## ВВЕДЕНИЕ

Производство продуктов питания на современном уровне, включающее в себя проведение большого количества различных технологических процессов, невозможно без применения инструментальных (объективных) методов измерения и приборной техники для проведения контроля, регулирования и управления качеством сырья и готовой продукции. В этом важная и ответственная роль отводится инженерной реологии, как науке, занимающейся вопросами структурообразования пищевых материалов, изучением структурно-механических свойств, разработкой методов и приборов для их определения.

Вопросами структурообразования пищевых материалов, изучением структурно-механических (реологических) свойств, разработкой методов и приборов их определения занимается инженерная реология. Разработанные и предлагаемые к внедрению в промышленность приборы позволяют их устанавливать на местах или непосредственно в технологическое оборудование, включая их в технологический процесс обработки сырья. Оперативный сбор информации о качестве сырья на стадиях его поступления, технологической обработки и выпуска готовой продукции на основе реологических характеристик с применением приборов - все это обеспечивает возможность проведения контроля, регулирования и управления качеством сырья и готовой продукции.

Наиболее полное представление о качестве продукта дают свойства, определяемые его структурой. При этом важно, чтобы небольшие изменения структуры продукта вызывали существенное колебание тех характеристик, которые определяются с помощью приборов. Этим требованиям в наибольшей степени удовлетворяют структурно-механические (реологические) свойства продукта.

В качестве контролирующих параметров могут выступать структурно-механические (реологические) свойства сырья - сдвиговые (напряжение сдвига, вязкость, пенетрацию и др.), компрессионные (адгезия, липкость, пластичность и др.) и поверхностные (сила трения, коэффициент внешнего трения и др.).

Применяя приборы, можно измерять отдельные показатели (характеристики) структурно-механических (реологических) свойств сырья перед проведением, во время проведения и после проведения технологической операции или технологического процесса. Далее, сравнения полученные данные с оптимальными (эталонными) значениями показателей, проводят их анализ, определяя отклонение, то есть контролируют. В случаях значительного отклонения показателей от заданных

необходимо осуществлять оперативное вмешательство в изменение технологических параметров обработки.

При применении приборов, позволяющих проводить измерение контролируемых показателей непосредственно в технологическом процессе, можно контролировать изменение этих показателей и достигать требуемых значений, то есть регулировать их непосредственно во время выполнения технологического процесса.

Качество готовой продукции зависит не только от качества применяемого сырья, но также и от качества выполнения всех технологических процессов на стадиях ее производства. Это возможно при установке приборов, способных контролировать изменения показателей сырья в потоке, непосредственно на всех технологических операциях производства продукта.

Сбор информации о показателях сырья со всех операций технологического процесса производства и дальнейшее их сравнение с заданными (эталонными) показателями готовой продукции позволяют в целом контролировать, регулировать и управлять этими показателями. В результате всех проводимых мероприятий становится возможным получать продукцию, отвечающую всем показателям стандарта, то есть выпускать качественную стандартную продукцию.

В настоящее время на основании результатов, достигнутых в науке, технике и инженерной реологии, становится возможным создание автоматизированных комплексов, систем по производству пищевых продуктов со стандартными показателями качества.

Роль реологии заключается в том, что, применяя в качестве контролирующих показателей структурно-механические свойства продуктов и инструментальные (объективные) методы и приборы оперативного контроля, мы можем обеспечить контроль, регулирование и управление качеством сырья и готовой продукции.

**Реология** – наука о деформациях и текучести сплошных сред, обнаруживающих упругие, пластические и вязкие свойства в различных сочетаниях. Упругие деформации возникают в теле при приложении нагрузки и исчезают, если нагрузку снять; пластические деформации появляются только в том случае, когда вызванные нагрузкой напряжения превышают известную величину – предел текучести; они сохраняются после снятия нагрузки; вязкое течение отличается тем, что оно возникает при любых сколь угодно малых напряжениях, с ростом напряжений увеличивается скорость течения, и при сохранении напряжений вязкое течение продолжается неограниченно. Еще одно свойство, которым могут обладать среды, изучаемые реологией, – это высокоэластичность.

## **История развития реологии**

*Реология* имеет два взгляда на предмет реологии.

Реология в широком смысле - это наука о деформации и течении различных материалов.

Реология в узком смысле - это наука о деформации и течении материалов, проявляющих существенные отклонения свойств от классических моделей - ньютоновских жидкостей, твердых гуконских и пластичных сен-венановских тел.

В развитии инженерной реологии различают следующие этапы.

Классическая реология - наука о течении и деформации реальных тел, в задачу которой входит изучение свойств существующих продуктов и разработка методов расчета процессов течения их в рабочих органах машин.

Управляющая реология - наука, в задачу которой входит исследование и обоснование сочетания различных видов воздействий, при которых обеспечивается заданный уровень реологических характеристик в течение всего технологического процесса.

Физико-химическая механика - наука о способах и закономерностях формирования структур дисперсных систем с заранее заданными свойствами, в задачи которой входят установление существа образования и разрушения структур в дисперсных и нативных системах в зависимости от совокупности физико-химических, биохимических, механических и других факторов; исследование, обоснование и оптимизация путей получения структур с заранее заданными технологическими свойствами.

Инженерная физико-химическая механика пищевых производств - наука, о деформировании и течении продуктов в рабочих органах машин и методах формирования структур дисперсных систем с заранее заданными технологическими характеристиками; развивается на базе физико-химической механики и реологии.

Инженерная реология как наука о течении и деформации реальных тел сформировалась в связи с изучением материалов, механические свойства которых являются промежуточными между свойствами упругих тел и вязких жидкостей. К таким материалам относятся и пищевые продукты - мясо и мясопродукты, молоко и молочные продукты, рыба и рыбные продукты и т.д. Реология также занимается изучением течения других разнообразных вязко-пластичных материалов, как-то глинистых паст и суспензий, консистентных смазок, смол, строительных растворов и т.п.

Основателем физико-химической механики является советский

ученый, академик П.А. Ребиндер. Существенный вклад в развитие физико-химической механики и реологии внесли многие отечественные и зарубежные ученые М. П. Волорovich, Г.В. Виноградов, В.Е. Гуль, М. Рейнер и многие другие. Значительный вклад в развитие реологических исследований в мясной и молочной промышленности внесли А.В. Горбатов, В.Д. Косой, в кондитерской, хлебопекарной и других отраслях пищевой промышленности-Ю.А. Мачихин, С.А. Мачихин, Б.А. Николаев и др.

Инженерная реология пищевых производств или просто инженерная реология, является составной частью инженерной физико-химической механики пищевых производств, носит прикладной характер, в область изучения которой входят только пищевые материалы и их композиции.

Основными задачами инженерной реологии пищевых производств являются:

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

#### *Место реологии среди технических дисциплин*

Инженерная реология пищи - это наука о приложениях реологии к расчетам и конструированию машин и аппаратов пищевой промышленности, управлению технологическими процессами переработки пищевых продуктов.

Реология - это широкая область науки о течении и деформациях реальных тел. При такой широкой постановке объекта реологии ее из-

ложение в рамках даже значительно суженной вряд ли возможно в истинно справочной или энциклопедической формах. Инженерная реология как наука включает в себя широкий круг вопросов: теоретическую основу, различные методы и приборы измерения реологических характеристик пищевых материалов, методики инженерных расчетов параметров, разработки по оптимизации, интенсификации технологических процессов, а также по контролю и управлению качеством продукции.

В целях систематизации материала инженерная реология пищевых производств условно разделена на четыре части:

- *реология пищевых материалов* - содержит основные сведения по теоретической части инженерной реологии пищевых материалов;

- *реометрия пищевых материалов* - посвящена методам измерения реологических характеристик пищевых материалов, приборной технике и представлению результатов измерения;

- *реодинамические расчеты* - посвящена представлению полученных экспериментальных данных в виде математических формул, графиков (реограмм), механических моделей, дающих количественную оценку результатам изменения пищевых материалов в результате воздействия рабочих органов машин, а также инженерные расчеты по технологическому оборудованию;

- *реологические основы оптимизации, интенсификации, контроля и управления качеством продукции* - посвящена использованию результатов, полученных в ходе экспериментальных исследований по разработке вопросов оптимизации технологических параметров, интенсификации технологических процессов производства продуктов, проведения контроля качества продукции, а также разработке вопросов управления качеством выпускаемой продукции.

## ГЛАВА 1 ОБЩЕТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

### 1.1 Основные задачи и понятия реологии пищевых сред

Наиболее полное представление о некоторых существенных аспектах качества продукта может дать группа физических свойств, которая проявляет зависимость от биологического и химического составов (рецептуры) и внутреннего строения (структуры продукта). Небольшие изменения этих определяющих характеристик должны вызывать значительные изменения величин свойств, которые регистрируются приборами. При этом характеристики сырья предопределяют основные показатели готовых продуктов. К одной из групп таких показателей относятся структурно-механические (*реологические*) свойства. Переработка различных пищевых материалов сопровождается сложными физико-химическими, биологическими и механическими процессами, изучение которых позволяет организовать эффективный и объективный реологический контроль и управление технологическими циклами производства. Большинство процессов в пищевой промышленности связано с переработкой дисперсных систем, суспензий, коллоидных растворов, различных упруго-пластично-вязких материалов. Реологические исследования позволяют глубже познать физику явления, происходящего при обработке пищевых материалов. Реологические свойства могут быть использованы в расчётах процессов, которые необходимо производить при создании новых конструкций машин и реконструкции существующих, а также для выбора наиболее рациональных режимов работы оборудования и оптимальных технологических схем производства, использовать в качестве контролируемых параметров при создании автоматизированных систем управления машинами, агрегатами, производственными участками, при автоматизированном контроле качества продукции. Реология позволяет управлять структурой и качеством продуктов путем внесения добавок, изменения режимов и способов механической и технологической обработки. Свойства пищевого сырья и продуктов зависят от таких факторов как темпера-

тура, влажность, величина и продолжительность механического воздействия, а также от сроков хранения, транспортирования, способа получения данного продукта и многих других причин.

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

Предметом изучения инженерной реологии являются пищевые материалы, которые рассматриваются как реальные тела и занимает конкретное место в разделах технической механики сплошной среды. Общая классификация реальных тел представлена в таблице 1.2.1.

Согласно классификации, пищевые продукты могут быть представлены в различных сочетаниях основных так называемых «первичных» тел - упругого (тело Гука), идеальновязкого (тело Ньютона) и идеальнопластичного (тело Сен-Венана) тела, комбинируя которые можно моделировать деформационные характеристики множества реальных пищевых продуктов. При этом поведение реологических тел описываются не простыми, а более сложными - нелинейными и эмпирическими уравнениями, чаще всего степенными, связывающими деформации и скорости деформаций.

С помощью основных «первичных» тел можно в различных сочетаниях и комбинациях моделировать деформационные характеристики любых реальных пищевых продуктов.

*Виды дисперсий.* В инженерной физико-химической механике, на которую опирается инженерная реология, классическими объектами изучения являются *дисперсные системы*.

Дисперсная система - система, состоящая из двух и более фаз, в которой условно принято называть непрерывную (слошную) фазу - дисперсионной средой, а другую, раздробленную, состоящую из частиц, не контактирующих друг с другом - *дисперсной фазой*.

С этой точки зрения пищевые продукты, в большинстве случаев состоящие из двух и более компонентов, представляют собой дисперсные системы. Отличием дисперсной системы от гомогенной является то, что в первой - частички дисперсной фазы состоят не из отдельных молекул, а из конгломератов, которые обладают термодинамическими свойствами фазы.

Основным условием существования дисперсных систем является нерастворимость или малая растворимость вещества дисперсной фазы в дисперсионной среде. Дисперсные системы с целью их систематизации классифицируют по ряду существенных признаков и для этого используют тот или иной критерий, отражающий одно определенное свойство.

Наиболее известной и широко применяемой является классификация дисперсных систем, предложенная В. Освальдом, которая основана на различии агрегатного состояния дисперсной фазы и дисперсионной среды (табл. 1.2.2). Данная классификация позволяет охватить практически все дисперсные системы пищевых продуктов.

Кроме названной выше классификации, дисперсные системы разделяют по структуре: на свободнодисперсные и связнодисперсные системы.

К свободнодисперсным относятся дисперсные системы, в которых частицы фазы могут перемещаться свободно в дисперсионной среде (суспензии, эмульсии, золи), а к связнодисперсным - дисперсные системы, в которых одна из фаз структурно закреплена и не может свободно перемещаться (эмульсии, гели, пасты, студни).

В зависимости от размера частиц дисперсной фазы, системы подразделяются на грубодисперсные и высокодисперсные.

*Типы структур и их классификация.* Для представления материала как такового, а также для проведения схожести или разделения с другими материалами, вводится понятие структура.

Структура - внутреннее строение продукта (материала) и характер взаимодействия между отдельными ее элементами (частицами), которую определяют химический состав, биохимические показатели, температура, дисперсность, агрегатное состояние и ряд технологических факторов.

Академик П.А. Ребиндер, применяя к дисперсным системам феноменологический подход, условно разделил все материалы (массы) на два вида на золи - вещества, ведущие себя как жидкости, и гели - вещества, обладающие свойствами твердых тел.

Согласно классификации, предложенной академиком П.А. Ребиндером, структуры пищевых продуктов разделяют на коагуляционные и конденсационно-кристаллизационные.

**Таблица 1.2.1**

**Классификация реологических (реальных) тел**

Идеально твердое тело, Эвклидово	Упругое тело, Гуково	Пластичное тело, Сен-Венаново	Реологическое тело	Истинно-ко- ньюто
1	2	3	4	
При любых нормальных касательных напряжениях деформация равна нулю	Напряжение пропорционально деформации	При достижении предельного напряжения сдвига начинаются пластические деформации	Линейные - составные из тел по графам 2, 3, 5 и нелинейные - эмпирические	Напряжения пропорционально градиенту скорости в первом приближении
Теоретическая механика	Сопротивление материалов	Сопротивление материалов	Реология	Гидравлика

Таблица 1.2.2

Классификация дисперсных систем

Дисперсионная среда	Дисперсная фаза	Система	
Газ	твердая жидкая газообразная	аэрозоли аэрозоли-туманы атмосфера	Коптильный дым, пыль, дисперсия крови, молоко атмосфера земли
Жидкость	твердая  жидкая  газообразная	суспензия  эмульсия  пена	бульон, колбасный фарш кровь, жир в воде, молоко крем, взбитый белок
Твердое тело	твердая  жидкая  газообразная	твердая суспензия - сплав  капиллярные системы, твердая эмульсия  пористые тела, твердые пены	замороженная мышечная замороженное сливочное кость в пористых телах; кость, сыр, изоляционные меланж

*Коагуляционные структуры* образуются в дисперсионных системах взаимодействием между частицами и молекулами через прослойки дисперсной среды за счет Ван-дер-Ваальсовых сил сцепления. В таких структурах частицы связаны между собой молекулярными силами сцепления, образуя сплошную сетку или каркас. Прочность каркаса зависит от наличия сольватного (гидратного) слоя на поверхности частиц. Отличительными признаками таких структур являются сравнительно небольшая прочность связи между частицами; способность к самопроизвольному восстановлению структуры после разрушения; то есть тиксотропия; обладание упругостью, пластичностью, вязкостью и другими свойствами. При обезвоживании прочность их повышается, и после определенного предела они перестают быть обратимо тиксотропными. Типичными представителями систем с коагуляционной структурой являются сырые мясные и ливерные фарши колбас и др.

*Конденсационно-кристаллизационные структуры.* Они присущи натуральным продуктам (мясо и мясопродукты с сохраняющимся клеточным строением и др.), но могут образоваться из коагуляционных при удалении дисперсионной среды или срастании частиц дисперсной фазы при термообработке (коагуляции или денатурации белков), а также при охлаждении расплавов или увеличении концентрации растворов. Отличительными признаками такого типа структур являются большая прочность по сравнению с коагуляционными; отсутствие тиксотропии и необратимый характер разрушения; высокая хрупкость и упругость из-за жесткости скелета структуры; наличие внутренних напряжений, возникающих в процессе образования фазовых контактов и влекущих в последующем перекристаллизацию и самопроизвольное понижение прочности, вплоть до нарушения сплошности, например растрескивание при сушке.

В последующем, на основании исследований мясных и молочных продуктов, классификация была дополнена А.В. Горбатовым еще двумя переходными типами структур, которые получили название *коагуляционно-кристаллизационные* и *коагуляционно-конденсационные*.

Таким образом, тип структуры продуктов обуславливает его качественные и технологические показатели и поведение в процессах деформирования. Для описания деформационного поведения

структур используют кривые течения - реограммы, которые связывают между собой напряжение и скорость деформации (деформацию). Характер реограмм, как правило, дает возможность отнести реальный продукт к тому или иному виду реологических тел.

### **1.3 Основные термины в реологии: аксиомы реологии, деформация, упругость, вязкость, пластичность, адгезия и др.**

Реология, как любая другая наука, опирается на ряд аксиом, допущений, предположений и другие ограничения, которые вызваны необходимостью абсолютироваться от второстепенных вопросов.

*Первая аксиома.* Под действием всестороннего (изотропного) давления все материалы ведут себя одинаково - как идеально упругие тела.

Это означает, что всесторонне равномерное давление будет оказывать одинаковое действие на шар, изготовленный из стали, или на шар из мясного фарша (теста). Плотность обоих шаров будет увеличиваться без искажения формы. Изменение диаметров произойдет за счет упругой деформации, т.е. при снятии давления диаметр и плотность этих тел примут первоначальные значения. Различия в реологических свойствах проявляются только при деформации, изменяющей форму тела, - деформации формоизменения.

*Вторая аксиома.* Каждый материал обладает всеми реологическими свойствами, хотя и в различной степени. К основным реологическим свойствам относятся упругость, пластичность, вязкость и прочность.

Это означает, что у одного и того же материала в зависимости от его состояния и условий нагружения могут проявляться в большей или меньшей мере различные реологические свойства. Например, такой вязкопластичный материал как макаронное тесто при мгновенном воздействии нагрузки в основном ведет себя, как упругое тело, а пластическая деформация и вязкое течение почти отсутствуют. При других условиях нагружения большее значение имеют пластические и вязкие свойства. Поэтому, в первую очередь, необ-

ходимо выяснить, какие свойства исследуемого материала при заданных условиях являются основными, определяющими.

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

*Виды деформаций.* При приложении к материалу внешней нагрузки он подвергается воздействию, которое выражается в изменении его размеров и формы. Эти изменения материала принято называть деформацией. В зависимости от приложения нагрузки деформации принципиально разделяются на два вида: первые - деформации объемного (линейного) растяжения-сжатия и вторые - деформации сдвига. При первой изменяется только объем (линейный размер) материала, а его форма не претерпевает заметных изменений. При деформации сдвига изменяется форма материала, а объем его остается прежним. Между этими видами деформаций существует тесная взаимосвязь, определяемая коэффициентом Пуансона. Способность деформироваться под действием внешних сил - основное свойство материалов всех реальных тел.

*Деформация* - это изменение формы или линейных размеров тела под действием внешних сил, при изменении влажности, температуры и прочего, при котором частицы или молекулы смещаются одна относительно другой без нарушения сплошности тела.

В зависимости от вида деформации тела они разделяются на объемные, линейные (нормальные) и сдвиговые. Изменения линейных размеров тела принято выражать в относительных единицах деформации.

Относительную деформацию тела при нормальном растяжении-сжатии (обозначают  $\varepsilon$ ), представляющую отношение абсолютной деформации  $\Delta l = l - l_1$  к первоначальным размерам  $l$  тела, определяют по формуле

$$\varepsilon = (l - l_1) / l = \Delta l / l. \quad (1.3.1)$$

Объемная относительная деформация тела  $\varepsilon_V$  определяется по формуле

$$\varepsilon_V = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z. \quad (1.3.2)$$

где  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$ ,  $\varepsilon_z$  - относительные деформации тела по осям  $x$ ,  $y$ ,  $z$

Относительную деформацию при сдвиге  $\gamma$ , представляющую отношение абсолютной величины сдвигового смещения слоя  $\Delta l$  под действием касательных сил к его толщине  $h$ , определяют по формуле

$$\gamma = \Delta l / h. \quad (1.3.3)$$

Деформации разделяются на упругие, то есть исчезающие после снятия нагрузки, и на остаточные, необратимые, не исчезающие после удаления нагрузки. Остаточные деформации, не сопровождающиеся разрушением материала, называются пластическими, а сами материалы - пластическими.

*Скорость деформации*  $\dot{\varepsilon}$ ,  $\dot{\gamma}$ ,  $\text{с}^{-1}$ , это изменение деформации во времени, определяют по формуле

$$\text{при растяжении-сжатии} \quad \dot{\varepsilon} = d\varepsilon / d\tau;$$

$$\text{при сдвиге} \quad \dot{\gamma} = d\gamma / d\tau. \quad (1.3.4)$$

*Напряжение*  $\sigma$ ,  $\theta$ , Па, - это мера внутренних сил  $P$ , Н, возникающих в теле под влиянием внешних воздействий на единицу площади  $F$ , м, нормальной к вектору приложения силы его, определяют по формуле

$$\text{нормальное напряжение} \quad \sigma = P / F, \quad (1.3.5)$$

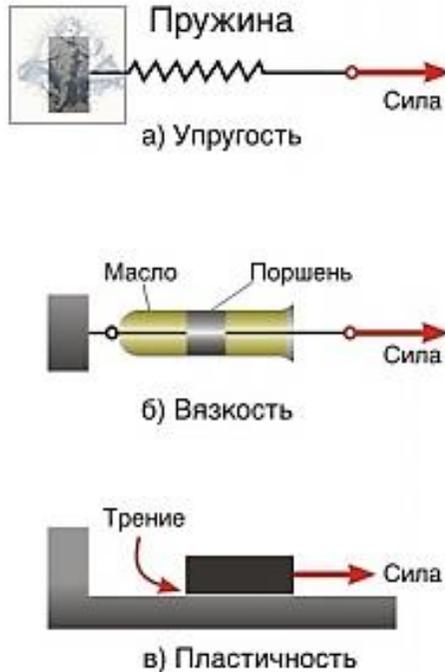
$$\begin{aligned} \text{касательное напряжение (сдвига)} \\ \theta = P / F, \end{aligned} \quad (1.3.6)$$

Простой и наглядный способ построения реологического уравнения состояния состоит в том, что каждое основное свойство среды можно смоделировать подходящим элементом, то есть упругость – пружинкой, вязкость – поршнем в цилиндре с вязкой жидкостью, пластичность – элементом с сухим трением (рис. 1.3.1).

*Упругость* - способность тела после деформирования полностью восстанавливать свою первоначальную форму, то есть работа

деформирования равна работе восстановления. Упругость тел характеризуется модулями упругости:

при растяжении-сжатии - модулем упругости первого рода  $E$ , Па;  
при сдвиге - модулем упругости второго рода  $G$ , Па.



**Рис.1.3.1. Модели построения реологических уравнений**

Величины напряжений и деформаций связаны законом Гука и имеют вид уравнений

$$\sigma = \varepsilon E, \quad \theta = \gamma G. \quad (1.3.7)$$

*Вязкость  $\eta$* , Па·с, - это способность тела оказывать сопротивление относительно смещению его слоев. Вязкое течение реализуется в истинно-вязких, ньютоновских жидкостях при любых, сколь угодно малых напряжениях сдвига, и описывается уравнением

Ньютона

$$\theta = \eta \dot{\gamma}. \quad (1.3.8)$$

При течении неньютоновских (аномально-вязких) жидкостей вязкость не остается величиной постоянной, она зависит от напряжения сдвига и градиента скорости. В этом случае пользуются понятием «эффективная вязкость»  $\eta_{эф}$ , Па·с, которая рассчитывается по формуле

$$\eta_{эф} = \theta / \dot{\gamma}. \quad (1.3.9)$$

*Пластичность*  $p_{пл}$ , Па, - это способность тела под действием внешних сил необратимо деформироваться без нарушения сплошности. Пластическое течение начинается при величине напряжения, равной пределу текучести.

*Адгезия*  $p_o$ , Па, - это слипание разнородных твердых или жидких тел, соприкасающихся своими поверхностями. Прочность слипания тел определяют путем отрыва, вводя показатель как липкость  $p_l$ , Н/м<sup>2</sup>, которая рассчитывается по формуле

$$p_l = P_l / F_l, \quad (1.3.10)$$

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

Отрыв материалов одного от другого может быть трех видов (рис. 1.3.2):

- адгезионный, отрыв происходит по границе контакта материалов;
- когезионный, отрыв происходит по слою одного из материалов;
- адгезионно-когезионный, смешанный.

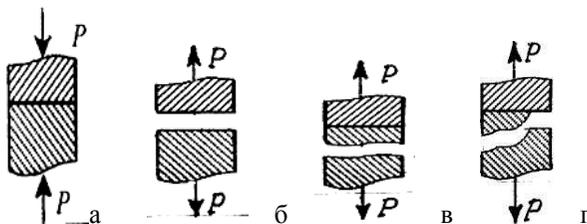


Рис. 1.3.2. Виды отрыва:

а - предварительный контакт, б - адгезионный,  
в - когезионный, г - адгезионно-когезионный.

*Внешнее трение* - взаимодействие между телами на границе их соприкосновения, препятствующее относительному их перемещению вдоль поверхности соприкосновения. Оно зависит от нормального усилия и липкости и рассчитывается по формуле

$$P_{тр} = f(P_k + p_o F_o), \quad (1.3.11)$$

где  $P_{тр}$  - внешнее трение, Н;  $f$  - истинный коэффициент внешнего трения;

$P_k$  - сила нормальная поверхности сдвига (усилие контакта), Н.

*Коэффициент внешнего трения  $f$ .* Для пищевых материалов в зависимости от реологических свойств, состояния фрикционных поверхностей и скорости скольжения коэффициент внешнего трения  $f$  определяется различными способами. Классический тип прибора для измерения силы внешнего трения представляет собой пару тел, соприкасающихся плоскими поверхностями, площадь которых может быть от долей квадратных миллиметров до десятков квадратных сантиметров. При этом одно из тел смещается относительно другого. Сила, прикладываемая для смещения (трения) одного тела относительно другого, измеряется тензометрическими, динамометрическими или какими-либо другими датчиками.

## 1.4 Реологические модели простых «идеальных» тел

### *Основные уравнения напряжений и деформаций «идеальных» тел*

Для моделирования поведения сложного реологического тела в зависимости от свойств его компонентов в инженерной реологии используются комбинации в различных сочетаниях рассмотренных выше простых идеальных тел, каждое из которых обладает только одним физико-механическим свойством.

Модели простых идеальных тел можно комбинировать, располагая их параллельно, последовательно, смешанно (параллельно и

последовательно). В комбинациях число простых элементов может быть разным - два, три, четыре и более, достигая 10-20. Однако практика показывает, что применение в моделях свыше трех, четырех элементов значительно усложняет возможности визуального наблюдения за поведением тел при одновременном изменении такого количества его свойств. Поэтому чаще всего применяются сложные модели, в которых количество элементов составляет не более трех, четырех.

Для параллельного соединения элементов принимается то, что деформация упругого элемента равна деформации вязкого элемента, а суммарное напряжение равно сумме напряжений упругого и вязкого элементов.

*Механическая модель «идеально» упругого тела.* Такой моделью представляется упругое тело Гука и изображается в виде пружины (рис. 1.4.1).

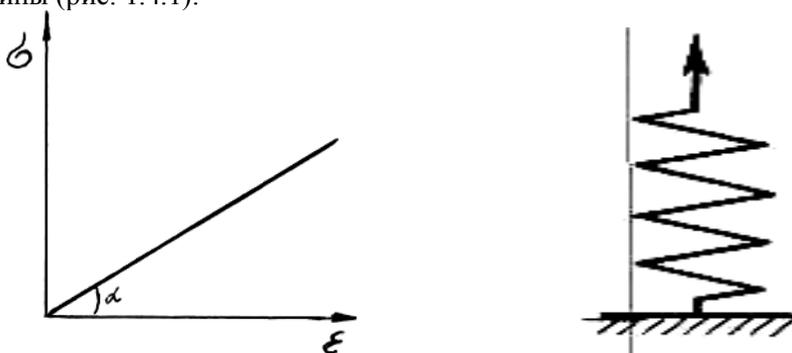


Рис. 1.4.1. Механическая модель тела Гука

Данная модель характеризуется тем, что при приложении мгновенной нагрузки пружина сжимается, а после снятия возвращается в исходное положение. При этом понимается, что деформации возникают непосредственно после приложения нагрузки и скорость ее распространения практически мгновенна.

Ее поведение описывается законом Гука, основным уравнением которого являются выражения вида:

- при растяжении-сжатии  $\sigma = \varepsilon E$ ;
  - при сдвиге  $\theta = \dot{\gamma} G$ .
- (1.4.1)

Зависимость напряжения от деформации ( $\sigma \rightarrow \varepsilon$  или  $\theta \rightarrow \dot{\gamma}$ ) принято показывать в виде реограммы, то есть в виде графика (рис. 1.4.1).

*Механическая модель «идеально» вязкого тела.* Такой моделью представляется вязкое тело Ньютона и изображается в виде цилиндра с жидкостью и поршня с отверстиями (демпфера), через отверстия которого может протекать жидкость (рис. 1.4.2). При перемещении поршня жидкость через отверстия протекает из одной части цилиндра в другую. При этом перемещение поршня не свободно, а зависит от сопротивления жидкости, то есть ее вязкости. Поведение модели характеризуется тем, что при приложении мгновенной нагрузки она ведет себя, как абсолютно твердое тело, так как жидкость не способна мгновенно перетечь через отверстия поршня. Если к модели приложить нагрузку и выдерживать под ней или нагрузку прикладывать постепенно, то поршень будет перемещаться в цилиндре в результате протекания жидкости через отверстия. При этом скорость его перемещения зависит от вязкости жидкости, которой он наполнен.

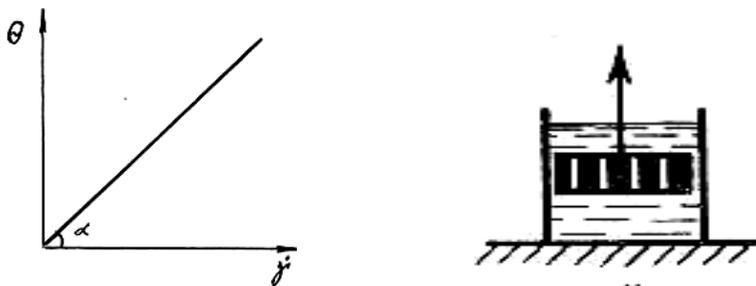
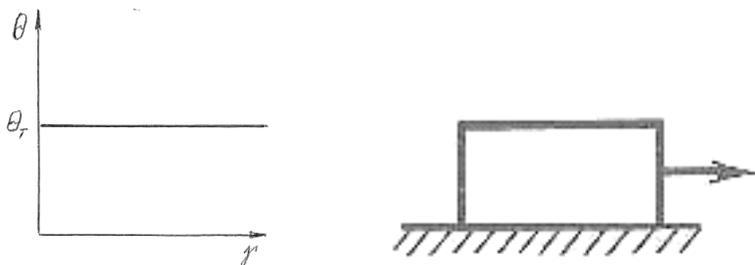


Рис. 1.4.2. Механическая модель тела Ньютона

Ее поведение описывается законом Ньютона. Основным уравнением, описывающим поведение модели, является уравнение вида

- при продольном смещении  $\sigma = \eta \cdot \dot{\varepsilon}$ ,
- при сдвиге  $\theta = \eta \dot{\gamma}$ . (1.4.2)

Графическая зависимость  $\theta - \dot{\gamma}$  представлена на рисунке 1.4.2. Механическая модель «идеально» пластичного тела. Такой моделью представлено пластичное тело Сен-Венана (рис.1.4.3).



**Рис. 1.4.3. Механическая модель тела Сен-Венана**

Модель характеризуется тем, что при приложении нагрузки менее критической величины она остается неподвижной, то есть никаким изменениям не подвергается. И в случае достижения нагрузки некоторой критической величины происходит смещение одного элемента относительно другого, при этом элемент может перемещаться с любой скоростью.

Ее поведение описывается основным уравнением вида

$$\theta = \theta_T, \quad (1.4.3)$$

где  $\theta_T$  - предел текучести материала, то есть критическая величина напряжения, при котором материал начинает течь необратимо, Па.

Графическая зависимость  $\theta - \theta_T$  представлена на рисунке 1.4.3.

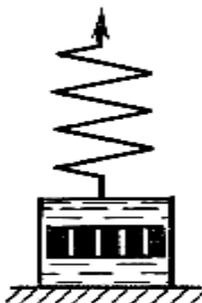
На практике механические модели «идеальных» тел и их основные уравнения используются для описания поведения, свойств реальных пищевых материалов, жидкостей, которые достаточно близки по свойствам к ним. Однако, в большинстве это невозможно по причине того, что пищевые материалы представляют собой достаточно сложные композиции, которые одновременно могут обладать двумя, тремя и более свойствами.

## 1.5 Реологические модели сложных реальных тел

### *Основные уравнения сложных реологических тел*

Основными сложными моделями, широко используемыми для моделирования реальных пищевых продуктов, в том числе мясных, являются модель упруговязкого тела (тело Максвелла), модель упруговязкого тела (тело Фойгта-Кельвина), модель упругопластичного тела, модель вязко-пластичного тела (Шведова-Бингама) и др.

*Механическая модель вязкоупругого тела с релаксацией деформаций (тела Максвелла).* Механическая модель вязко-упругого релаксирующего тела Максвелла (рис. 1.5.1) представляет последовательное соединение элементов Гука с модулем упругости  $G$  и Ньютона с вязкостью  $\eta$ . На оба элемента действует одинаковое напряжение  $\theta$ . Для последовательного соединения элементов считается, что полная скорость деформации тела равна сумме скоростей ее элементов и каждый элемент передает полную нагрузку.



**Рис. 1.5.1. Механическая модель тела Максвелла**

Поведение модели. Если к модели приложить мгновенную нагрузку и сразу снять, то успевают отреагировать только пружина, которая растянется и сожмется, а поршень не успевает сдвинуться. В этом случае модель ведет себя как упругое тело. Если после приложения нагрузки продолжать поддерживать растяжение пружины постоянным, то она релаксирует, то есть сжимается, перемещая поршень до тех пор,

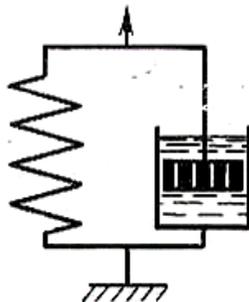
пока полностью не вернется к своему первоначальному состоянию. В этом случае модель ведет себя почти как ньютоновская жидкость.

Для упругого элемента скорость деформации определяется из закона Гука  $\dot{\gamma} = \dot{\theta}/G$ , а для вязкого - из закона Ньютона  $\dot{\gamma} = \theta/\eta$ .

Складывая скорости упругой и вязкой деформаций и проведя математические действия, получаем основное реологическое уравнение для тела Максвелла вида

$$\dot{\gamma} = \dot{\theta}/G + \theta/\eta \quad \text{или} \quad \eta\dot{\gamma} = \eta\dot{\theta}/G + \theta. \quad (1.5.1)$$

*Механическая модель вязко-упругого тела с релаксацией напряжений (тела Фойгта-Кельвина).* Механическая модель вязко-упругого тела Фойгта-Кельвина (рис. 4.5.2) представляет параллельное соединение элементов Гука с модулем упругости  $G$  и Ньютона с вязкостью  $\eta$ .



**Рис. 1.5.2. Механическая модель тела Фойгта-Кельвина**

**Поведение модели.** Если к модели приложить нагрузку мгновенно и снять, модель остается неподвижной, то есть она ведет себя как абсолютно твердое тело. Если к модели приложить нагрузку и ее удерживать постоянной, то под действием растягивающего усилия пружина удлинится, и одновременно перемещается поршень в жидкости. При этом движение поршня связано с вязким сопротивлением жидкости, ввиду чего полное растяжение пружины наступает не сразу. После снятия нагрузки, пружина сжимается до первоначальной длины, но это

требует времени вследствие вязкого сопротивления жидкости. Поведение модели описывается основным уравнением Фойгта-Кельвина вида

$$\theta = G\gamma + \eta\dot{\gamma}. \quad (1.5.2)$$

Если предположить, что деформация постоянна, то  $\dot{\gamma} = 0$ , при этом наблюдается процесс рассасывания, релаксации напряжений, причем при  $\theta = 0$  напряжение равно какому-то начальному значению  $\theta = \theta_1$ . При интегрировании уравнения в пределах от  $\theta_1$  до  $\theta$  и времени от 0 до  $\tau$  получают уравнение вида

$$\theta = \theta_1 \exp(-G\tau/\eta) \text{ или } \theta = \theta_1 e^{-G\tau/\eta}. \quad (1.5.3)$$

Если в этом уравнении выражение  $\eta/G$  обозначить через  $\tau_p$ , то уравнение примет вид

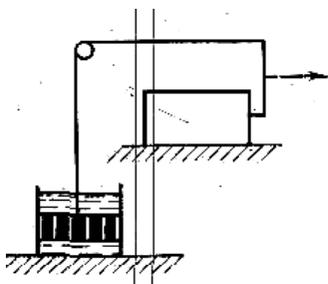
$$\theta = \theta_1 e^{-\tau/\tau_p}, \quad (1.5.4)$$

где  $\tau_p$  - период релаксации, сек.

Данное уравнение называют экспоненциальным уравнением релаксации напряжений.

Период релаксации характеризует быстроту процесса перехода системы из неравновесного термодинамического состояния, вызванного внешним воздействием, в состояние термодинамического равновесия. За этот период напряжение убывает в 2,7 раза.

*Механическая модель вязко-пластичного тела Шведова-Бингама.* Механическая модель (рис. 1.5.3) представляет параллельное соединение элементов Ньютона с вязкостью  $G$  и Сен-Венана с пределом текучести  $\theta_T$ .



**Рис. 1.5.3. Механическая модель вязко-пластичного тела Шведова-Бингама**

Поведение модели. Если при приложении нагрузки в модели возникают напряжения выражающиеся неравенством  $\theta \leq \theta_T$ , то тело ведет себя как абсолютно твердое недеформируемое. В противоположном случае, когда  $\theta > \theta_T$ , механическая модель описывается основным реологическим уравнением вида

$$\dot{\gamma} = (\theta - \theta_T) / \eta \text{ или } \theta = \theta_T + \eta \dot{\gamma}. \quad (1.5.5)$$

*Механическая модель упруго-пластичного тела.* Механическая модель упруго-пластичного тела (рис. 1.5.4) представляет последовательное соединение упругого элемента Гука с модулем упругости  $G$  и пластического элемента Сен-Венана с пределом текучести  $\theta_T$ .



**Рис. 1.5.4. Механическая модель упруго-пластичного тела**

Поведение модели. При приложении нагрузки меньше критической величины происходит только растяжение пружины, а пара трения скольжения остается неподвижной, то есть модель ведет себя как упругое тело. В случае превышения нагрузки выше критической,

происходит перемещение одного элемента пластичного тела относительно другого, при этом пружина остается в том же растянутом состоянии, в котором находилась в момент достижения нагрузки критической величины, то есть модель ведет себя, как пластичное тело.

При  $\theta < \theta_T$  механическая модель упруго-пластичного тела описывается основным реологическим уравнением Гука, имеющего вид  $\theta = G\gamma$ .

При  $\theta = \theta_T$  механическая модель описывается основным реологическим уравнением Сен-Венана, имеющего вид  $\theta = \theta_T$ .

### 1.6 Основные нелинейные эмпирические уравнения напряжений и деформаций для реальных пищевых масс (продуктов)

В связи с тем, что нередко классические реологические модели не позволяют достаточно точно описать кривую течения материала, в реологии широко используются различные эмпирические и полу-эмпирические уравнения, полученные экспериментальным путем. Среди множества уравнений, предлагаемых для описания течения пищевых масс, широко используются два основных уравнения - уравнение Шульмана и уравнение Гершеля-Балкли.

Первое уравнение- уравнение Шульмана, которое имеет вид

$$\left(\theta^{1/a} - \theta_o^{1/a}\right)^b = \eta \dot{\gamma}, \quad (1.6.1)$$

где  $a, b$  - коэффициенты, определяемые экспериментально.

При значениях  $a = b = 2$  это уравнение превращается в уравнение Кэссона, вида

$$\theta^{1/2} = \theta_o^{1/2} + (\eta_K \dot{\gamma})^{1/2}. \quad (1.6.2)$$

Второе уравнение- уравнение Гершеля-Балкли, которое имеет вид

$$\theta - \theta_o = B_I^* \dot{\gamma}^n, \quad (1.6.3)$$

где  $B_I^*$  - коэффициент, пропорциональный вязкости при градиенте скорости, равном единице, Па·с<sup>*n*</sup>; *n* - индекс течения.

Данное уравнение при  $\theta_o = 0$  приобретает вид степенного уравнения Освальда де Вале

$$\theta = B_I^* \dot{\gamma}^n. \quad (1.6.4)$$

При *n* = 1 уравнение приобретает вид уравнения Шведова-Бингама.

Приведенные математические зависимости широко используются для описания поведения пищевых продуктов в различных условиях деформирования при приложении нормальных и касательных напряжений.

## **1.7 Моделирование реологического поведения пищевых материалов**

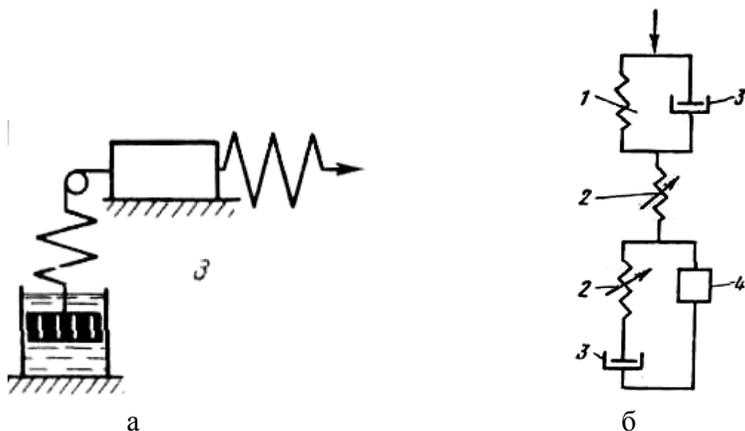
Представленные выше механические модели широко используются для моделирования и описания свойств реальных пищевых продуктов.

Для моделирования свойств мясных фаршей для вареных колбас рекомендуется механическая модель Шведова-Бингама. Так, например, при моделировании поведения двух и более приготовленных образцов фаршей, отличающихся хотя бы одним показателем, например вязкостью, наглядно видно, что при приложении нагрузки одной и той же величины более существенной деформации подвергнется образец, имеющий наименьшую вязкость. А в случае, например, полной потери пластичности материал переходит в состояние вязкого материала, не способного удерживать свою форму, то есть будет просто растекаться. С помощью данной модели можно исследовать поведение мясных фаршей, например при добавлении воды,

различных добавок или оценить механическое воздействие на структуру продукта и т.д. Для описания поведения цельной мышечной ткани мяса может применяться механическая модель Максвелла. Для описания других материалов могут применяться другие механические модели, рассмотренные выше.

Как показывает практика, применение механических моделей для описания поведения материалов с двумя элементами дают недостаточно точные результаты, которые могут значительно отличаться от результатов, полученных с помощью экспериментальных кривых реограмм. Поэтому с целью повышения точности предлагаются модели, состоящие из трех или четырех элементов простых моделей.

Так, например, для описания поведения материалов, обладающих одновременно упруго-пластично-вязкими свойствами, предлагается механическая модель, состоящая из двух упругих тел, пластичного и вязкого, которая представлена на рисунке 1.7.1 а.



**Рис. 1.7.1. Механические модели реальных пищевых материалов:**

- а) - механическая модель продуктов типа мясных фаршей,
- б) - механическая модель неразрушенной мышечной ткани мяса:
- 1 - линейно-упругий элемент; 2 - нелинейно-упругий элемент;
- 3 - вязкий элемент; 4 - элемент, фиксирующий определенное значение деформации.

Данная модель более точно описывает поведение материалов

типа мясные фарши, тесто и другое, которые обладают одновременно тремя свойствами - упругими, пластичными и вязкими.

Для более точного описания поведения неразрушенной мышечной ткани мяса предлагается механическая модель, представленная на рисунке 1.7.1 б.

Структура неразрушенной мышечной ткани мяса, сложная по своему строению, представлена в виде мышечных волокон, связанных пространственной соединительной пленкой. Все промежутки структуры заполнены тканевой жидкостью: слабо и сильно связанной влагой. По характеру и прочности связи между частицами мышечную ткань можно отнести частично к конденсационно-кристаллизационным структурам. Подобные структуры обладают рядом свойств твердых тел, но в то же время эластичны, пластичны и так далее, что необходимо учитывать при выборе наиболее целесообразных способов и режимов технологической обработки.

Общая деформация механической модели складывается из нелинейно-упругой с модулем упругости  $E_1(\sigma)$  (последовательно включенный элемент (2)), эластичной с модулем упругости  $E_1$  и вязкостью  $\eta_1$  (параллельно соединенные элементы (1) и (3)) и пластической с нелинейным модулем упругости  $E_{II}(\sigma)$ , вязкостью  $\eta_2$  и фиксатором (последовательно соединенные элементы (2), (3) и параллельно с ними фиксатор - элемент (4)). Данная механическая модель позволяет моделировать деформационные изменения мяса при осевом сжатии. Модель описывается нелинейным дифференциальным реологическим уравнением второго порядка. Кроме рассмотренных механических моделей предлагаются и другие для конкретных материалов, познакомиться с которыми можно в специальной литературе.

## ГЛАВА 2

### ОСНОВНЫЕ СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

#### 2.1 Структурно-механические характеристики пищевых продуктов как объективный показатель воздействия. Основные свойства пищевых материалов

Согласно ГОСТ 15.467-79, под качеством продукции понимают совокупность свойств продукции, обуславливающих ее пригодность удовлетворять определенные потребности в соответствии с ее назначением. Наиболее полное представление о качестве продукта дают свойства, определяемые его структурой.

Структура - внутреннее строение продукта и характер взаимодействия между отдельными ее элементами (частицами), которую определяют химический состав, биохимические показатели, температура, дисперсность, агрегатное состояние и ряд технологических факторов.

Для проведения общей оценки качества продукта используется комплекс его свойств: химических, биологических, физических, электрофизических, оптических и др. Среди них комплекс физических свойств, так называемые структурно-механические, предопределяют поведение продуктов в самых разнообразных технологических процессах и энергетических полях. Они являются качественно внешним выражением внутренней сущности объектов, то есть определяют агрегатное состояние, дисперсность, строение, структуру и вид взаимодействий внутри продукта. В количественном отношении структурно-механические свойства представляют в виде характеристик, то есть значений соответствующих физических величин в виде принятых для них единиц измерения. Числовые значения представляют как отношение значения физической величины к единице ее измерения, то есть безразмерным числам.

Структурно-механические характеристики (СМХ) качественно и количественно определяют поведение продукта в условиях напряженного состояния и позволяют связать между собой напряжения, деформации или скорости деформаций в процессе приложения усилий. Они не являются «чистыми» константами материала и зависят

от формы и размеров тела, скорости нагружения, состояния поверхности, воздействия окружающей среды, температуры, структуры и множества других факторов. При известных величинах характеристик можно вычислить значения напряжений и деформаций и в итоге получить необходимые параметры процесса или аппарата, выполнить прочностные и технологические расчеты. То есть структурно-механические характеристики пищевых материалов выступают как объективный показатель какого-либо воздействия. Кроме того, свойство продукта как объективная реальность позволяет охарактеризовать его качество.

*Основные структурно-механические свойства пищевых материалов.* Структурно-механические свойства по виду приложения силы (нагрузки, напряжения) к продукту разделяют на три связанные между собой группы: сдвиговые, компрессионные и поверхностные.

К основным сдвиговым реологическим свойствам материалов относятся предельное напряжение сдвига  $\theta_o$ , Па·с, эффективная вязкость  $\eta_{эф}$ , Па·с, пластическая вязкость  $\eta$ , Па·с, период релаксации

$\tau_p$ , с.

Они представляют группу свойств, которые наиболее полно отражают внутреннюю сущность материала (объекта) и поэтому их принято считать основными. С их помощью рассчитывают течение материалов в технологических трубопроводах, рабочих органах машин и аппаратов, определяют необходимые усилия для перемещения продукта. Кроме того, они позволяют судить о качестве продукта и степени его обработки, то есть дают возможность обосновать оптимальные технологические и механические условия процесса, а приборное оснащение позволяет их контролировать и регулировать, обеспечивая постоянное и стабильное качество.

К основным компрессионным (объемным) свойствам материалов относятся модуль упругости первого рода  $E$ , Па; модуль упругости второго рода  $G$ , Па, равновесный модуль  $E_R$ , Па; период релаксации деформации при постоянном напряжении  $\tau_\sigma$ ; с, относительная деформация  $\mathcal{E}$ ; объемная относительная деформация  $\mathcal{E}_V$ ; плотность  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>.

Эти характеристики используются для расчета процессов шприцевания, формования, дозирования, транспортирования по трубопроводам и другое, а также для оценки качества продуктов.

К основным поверхностным свойствам относятся - адгезия  $p_0$ , Па, липкость  $p_0$ , Па, коэффициент внешнего трения  $f$ .

Они характеризуют усилие при взаимодействии материалов между поверхностями контакта (адгезию) при нормальном отрыве или сдвиге, которое определяют методом отрыва. При этом отрыв пищевых материалов друг от друга может быть адгезионным, когезионным и адгезионно-когезионным (смешанным).

## 2.2 Сдвиговые свойства пищевых материалов

Сдвиговые свойства представляют особую группу структурно-механических свойств. Их величины можно использовать для самых различных целей, начиная от оценки дисперсности систем и качества продуктов до расчета машин и аппаратов.

Для описания течения дисперсных систем широкое распространение получило уравнение Гершеля-Балкли, связывающее напряжение сдвига с тремя константами продукта

$$\theta = \theta_o + B_1^* \dot{\gamma}^n, \quad (2.2.1)$$

где  $\theta_o$  - предельное напряжение сдвига, Па;  $B_1^*$  - коэффициент, пропорциональный вязкости, Па·с<sup>n</sup>;  $\dot{\gamma}$  - градиент скорости ( $du/dr$ ) или скорость деформации сдвига ( $d\gamma/dr$ ), с<sup>-1</sup>;  $n$  - индекс течения;  $u$  - скорость движения элементарного слоя, м/с;  $r$  - линейный размер по нормали к вектору скорости, м;  $\gamma$  - относительная деформация;  $\tau$  - время, с.

П.А. Ребиндер и Н.В. Михайлов делят реологические тела на жидко- и твердообразные системы в зависимости от характера кривой  $\eta_{эф}(\theta)$  и периода релаксации  $\tau_p$ .

*Сдвиговые характеристики жидкообразных мясных продуктов.*

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

Характеристики этих систем описываются вязкостью или эффективной вязкостью и не имеют статического предельного напряжения сдвига. Жидкообразные системы обладают слабой структурной сеткой, которая разрушается при течении в рабочих органах машин с высокими значениями градиентов скорости при изменении температуры. К жидкообразным продуктам относятся кровь, животные жиры, мясокостный бульон, клеевые и желатиновые бульоны и др.

*Вязкость крови.* Значения вязкости крови убойных животных в зависимости от концентрации сухих веществ и температуры представлены в таблице 2.2.1.

Вязкость крови измеряют с помощью вискозиметра Гепплера и реовискозиметра Ротовиско.

Из результатов таблицы 2.2.1 следует, что вязкость крови убойных животных зависит от концентрации сухих веществ и температуры. При этом как при снижении концентрации сухих веществ, так и при повышении температуры вязкость крови значительно уменьшается.

*Вязкость топленых животных жиров.* Значения вязкости для разных видов топленых животных жиров представлены в таблице 2.2.2

**Таблица 2.2.1**  
**Зависимость вязкости крови от концентрации сухих веществ и температуры (градиент скорости 380 с<sup>-1</sup>)**

Концентрация сухих веществ, кг на 1 кг крови	Вязкость $\eta \cdot 10^3$ , Па·с, при температуре, °С			
	10	20	30	40
0,261	92	59	46	36
0,213	31	19	14	10
0,182	15	10	7	5
0,152	11	7	6	4

Таблица 2.2.2

## Зависимость вязкости топленых животных жиров от температуры

Жир	Вязкость $\eta \cdot 10^3$ , Па·с, при температуре, °С						
	40	50	60	70	80	90	100
Говяжий	-	29,0	21,0	15,8	12,5	10,0	8,4
Бараний	-	30,4	22,0	17,3	13,7	11,2	9,4
Свиной	39,0	26,7	19,5	15,0	12,0	9,7	8,2
Костный	36,2	25,1	18,6	14,5	11,6	9,6	8,1

Результаты показывают, что с увеличением температуры от 0 до 100 °С вязкость всех видов топленых жиров уменьшается и имеет свое максимальное значение при температуре, близкой к температуре затвердевания, причем, для говяжьего и бараньего она не определена, так как жиры переходят в другое аномальное состояние, переставая быть как таковыми жидкостями. Среди жиров наибольшей вязкостью при одном значении температуры имеет жир бараний.

Таблица 2.2.3

## Зависимость мясокостного бульона от концентрации и температуры

Концентрация сухих веществ, кг на 1 кг бульона	Вязкость $\eta \cdot 10^3$ , Па·с, при температуре, °С					
	40	50	60	70	80	90
0,20	11,99	9,23	7,45	6,22	5,32	4,63
0,18	8,94	6,92	5,62	4,71	4,04	3,53
0,16	6,67	5,19	4,23	3,56	3,07	2,69
0,14	4,98	3,89	3,19	2,69	2,33	2,05
0,10	2,77	2,19	1,81	1,54	1,34	1,19
0,06	1,54	1,23	1,03	0,88	0,77	0,69
0,02	0,86	0,70	0,59	0,51	0,45	0,40
0,01	0,74	0,60	0,51	0,44	0,39	0,35
0	0,64	0,52	0,44	0,38	0,34	0,30

Вязкость мясокостного бульона, величины вязкости мясокостного бульона при различной концентрации и температуре приведены в таблице 2.2.3. Данные получены на капиллярных вискозиметрах и вискозиметре Гепплера.

Результаты таблицы показывают, что при повышении температуры вязкость мясокостного бульона уменьшается, а также отмечается резкое снижение вязкости при уменьшении сухого остатка.

*Сдвиговые характеристики твердообразных мясных продуктов.* В отличие от жидкообразных, твердообразные и твердые системы имеют сравнительно прочную структуру, которая до начала разрушения характеризуется определенной прочностью (предельным напряжением сдвига, пределом прочности, модулями упругостей, релаксацией и так далее), а после разрушения - соответствующими сдвиговыми и другими характеристиками. Они определяются выбранной математической моделью тела и ее адекватностью реальным условиям деформирования.

Сдвиговые характеристики продуктов в области практически неразрушенных структур определяют по кинетическим кривым деформации с помощью коаксиально-цилиндрического вискозиметра, сдвиговых приборов с двумя параллельными пластинами, а также различными инденторами (конус, сфера, пластина и т.д.).

Значения сдвиговых характеристик сосисочного фарша в области практически не разрушенных структур представлены в таблице 2.2.4.

Сдвиговые характеристики продуктов в области лавинного разрушения структуры определяют с помощью приборов, допускающих сколь угодно большие скорости деформаций, например, ротационные вискозиметры и др. Значения сдвиговых характеристик используют для расчета перемешивания продуктов в рабочих машинах, аппаратах и т.д. Эти характеристики являются наиболее существенными, по сравнению с другими, и более глубоко характеризуют внутреннюю сущность объекта, то есть его качественные показатели.

**Таблица 2.2.4**

**Структурно-механические характеристики сосисочного фарша**

Показатель	Пределы изменения напряжения, Па	Значение величины
Модуль мгновенной упругости, Па	Меньше 100	$1,23 \cdot 10^4$
Эластический модуль упругости, Па	100-150	$0,8 \cdot 10^4$
Эффективная вязкость при деформации ползучести, Па·с	150-200	$16 \cdot 10^5$
Статическое предельное напряжение сдвига, Па	-	250
Наибольшая эффективная вязкость, Па·с	250-350	$5 \cdot 10^5$

Значения основных сдвиговых характеристик для ряда мясных продуктов, измеренные при температуре 10 °С с помощью ротационного вискозиметра РВ-8, представлены в таблице 2.2.5.

Таблица 2.2.5

**Сдвиговые характеристики различных видов  
мясного и колбасного фарша**

Наименование фарша	Предельное напряжение сдвига, Па	Пластическая вязкость, Па·с	Коэффициенты		
			$B$ , Па·с	$B_o^*$ , Па·с	$m$
Говядина куттерованная (с водой)	700	18-20	6,1	510	0,73
Свинина полужирная куттерованная (с водой)	650	19-22	6,0	480	0,72
Колбаса:					
любительская	700	18-28	5,0	610	0,79
докторская	540	16-19	4,3	430	0,75
чайная	500	-	3,5	430	0,79
ливерная при $t$ , °С					
30	2200	-	6,0	780	0,80
60	100	-	3,0	390	0,80
Сосиски свиные	450	9-11	3,0	320	0,77
Котлеты	400	9-14	3,5	360	0,76

Из таблицы видно, что величины реологических характеристик различных видов фарша отличаются довольно существенно. В определенной мере они показывают качественное различие структур продуктов, то есть его состав, степень механической обработки и прочее.

*Сдвиговые свойства молочных продуктов  
Сдвиговые характеристики жидкообразных систем*

Коровье молоко представляет собой сложную полидисперсную систему, дисперсионной средой которой является вода (83 – 89 %), 70 дисперсной фазой – жир, белки, газы и.т.д. (17 – 11%). Вязкость молочных продуктов можно представить как сумму вязкости дисперсионной среды и дисперсной фазы, а также приращение вязкости вследствие образования структуры.

Структурная составляющая вязкости молока исчезает после механического воздействия на молоко (например, многократное

пропускание одной и той же порции молока через капиллярную трубку), что приводит к снижению вязкости. У концентрированных белковых молочных продуктов, наоборот, структурная компонента вязкости настолько велика, что в сравнении с ней вязкостью дисперсионной среды можно пренебречь. При этом концентрированной белковой массе будут присущи предельное напряжение сдвига и аномалия вязкости.

Вязкость молока, замеренная на вискозиметре Гепплера, уменьшается с повышением температуры. Это явление наблюдается до тех пор, пока температура молока не перейдет предел, выше которого начинается денатурация белков молока, сопровождаемая реакцией меланоидинообразования, вследствие чего темп возрастания вязкости молока с увеличением температуры повышается.

Этот процесс необратим, поэтому после охлаждения молока до первоначальной температуры его вязкость будет выше прежнего значения.

Добавление к молоку соли повышает его вязкость, которая становится ещё больше после пастеризации молока при высокой температуре, добавление к молоку перекиси водорода также приводит к возрастанию его вязкости.

Вязкость сгущенных молочных продуктов уменьшается с повышением температуры, но увеличивается с повышением концентрации сухих веществ. Высокотемпературная обработка также приводит к повышению вязкости.

Сгущенное цельное молоко и обезжиренное молоко без сахара при концентрации сухих веществ 45% проявляют малую аномалию вязкости. Сгущённые молочные продукты с сахаром являются псевдоэластичными неньютоновскими жидкостями. Для всех наименований сгущённых молочных продуктов с сахаром, выпускаемых отечественной пищевой промышленностью, разработана единая температурно-инвариантная характеристика вязкости.

Значения наибольшей ньютоновской вязкости сгущённых молочных продуктов с сахаром сразу же после сгущения должны находиться в пределах от 2 до 5 Па·с.

Вследствие развития структурообразования вязкость таких продуктов быстро увеличивается, особенно в течение первых суток.

Заметное увеличение вязкости продолжается на протяжении первых трёх месяцев, после чего темп прироста вязкости резко снижается и значение вязкости асимптотически приближается к некото-

рой предельной величине. На вязкость сгущённых молочных продуктов существенное влияние оказывает применяемый способ сгущения. Так, например, вследствие длительного пребывания молока в вакуумных выпарных аппаратах циркуляционного типа (без принудительной циркуляции) его вязкость оказывается выше, чем у молока, сгущённого в плёночных выпарных аппаратах (с падающей плёнкой) при одинаковых значениях концентрации сухих веществ. Вязкость сгущённых молочных продуктов с сахаром зависит также и от способа внесения сахара в молоко.

Вязкость кисломолочных продуктов во многом определяется видом вносимой в молоко закваски, а также видом и количеством применяемого стабилизатора. Добавление к сливкам казеината натрия способствует упрочнению структуры сгустка и способствует лучшему восстановлению структуры. Так, например, достаточно к сливкам жирностью 20% добавить 1,2% казеината натрия, чтобы полученная из них сметана обладала такой же консистенцией, как и с 30% жирностью.

Вязкость сливок коровьего молока. В зависимости от концентрации жира сливки могут быть отнесены как к ньютоновским, так и к неньютоновским жидкостям. Сливки с содержанием жира до 30% незначительно проявляют аномалию вязкости и при инженерных расчётах их можно отнести к ньютоновским жидкостям. К ньютоновским жидкостям относятся также сливки и с более высоким содержанием жира, если жир находится в расплавленном состоянии.

Энергия активации сливок, проявляющих неньютоновское течение, зависит как от концентрации в них жира, так и от величины градиента скорости.

Вязкость сливок во многом определяется фракцией жира с высокой и низкой температурой плавления, продолжительностью и условиями их хранения. Сливки после созревания перед сбиванием их в масло имеют большую вязкость, чем сливки, полученные из свежего молока и не подвергавшиеся созреванию.

Вязкость сливочного масла. Вязкость расплавленного масла практически соответствует вязкости сливок при одинаковой температуре и таком же содержании жира.

#### *Сдвиговые характеристики твёрдообразных систем*

В твердообразном состоянии при обычных условиях могут находиться растворы и суспензии казеина, казеинатов, коприциптитов, некоторые творожные изделия, белковые растворообразные массы из подсырной сыворотки и расплавленная сырная масса.

Сдвиговые свойства этих продуктов оценивают главным образом предельным напряжением сдвига и показателями вязкости.

Сдвиговые свойства сыров. При исследовании сдвиговых характеристик сыров наибольшее применение получили методы пенетрации и реологического зондирования.

Пенетрацию осуществляют с помощью полуавтоматических пенетрометров "Лабор" (Венгрия) или AP 4/1 (Германия). Измеряют в показателях пенетрации (1 ед. пенетрации равна  $1 \cdot 10^{-4}$  м) глубину погружения в продукт конусного или шаровидного инденторов под действием полезной массы подвижной части прибора. По величине показателя пенетрации конусом вычисляют пенетрационную твёрдость  $\theta_t$ , Па, пользуясь формулой Ребиндера для определения предельного напряжения сдвига.

Величина пенетрационной твёрдости тесно коррелирует (коэффициент 0,8 – 0,9) с предельным напряжением сдвига сыра  $\theta_0$ , определённым методом конического пластометра Ребиндера. При реологическом зондировании по методике ВНИИМСа в продукт с постоянной скоростью на глубину более высоты индентора внедряют металлический конус (диаметр основания 0,015 – 0,025 м, угол 45 – 90°) или шарик (диаметр 0,012 – 0,016 м), измеряя при этом силу сопротивления продукта.

По результатам реологического зондирования конусным индентором можно определить предел прочности  $\tau_g$ , предельное напряжение сдвига (динамическое)  $\tau_s$ , эффективную вязкость  $\eta_{эф}$ , и модуль сдвига G.

### 2.3 Компрессионные свойства пищевых материалов

Объёмное или осевое сжатие, а также осевое растяжение являются основными типами механической деформации продуктов, которым они подвергаются в ряде машин - шприцах, волчках, прессах, дозаторах и др. При этом продукты находятся при повышенных давлениях, что изменяет их первоначальный объём и плотность. На выходе из машины объём и плотность также могут отличаться. Эти изменения определяют, основываясь на компрессионных характеристиках.

*Компрессионные характеристики фарша при объёмном сжатии.* Для определения деформационного изменения фарша от давления предложено общее уравнение для объёмных деформаций вида

$$\varepsilon = A_{\varepsilon} \cdot 10^{-4} \cdot p^{0,32} \cdot (1 + B_{\varepsilon} \lg \tau), \quad (2.3.1)$$

где  $A_{\varepsilon}$ ,  $B_{\varepsilon}$  - коэффициенты, зависящие от механического, физико-химического состояния мясного фарша, его состава и особенностей исходного сырья;  $p$  - давление, Н/м<sup>2</sup>;  $\tau$  - длительность, с.

Значения  $A_{\varepsilon}$ ,  $B_{\varepsilon}$  и коэффициента бокового давления  $\zeta$  приведены в таблице 5.3.1.

Таблица 2.3.1

## Значения коэффициентов

Фарш	Коэффициенты		
	$A_{\varepsilon}$	$B_{\varepsilon}$	$\zeta$
Мясо говяжье, измельченное, в/с	5,2	0,058	0,78-0,80
Фарш:			
отдельной и чайной колбасы	5,2	0,014	0,80-0,85
докторской колбасы	4,8	0,0092	-
русских и свиных сосисок	4,6	0,008	0,85-0,93

Общую деформацию фарша рассматривают как состоящую из трех зон. При напряжениях, меньших предела упругости, который в среднем принимается равным  $10^5$  Па, наблюдается зона мгновенно-упругих деформаций. Для нее модуль упругости составляет  $0,6 \cdot 10^7$  Па. Величина упругой относительной деформации достигает максимального значения и составляет  $1,6 \cdot 10^{-2}$ , при увеличении нагрузки она остается постоянной. Вторая - зона упругого последействия, 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.

*Компрессионные характеристики фарша при осевом сжатии между двумя пластинами.* Предлагается величину относительной деформации сжатия  $\varepsilon$  фарша вычислять по зависимости вида

$$\varepsilon = [h(\tau) - \Delta] / H_0, \quad (2.3.2)$$

где  $h(\tau) = \omega \tau$  - абсолютная деформация слоя продукта за время  $\tau$ , с, при скорости сжатия  $\omega$ , м/с;  $\Delta$  - величина прогиба тензобалки

прибора в момент измерения, м;  $H_0$  – начальная высота слоя продукта, м.

Значения компрессионных характеристик фарша для русских сосисок при осевом сжатии представлены в табл. 2.3.2.

Таблица 2.3.2

**Компрессионные характеристики фарша русских сосисок при осевом сжатии**

Влагосодержание фарша, кг влаги на 1 кг сухих веществ	Предел текучести $\sigma_T \cdot 10^{-3}$ , Па, при толщине слоя фарша $H_0 \cdot 10^3$ , м			Модуль упругости $E \cdot 10^{-4}$ , Па, при толщине слоя фарша $H_0 \cdot 10^3$ , м		
	4	6	8	4	6	8
2,0	3,15	2,75	2,3	-	-	4,4
2,5	2,44	2,04	1,6	4,7	3,7	2,7
3,0	1,74	1,32	0,9	3,2	2,2	1,2
3,5	1,0	0,6	0,2	2,0	1,0	0

*Прочностные характеристики целых тканей мяса и мясопродуктов.* В таблице 2.3.3. приведены значения прочностных характеристик мяса и мясопродуктов по усилию резания на единицу длины лезвия ножа. При этом лезвие ножа установлено нормально скорости его перемещения, заточено под малым углом, тонкое и движется со скоростью 1 м/с.

Таблица 2.3.3

**Прочностные характеристики целых тканей мяса и мясопродуктов**

Продукт	Сопротивление резанию $p \cdot 10^{-3}$ , н/м		Предел прочности $\theta_{np} \cdot 10^{-5}$ , н/м <sup>2</sup>	
	сырых	вареных	растяжение	сжатие
Мускулы разные	1,3-8,8	2,7-4,8	10-20	-
Волокна:				
коллагеновые	41,0	7,3	2000-6500	-
эластиновые	27,5	14,4	1000-2000	-
Парное мясо	5-8	-	-	-
Плотная часть кости	-	-	500-1200	400-900
Поверхностный жир (филейный)	4,2	1,0	-	-
Шкура	-	-	100-400	-

*Плотность мяса и мясопродуктов.* Плотность, как одно из фундаментальных свойств, является существенной характеристикой при расчете машин и аппаратов и оценке качества продукта. Среднюю плотность продукта  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup> для сравнительно небольшого объема определяют по формуле

$$\rho = m/V, \quad (2.3.3)$$

где  $m$  - масса продукта, кг;  $V$  - объем продукта, м<sup>3</sup>.

Плотность смеси из нескольких компонентов, когда они не вступают во взаимодействие, при котором меняется состав или объем смеси, вычисляют по формуле

$$\rho = \sum_i c_i \rho_i, \quad (2.3.4)$$

где  $c_i$  - содержание одного из компонентов смеси, кг на 1 кг смеси;

$\rho_i$  - плотность компонента, кг/м<sup>3</sup>;  $i$  - количество компонентов.

Плотность жидкообразных систем при изменении температуры вычисляют по формуле

$$\rho_t = \rho_c / [1 + \beta_t (t - t_c)], \quad (2.3.5)$$

где  $\rho_c$  - плотность при температуре  $t_c$ , кг/м<sup>3</sup>;  $\beta_t$  - коэффициент температурного расширения, 1/К;  $\rho_t$  - плотность при более высокой температуре  $t$ , кг/м<sup>3</sup>.

Плотность жидкообразных белковых систем (мясной бульон, кровь и др.), содержащих большое количество воды, вычисляют по зависимости

$$\rho_c = \rho_{0t} + ac, \quad (2.3.6)$$

где  $\rho_c$  - плотность при фиксированной температуре  $t$  и концентрации  $c$ , кг сухого вещества на 1 кг продукта;  $\rho_{0t}$  - плотность при концентрации, равной нулю, и той же температуре, кг/м<sup>3</sup>, (обычно  $\rho_{0t}$  равна плотности воды);  $a$  - эмпирический коэффициент, кг/м<sup>3</sup>.

Для вязкопластичных (мясной фарш и др.), кусковых, сыпучих и порошкообразных продуктов плотность зависит от давления, иногда даже в большей мере, чем от температуры. Для конкретного продукта определяется по расчетным зависимостям.

*Плотность жидких водно-белковых систем.* Ее определяют с помощью пикнометра или ареометра.

Таблица 2.3.4

**Коэффициенты для расчета плотности**

Продукт	Температура, $T_c$ , °C	Пределы концентрации $c$ , кг/кг	Коэффициент $a$ , кг/м <sup>3</sup>	Плотность $\rho_{0t}$ , кг/м <sup>3</sup>
Мясной бульон Дефибринированная кровь	40	0-0,2	300	992
	40	0-0,2	300	992

Таблица 2.3.5

**Плотность топленых животных жиров**

Продукт	Плотность (кг/м <sup>3</sup> ) при температуре, °C		Коэффициент температурного расширения при 50-90 °C, $\beta_t \cdot 10^5$ , 1/K
	100	50	
Жир:			
говяжий	855	885	72
свиной	865	890	58
бараний	859	888	66

Таблица 2.3.6

**Значения плотности колбасного фарша**

Характеристика фарша		Давление, $P \cdot 10^{-5}$ , Па	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	
жирность, кг/кг	влажностное содержание, кг влаги на 1 кг сухого остатка		по формуле	опытные величины
0,1826	2,06	0,312	1062	1050-1060
		3,12	1084	1089
		10,6	1095	1116
0,1544	2,55	0,312	1067	1058-1064
		3,12	1089	1106
		10,6	1100	1119
0,1270	2,70	0,312	1071	1065-1082
		3,12	1093	1107
		10,6	1105	1126
0,1108	3,01	0,312	1072	1060-1070
		3,12	1092	1098
		10,6	1104	1120

Плотность вязкопластичных и твердообразных продуктов. Для тонкоизмельченных видов колбасного фарша (например, фарш докторской колбасы и сосисок русских) плотность рекомендуется рассчитывать по уравнению вида

$$\rho = 1037 - (290\varphi \div 10,5U) + 22lg p, \quad (2.3.7)$$

где  $\varphi$  - жирность, кг жира на 1 кг фарша;  $U$  - влагосодержание, кг влаги на 1 кг сухого вещества фарша.

Значения плотности мяса и измельченного на волчке с диаметром отверстий в решетке 3 мм, приведены в таблице 2.3.7.

**Таблица 2.3.7**  
**Плотность шрота и целых тканей мяса, кг/м<sup>3</sup>**

Вид и сорт мяса	Несоленые		Шрот с до- бавлением 3% соли и 10% воды	Соленые без воды	
	шрот	мясо		шрот	мясо
Говядина: высший сорт	1048	1058	1059	1064	1074
I сорт	1041	1044	1049	1054	1064
II сорт	1033	1041	1045	1049	1069
Свинина: нежирная	1027	1035	1034	1037	1053
полужирная	986	992	-	1001	1009
Шпик полутвердый	-	940	-	930	-

#### *Компрессионные характеристики молочных продуктов*

Компрессионное уплотнение продуктов сопровождается, как правило, изменением их фазового состояния. Фазовое состояние высокобелковых молочных продуктов, являющихся пористыми дисперсными телами, можно охарактеризовать фазовыми объемами (объемной пористостью).

Данные, характеризующие общую пористость творога и сыров, приведены в таблице 2.3.8.

Пористость сырной массы по газу зависит от метода формования продукта. Данные, характеризующие объем пустот в сырной массе при разных методах формования, приведены в таблице 2.3.8.

Компрессионные свойства сыров оценивают также методом одноосного сжатия цилиндрической или прямоугольной проб сыра с

постоянной скоростью. При этом за показатель компрессии принимают выражаемое в процентах отношение высоты образца к его высоте до сжатия.

Таблица 2.3.8

### Общая пористость творога и сыров

Продукт	Влажность, кг/кг	Общая пористость	Коэффициент пористости
Творог жирный	0,70	0,73	2,76
Творог жирный	0,60	0,64	1,78
Сыр:			
голландский	0,40	0,44	0,79
русский	0,41	0,49	0,97

## 2.4 Поверхностные свойства пищевых материалов

Поверхностные свойства продуктов отражают взаимодействие их с твердыми телами и характеризуются такими характеристиками, как липкость (адгезия) и коэффициентом внешнего трения. Данные характеристики используются при выборе материала для изготовления рабочих органов машин, аппаратов. Значения липкости различных фаршей и мяса представлены в таблице 2.4.1.

Таблица 2.4.1

### Значения липкости фарша и мяса

Образцы	Напряжение предварительного контакта, $p_k \cdot 10^{-4}$ , Н/м <sup>2</sup>	Липкость, $p_o \cdot 10^{-4}$ , Па при времени предварительного контакта, мин.		
		1	5	10
	Фторопласт-4			
Фарш:				
свинных сарделек	0,33	0,88	1,07	1,21
докторской колбасы	0,33	0,66	0,84	1,12
Свинина вдоль волокон	0,33	0,38	0,43	0,38
	Сталь			
Фарш:				
свинных сарделек	0,24	0,46	0,65	0,75
докторской колбасы	0,24	0,42	0,59	0,66

Значения липкости фарша в зависимости от времени выдержки в посоле представлены в таблице 2.4.2.

**Таблица 2.4.2**

**Значения липкости фарша в зависимости от времени  
выдержки в посоле**

Фарш	Давление контактирования, $p_k \cdot 10^{-4}$ , Н/м <sup>2</sup>	Липкость, $p_o \cdot 10^{-4}$ , Па		
		Без выдержки	Выдержка, ч	
			48	96
Говядина куттерованная:				
несоленая	1,42	0,25	-	-
соленая	1,12	0,5	0,57	0,56
Соленая с добавлением 40 % воды	0,54	0,29	0,31	0,27
Свинина без воды соленая	1,42	0,4	0,45	0,44
Свинные сосиски	0,72	0,43	-	-
Любительская колбаса	0,72	0,45	-	-

В настоящее время внешнее трение мяса и мясопродуктов пока еще мало изучено.

Липкость и коэффициент внешнего трения зависят от условий измерения, материала пластин, площади контакта, длительности и напряжения предварительного контакта, толщины слоя продукта, кинетики приложения отрывающего или сдвигающего усилия.

#### *Поверхностные свойства молочных продуктов*

Поверхностное натяжение цельного и обезжиренного молока  $\alpha$  [Н/м] уменьшается с повышением температуры. Поверхностное натяжение обезжиренного молока выше, чем у цельного, однако с повышением температуры разница уменьшается.

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

Поверхностное натяжение сгущённого молока на выходе из вакуумного 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.

## ГЛАВА 3 РЕОМЕТРИЯ

### 3.1 Классификация приборов и методов реометрии

При научно обоснованном планировании реологических исследований в реологии пищевых сред большое значение имеет общий обзор и классификация приборов и методов реометрии, чтобы выбрать наиболее подходящие для решения поставленных практических задач. На это обстоятельство обращают внимание многие исследователи, предлагая различные принципы классификации.

М. Рейнер делит реометры на три типа:

1. Приборы, на которых реализуется по крайней мере в некоторой зоне однородная деформация. Например, на машинах для испытания твердых тел на растяжение, где на некотором удалении от устройств нагружения (захватов) в испытываемом цилиндрическом образце по принципу Сен-Венана реализуется однородное растяжение.

2. Приборы ламинарного полуюднородного сдвига, обработка данных испытаний на которых вследствие неоднородного поля деформаций требует интегрирования или дифференцирования опытных эмпирических зависимостей. Например, при опытах на различных ротационных и капиллярных вискозиметрах.

3. Приборы, на которых реализуется ламинарное течение более сложного вида. Например, вискозиметры с падающим шариком типа Гепплера. При отсутствии удовлетворительной реодинамической теории этих приборов реологические данные могут оказаться неинвариантными в смысле их зависимости не только от реологических свойств пищевой среды, но и от параметров реометра. Эти относительные данные нельзя использовать в математических реодинамических моделях машин и аппаратов пищевой промышленности, но они могут оказаться полезными для нужды контроля качества продуктов и управления технологическими процессами переработки пищевых сред. Очевидно в классификации Рейнера вне рассмотрения остаются приборы микрореологии и метареологии.

М.П. Воларович предлагает сгруппировать приборы и методы на две группы:

1. Интегральные методы и приборы, дающие показатели суммарного эффекта течения. Например, вискозиметры.

2. Дифференциальные методы и приборы, позволяющие определять деформации во времени в каждой точке среды. Например, методы с применением рентгеноскопии и некоторые оптические методы с отслеживанием движения определенных меченых частиц среды.

Приборы типа пенетрометров, амилографа Брабендера, фаринографов, вискозиметра Энглера не рекомендуются М.П. Воларовичем для реологических исследований. Действительно, обычно полученные на этих приборах данные нельзя использовать в реодинамических моделях течения в каналах машин, но это не единственная область применения результатов реометрии. Эти данные полезны для управления и контроля в технологии переработки пищевых продуктов. Кроме того, как показала история развития теории пенетрометров, капиллярных и ротационных вискозиметров, если удастся построить достаточно хорошую реодинамическую модель данного реометра, позволяющую выделить из данных испытаний инвариантные от прибора величины, то относительные данные испытаний иногда удастся пересчитать в реологические параметры среды. Основной обзор способов классификации объективных методов измерения структуры и консистенции пищевых продуктов дал Боурн, где приводится классификация Скотт-Блэра на методы фундаментальные, эмпирические и имитационные; Стевенсона – на измерения номинальные, обычные, интервальные и относительные; Драке – по типу движения рабочих органов реометров на прямолинейные, вращательные, симметрично-осевые, другие и неопределенные. Сам Боурн приводит девять классов приборов :

1. Инструменты измерения силы.
2. Инструменты измерения перемещения.
3. Инструменты измерения времени.
4. Инструменты измерения энергии.
5. Инструменты измерения соотношений.
6. Инструменты измерения составные.
7. Инструменты измерения составные варьируемые.
8. Инструменты химического анализа.
9. Смешанные, многоцелевые.

Самостоятельная специальная группа приборов и методов

реометрии пищевых сред при воздействии вибраций использовалась в работе Н.Б. Урьева и М.А. Талейника В монографии К.П. Гуськова и других авторов все приборы разбиты на 4 группы по назначению:

1. Промышленные приборы для непрерывных измерений в потоке и автоматизации контроля и управления.
2. Лабораторные приборы для массового технологического контроля процессов.
3. Приборы для углубленных измерений в промышленных лабораториях.
4. Исследовательские приборы для научных целей.

Можно указать еще на ряд обзорных работ, в которых также обсуждаются вопросы классификации реологических приборов и методов,

полезные для планирования и проведения реологических исследований. Дополнительно к этим классификациям автор предлагает еще одну, в которой сделана попытка расширить предмет.

### **3.2 Методология. Классификация методов и приборов для измерения структурно-механических свойств пищевых продуктов**

Для измерения величин структурно-механических характеристик материалов используются различные методы измерения и приборная техника, правильность выбора которых в целом определяют точность и ценность полученных результатов. Поэтому, приступая к исследованиям (испытаниям), необходимо руководствоваться методологией проведения исследований.

Методология исследований базируется на основе общих концепций научного мышления, а именно: диалектико-материалистическом понимании природы самого знания; основных законов научного мышления; способов описания и теоретического выражения законов. Применительно к инженерной реологии методология исследований будет включать следующие этапы:

1. Изучение теории вопроса.
2. Критический анализ существующих исследований в данной области.

3. Проведение предварительных экспериментов с целью проверки прибора, его градуировки. Кроме того, они позволяют уточнить или выбрать математическую модель деформирования и сопоставить полученные данные с результатами других.

4. Разработка теории прибора на основе полученной математической модели деформирования, то есть интегрирование дифференциальной модели для конкретных начальных и конечных условий, присущих выбранному прибору. Особо следует отметить, что реологические характеристики не являются «чистыми» константами и зависят от формы, размеров, скорости нагружения и других факторов.

5. Проведение основных экспериментов (испытаний). Их проводят с учетом предыдущих. Особое внимание должно быть уделено отбору проб образцов, который должен проводиться строго в соответствии с общепринятой методикой измерения.

6. Обработка результатов экспериментов (испытаний). При этом следует помнить, что точность вычислений, особенно это касается представления конечных данных, должна быть соизмерима с ошибкой экспериментов. Обычно считают, что для малоструктурированных систем и ньютоновских жидкостей ошибка не должна превышать  $\pm 3\%$ , а для пластично-вязких продуктов  $\pm 10\%$ .

7. Проверка. Ее выполняют путем расчета характеристик по полученным формулам.

8. Направления по использованию (применению) результатов исследований на практике.

В отдельных случаях перечень может быть изменен в большую или меньшую сторону в зависимости от поставленной задачи.

Для измерения структурно-механических свойств пищевых продуктов применяются следующие методы измерения:

1. Метод постоянной нагрузки. Он основан на измерении характеристик материала при приложении к нему постоянной нагрузки.

2. Метод постоянной скорости сдвига. Он основан на измерении характеристик материала при приложении к нему постоянной скорости сдвига.

3. Метод постоянной силы нагружения. Он основан на измерении величин во время воздействия подвижной частью прибора с неизменной массой.

4. Метод энергии деформирования. Он основан на расчете площади, расположенной под кривой деформирования.

Показания измеряемых величин, в зависимости от конструкции прибора, могут проводиться на применении интегрального или дифференциального методов. Первый метод измерения позволяет определить значения характеристик в любой момент времени. Второй выражает значения величин, давая только конечный, суммарный эффект измерения.

Приборы, применяемые для измерения структурно-механических свойств пищевых продуктов (материалов), классифицируют по следующим признакам.

*По назначению.* Приборы разделяют на четыре группы: промышленные, лабораторные, приборы для углубленных исследований в лабораторных условиях и приборы для научных целей. Приборы первой группы устанавливаются непосредственно на технологических машинах и регистрируют свойства материалов в потоке. Приборы второй группы в производственных лабораториях предприятий предназначены для проведения ускоренного контроля за технологическими процессами. Приборы третьей группы предназначены для углубленных испытаний и устанавливаются в лабораториях головных предприятий. Приборы четвертой группы применяются в научно-исследовательских центрах и используются для испытаний материалов в различных условиях. Они отличаются высокой точностью измерения и достаточно значительной продолжительностью проведения испытаний.

*По выражению результата измерения.* Приборы делятся на абсолютные, относительные и условные. Приборы первой группы показывают численные значения свойств в абсолютной системе единиц, основываясь на геометрических размерах рабочего органа и условиях проведения опыта. Приборы второй группы требуют предварительной тарировки на эталонном материале, в результате получают безразмерные, относительные показатели, которые затем с помощью тарировочных графиков пересчитывают в абсолютные значения величин. Приборы обеих групп теоретически обоснованы. На приборах третьей группы значения измеряемых величин выражаются в условно принятых единицах либо баллах, полученные значения непригодны для расчетов и используются, главным образом, для сравнения каких-либо качественных показателей в узком диапазоне.

*В зависимости от показа результата измерения приборы условно разделяют на интегральные и дифференциальные.*

*По функциональному признаку.* Классификация приборов по данному признаку предложена Б.М. Азаровым и В.А. Аретом, согласно которой они разделены на 40 видов.

Описанные выше классификации методов и приборов могут в дальнейшем дополняться, а также видоизменяться.

Современные производства мясной, рыбной, молочной и других отраслей пищевой промышленности, включающих в себя проведение множества различных технологических процессов, требуют применения приборов для измерения свойств сырья на этапах его поступления и переработки с целью контроля, регулирования и управления показателями сырья и готовой продукции.

### **3.3 Приборы для измерения сдвиговых свойств продуктов**

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

Для измерения сдвиговых свойств пищевых материалов применяются приборы, позволяющие определить силу сопротивления внутри материала при относительном смещении его слоев. Приборы для измерения сдвиговых свойств пищевых материалов по принципу действия делятся на следующие группы: капиллярные, ротационные, пенетрометры, приборы с плоскопараллельным смещением пластин и др.

*Капиллярные вискозиметры.* Они применяются для измерения вязкости ньютоновских и неньютоновских жидкообразных систем, не имеющих статического предельного напряжения сдвига, то есть обладающие текучестью при любых напряжениях сдвига.

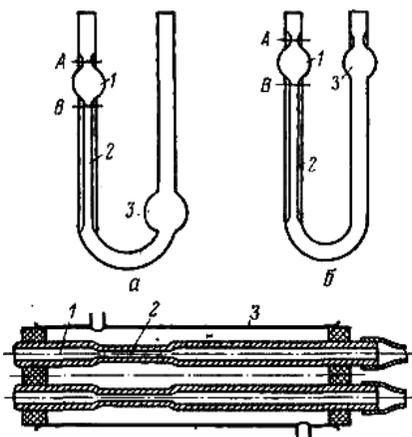
Теория капиллярных вискозиметров теоретически обоснована и основывается на гипотезе сплошности и непрерывности жидкости; использует следующие допущения и ограничения: скорость жидкости на стенке принимается равной нулю; продукт считается не сжимаемым; реологические характеристики неизменны по длине и не зависят от времени, то есть течение не оказывают влияния на процессы тиксотропии, реопексии и релаксации.

Главным требованием, предъявляемым к капиллярным вискозиметрам, является отсутствие турбулизации потока, то есть режим

движения должен быть ламинарным или структурным. Режим движения характеризуется критерием Рейнольдса  $Re$ , который не должен превышать 150, а длительность истечения жидкости через капилляр не должна быть меньше 100 с. В теории капиллярной вискозиметрии рассматривается только равномерное (силы инерции равны нулю), прямолинейное (центробежные силы равны нулю) движение жидкости в горизонтальной трубке (силы тяжести проектируются на ось, совпадающую с направлением движения и равны нулю).

Наиболее известны и широко применяются капиллярные вискозиметры Уббелоде и Освальда, вискозиметр А.В. Горбатова и других, вискозиметр ВК-4, автоматические вискозиметры АКВ-3 и АКВ-5, шариковый вискозиметр Гепплера и других.

Вискозиметры Уббелоде и Освальда (рис. 3.3.1 а, б) представляют собой U-образные стеклянные трубки (1), в одно колено которых впаян капилляр (2) и два шарика: шарик (3) для начального накопления исследуемой жидкости и шарика (4) для сбора протекшей через капилляр жидкости. Диаметр капилляра может быть от десятых долей до 2-3 мм. Длину капилляра выбирают такой, чтобы перетекание жидкости из одного шарика в другой происходило за время не меньше 100 с.



в

**Рис. 3.3.1. Капиллярные вискозиметры:**

- а) - вискозиметр Уббелоде; б) - вискозиметр Освальда;  
в) - вискозиметр ВК-4

Перед измерением исследуемая жидкость заливается в шарик (1) до уровня между метками А и В. Затем прибор в вертикальном положении погружают в жидкостной термостат до уровня выше шарика (1) и выдерживают 20-30 мин при заданной температуре. После этого, освобождая края трубки от закрытия, дают жидкости свободно перетекать из шарика (1) в шарик (3), одновременно с помощью секундомера фиксируя время ее перетекания. Перетекание исследуемой жидкости из одного шарика в другой происходит в вискозиметре Уббелоде (рис. 3.3.1 а) за счет гидростатического давления, а Освальда (рис. 6.3.1б) - за счет создания давления или вакуума на одном конце трубки. Вязкость на приборах Уббелоде и Освальда обычно определяют по отношению к известной вязкости стандартной жидкости (вода, касторовое масло, глицерин).

Вязкость  $\eta$ , Па·с, исследуемой жидкости рассчитывают по формуле

$$\eta = \eta_g \left[ \rho \tau / (\rho_g \tau_g) \right], \text{ или } \eta = K \rho \tau, \quad (3.3.1)$$

где  $\eta_g$  - вязкость воды, Па·с;  $\rho$ ,  $\rho_g$  - плотности исследуемой жидкости и воды соответственно, кг/м<sup>3</sup>;  $K$  – константа прибора, дается в паспорте прибора.

Горизонтальный вискозиметр ВК-4 (рис. 3.3.1 в) предназначен для измерения вязкости крови и имеет две калиброванные трубки (1). Каждая трубка состоит из двух капилляров с миллиметровой шкалой, которые служат резервуаром для жидкости. Между ними помещен узкий измерительный капилляр (2). Для термостатирования исследуемой жидкости обе трубки помещены в широкую стеклянную трубу (3), закрытую с торцов пробками, через которые входят трубки. В трубу подается термостатирующая жидкость с конкретным значением температуры. Его конструкция позволяет исключить поправки на гидростатическое давление столба жидкости.

Вискозиметры ВПЖ-1, ВПЖ-2, ВПЖ-4 предназначены для определения вязкости желатина. Они схожи по конструкции с вискозиметрами Уббелоде, но отличаются формой и количеством колен трубок.

Для получения правильных результатов измерения на капиллярных вискозиметрах необходимо соблюдать следующее: во-первых, движение жидкостей по капиллярам должно быть ламинарным и не превышать число Рейнольдса 150, и во вторых, условия проведения эксперимента должны быть для всех испытаний одинаковыми, особенно температурные.

Шариковый вискозиметр Гепплера (рис. 3.3.2), предназначен для определения динамической вязкости ньютоновских и слабоструктурированных жидкостей. Он состоит из прецизионной стеклянной трубки (1), шарика (2), цилиндра (3) для термостатирования жидкости, термометра (4), ватерпаса (5), оси (6) для поворота термостата на  $180^\circ$  и подставки (7).

В вискозиметре используется метод измерения вязкости с помощью свободно падающего шарика в трубе, заполненной исследуемой жидкостью.

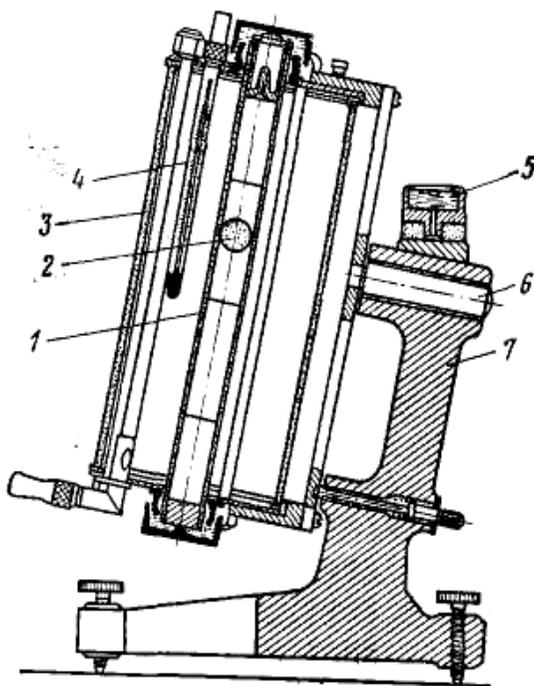


Рис. 3.3.2. Шариковый вискозиметр Гепплера

В начале измерений в прецизионную трубку заливается 30 см<sup>3</sup> исследуемой жидкости. В нее опускается один из шариков, которыми укомплектован прибор, предварительно выбранный с учетом вязкости жидкости. Выбор шарика проводится с учетом требования, что расстояние между крайними отметками шарик должен проходить в интервале 30-300 с. Затем исследуемая жидкость подвергается темперированию в течение 10 мин. Во время перемещения шарика сверху вниз через исследуемую жидкость отмечают время, за которое он пройдет расстояние между верхней и нижней метками. Для повторного измерения термостатирующий цилиндр поворачивают на 180°.

Динамическую вязкость  $\eta$ , Па·с, рассчитывают по формуле

$$\eta = K(\rho_{ш} - \rho_{ж})\tau, \quad (3.3.2)$$

где  $\rho_{ш}$ ,  $\rho$  - плотность материала шарика и исследуемой жидкости соответственно, кг/м<sup>3</sup>;  $\tau$  - время перемещения шарика на участке между метками, сек;  $K$  - константа прибора (дается в паспорте прибора).

В качестве стандартной жидкости могут использоваться вода, касторовое масло, глицерин.

Прибор не пригоден для измерения вязкости структурированных систем и систем, которые имеют предельное напряжение сдвига. Его трудно использовать для мутных, непрозрачных и содержащих твердые частицы систем.

*Ротационные вискозиметры.* Они предназначены для измерения сдвиговых характеристик высоковязких, вязкопластичных и тому подобных систем. Широко применяются в производственных лабораториях пищевых предприятий, в учебных заведениях, в научно-исследовательских институтах, центрах. Вискозиметры используют для контроля качества сырья, полуфабрикатов и готовой продукции, а также для контроля технологических процессов. Ротационные вискозиметры обладают большей универсальностью по сравнению с капиллярными, так, наряду с вязкостью и предельным

напряжением сдвига позволяют измерять другие реологические характеристики.

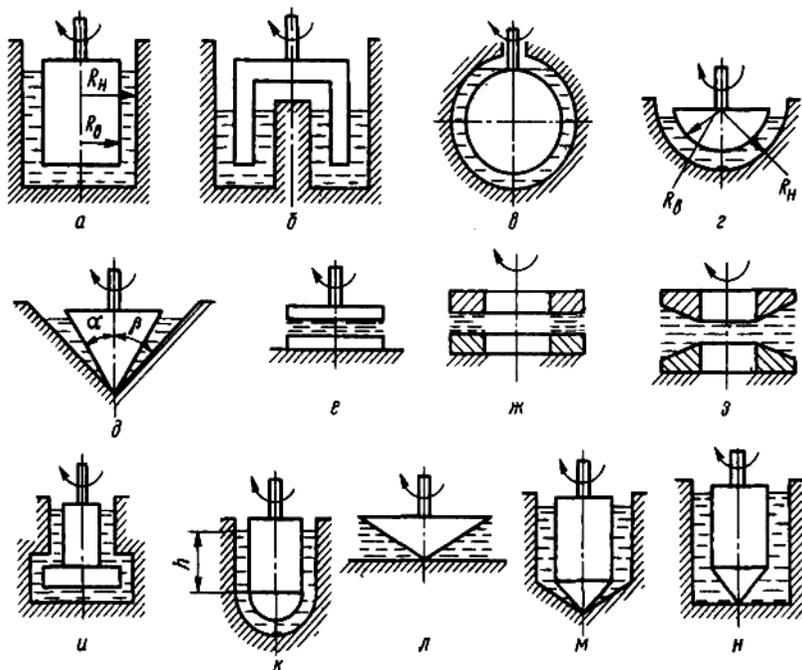
Теория ротационной вискозиметрии опирается на те же допущения и ограничения, которые были рассмотрены в теории капиллярной вискозиметрии, а именно: гипотезы сплошности и непрерывности; скорость жидкости на стенке неподвижного цилиндра равна нулю; равенство окружной скорости и скорости стенки вращающегося цилиндра; жидкость считается изотропной; движение должно быть установившееся, то есть характерные параметры зависят только от координат рассматриваемой точки, но не зависят от времени; режим движения в коаксиальном зазоре должен быть ламинарным, турбулизация потока не допускается.

Ротационные вискозиметры по методу проведения испытаний разделяют на две группы: первая - для испытания материалов с постоянной скоростью деформации; вторая - для испытания материалов с постоянным напряжением сдвига. Для приборов первой группы крутящий момент определяется по углу закручивания упругой нити, на которой подвешен внутренний вращающийся цилиндр. У приборов второй группы ротор установлен в шарикоподшипниках и его вращение обеспечивается падающими грузами. При расчете крутящего момента из общей силы, создаваемой массой падающих грузов, вычитается сила трения. Конструкция и эксплуатация вискозиметров второй группы проще, поэтому они получили более широкое применение для измерения структурно-механических характеристик вязкопластичных материалов.

Основным измерительным органом ротационных вискозиметров является рабочая пара, состоящая из неподвижного элемента, чаще всего называемого стаканом или цилиндром, и подвижного, вращающегося элемента, называемого ротором. При этом ротор находится внутри стакана и между их коаксиальными поверхностями имеется зазор. Во время испытаний исследуемый материал укладывается в зазор между стаканом и ротором. Практически у большинства ротационных вискозиметров рабочие поверхности измерительных органов выполнены коаксиальными, то есть строго параллельными.

Ротационные вискозиметры отличаются формой измерительных органов (рис. 3.3.3), которая может быть различной: коаксиально-цилиндрической (а, б); сферической (в); полусферической (г);

конусной (д); плоско-параллельными пластинами (е); плоскими кольцами (ж); коническими кольцами (з); комбинированной: цилиндр-диск (и), цилиндр-полусфера (к), конус-диск (л), цилиндр-конус (м), цилиндр-конус-диск (н) и другими.



**Рис. 3.3.3. Формы измерительных органов ротационных вискозиметров**

Вискозиметр Воларовича РВ-8 (рис. 3.3.4) предназначен для испытания вязких, вязко-пластичных материалов и используется для определения вязкости и предельного напряжения сдвига широкого круга пищевых материалов: мясных и рыбных фаршей, мучного теста, кондитерских масс и т.д.

Прибор состоит из шкива (1), вертикального вала (2), двух перекидных блоков (3), закрепленных на штангах, электронагревательных элементов (4), вращающего ротора (5) коаксиально-цилиндри-

ческой формы с полусферическим дном, наружного неподвижного стакана (6), термостатирующего сосуда (7) с теплоизоляцией (8), фиксатора (9), неподвижной шкалы (10) и стрелки (11).

Принцип работы прибора. Вначале исследуемый продукт (мясной фарш) помещают в стакан в количестве равном  $2/3$  объема образующего зазора между ротором и стаканом. Затем стакан с продуктом подводят под ротор, постепенно поднимают вверх и фиксируют в специальной обойме. После измерительные органы прибора и сам материал погружаются в термостатирующий сосуд, где подвергаются выдержке в течение 10-20 мин.

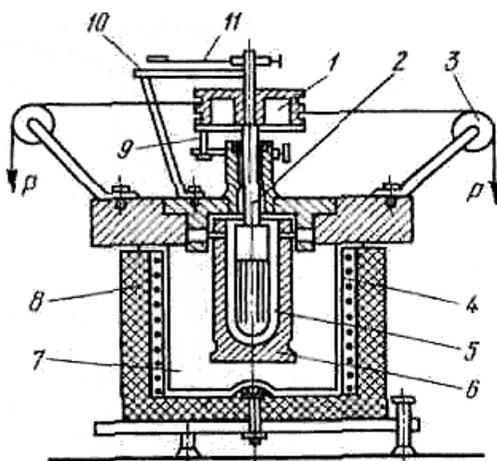


Рис. 3.3.4. Ротационный вискозиметр РВ-8

Перед началом проведения измерений нити с закрепленными чашечками должны быть намотаны на шкив, сам шкив зафиксирован стопорным устройством, а стрелка установлена на начало шкалы отсчета.

Для определения предельного напряжения сдвига материала на чашечках, закрепленных на концах нитей, с помощью гирек разновесов устанавливают определенный вес и отводят стопорное устройство, освобождая шкив от фиксации. Если стрелка прибора не начала перемещаться, то к весу, который находится в чашечках, добавляют еще. Так продолжают делать до тех пор, пока стрелка не начнет переме-

щаться. В случае начала перемещения стрелки производят фиксирование массы грузов, одновременно находящихся в обеих чашечках. По результатам измерения рассчитывают предельное напряжение сдвига.

Для определения вязкости материала в чашечки кладется груз, массой несколько больше, чем при котором только началось перемещение стрелки, убирают стопорное устройство и с помощью секундомера измеряют время, за которое шкив (то есть. ротор) совершит пять полных оборотов. Затем к данной массе добавляют еще груз и вновь повторяют измерение. Так делают до тех пор, пока время, за которое шкив совершит пять оборотов, не станет равным 1,5-2 сек. После все повторяют, но только в обратном направлении в сторону уменьшения массы грузов. По результатам измерений рассчитывают вязкость материала.

Для получения правильных значений измеряемых величин необходимо помнить, что степень измельчения сырья должна быть такой, чтобы в зазор между ротором и стаканом входило минимум две частицы исследуемого продукта. В противном случае сдвига как такового между слоями продукта не будет.

Предельное напряжение сдвига  $\theta_0$ , Па, на приборе РВ-8 рассчитывают по формуле

$$\theta_0 = K_0 m_0, \quad (3.3.3)$$

где  $K_0$  - константа прибора, для случая сдвига;  $m_0$  - масса грузов, при которой начинается сдвиг, кг.

Эффективную вязкость  $\eta_{эф}$ , Па·с, рассчитывают по формуле

$$\eta_{эф} = Km / N, \quad (3.3.4)$$

где  $K$  - константа прибора, для случая определения вязкости;  $m$  - масса грузов, вращающих ротор, за вычетом массы трения, кг;  $N$  - частота вращения ротора, об/с.

Константы прибора  $K_0$  и  $K$  рассчитывают по формулам, которые приведены в лабораторном практикуме.

Характеристика прибора: пределы измерения вязкости - от 0,5

до  $10^6$  Па·с; пределы измерения напряжения сдвига - от 5 до  $10^4$  Па; интервал температур - от  $-60$  до  $150$  °С.

Ротационный вискозиметр МТИММПа (МАПБ) (рис. 3.3.5) создан на базе вискозиметра РВ-4 и предназначен для измерения реологических характеристик вязкопластичных материалов при повышенном давлении.

Прибор смонтирован на подставке (1). Состоит из двух передних блоков (2) для нитей, шкива (3), хвостовика (4), вращающего рифленого ротора (5), тензометрических датчиков (6), неподвижного рабочего цилиндра (7), краника (8) для удаления излишков продукта, поршня (9), манометра (10) и мембраны (11) для измерения давления.

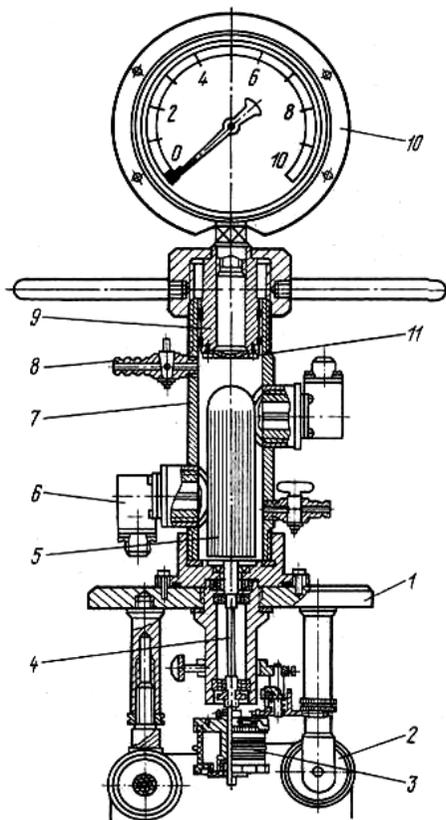


Рис.3.3.5. Ротационный вискозиметр МТИММПа (МАПБ)

Работа прибора. Вначале фаршем заполняют пространство между ротором и стенками цилиндра. Затем, перемещая поршень с помощью гайки, создают внутри объема с продуктом требуемое давление. Далее устанавливают грузики на чашечки и производят замер времени по количеству оборотов шкива. Диаметр ротора равен 32 мм, внутренний диаметр рабочего цилиндра - 38 мм.

Используя те же самые формулы, что и для прибора РВ-8, рассчитывают предельное напряжение сдвига и вязкость продуктов.

Данный вискозиметр при незначительных конструктивных изменениях в приборе может использоваться и для определения реологических характеристик пищевых материалов под вакуумом. Для создания вакуума в приборе требуется дополнительно вакуум-насос.

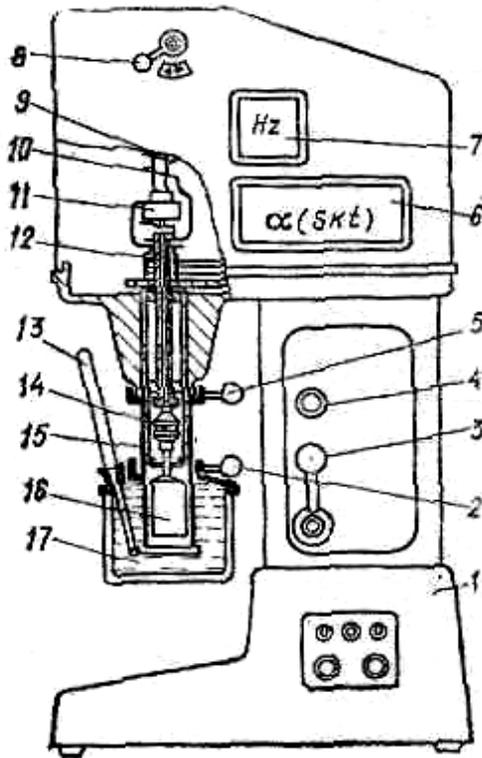
Среди приборов зарубежных фирм представляют интерес ротационные вискозиметры «Реотест RV», «Реотест RN» производства Германии и др.

Ротационные вискозиметры «Реотест» предназначены для определения сдвиговых свойств пищевых продуктов в широком диапазоне, в частности для измерения вязкости и предельного напряжения сдвига для средне- и высоковязких продуктов.

Ротационный вискозиметр «Реотест-RV». Прибор (рис. 3.3.6) смонтирован на станине (1), внутри которой установлен синхронный электродвигатель, соединенный с 12-ступенчатой коробкой передач, которая позволяет изменять частоту вращения внутреннего цилиндра (16) от 0 до  $1500 \text{ c}^{-1}$ . Крутящий момент от коробки передач передается ведущему валу (9) и далее через спиральную пружину (10) ведомому валу (12), соединенному с внутренним цилиндром (16), муфтой (14). Наружный цилиндр (15) крепится к корпусу прибора специальным зажимом (5). Прибор имеет термостатирующий сосуд (17), который снабжен термометром (13) и крепится к корпусу с помощью зажима (2). Величина крутящего момента отсчитывается по шкале прибора (6), скорость вращения устанавливается рычагом (3) и контролируется по указателю (4).

В приборе установлен измеритель моментов торсионного типа с омическими датчиками и работает по принципу превращения механических усилий в электрические импульсы. Показания прибора (6) прямо пропорциональны крутящему моменту, а также напряжению сдвига и вязкости исследуемого материала. Частота вращения

синхронного электродвигателя и, следовательно, внутреннего цилиндра (16) зависит от напряжения тока в сети. Отклонения от номинальной частоты 50 Гц фиксируется прибором (7).

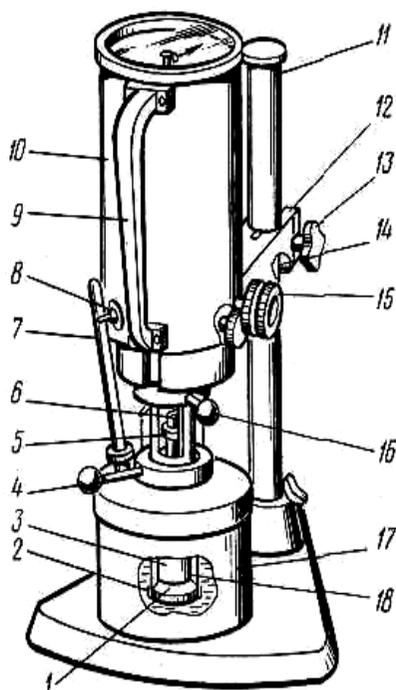


**Рис. 3.3.6. Ротационный вискозиметр «Реотест-RV»**

Характеристика прибора. Пределы измерения: вязкости – от  $10^{-2}$  до  $10^4$  Па·с; скорости сдвига – от 0,1667 до  $1,458 \cdot 10^3$  с $^{-1}$ ; напряжения сдвига – от 12 до  $1 \cdot 10^3$  Па; температуры – от  $-30$  до  $150$  °С; погрешность измерений  $\pm 3$  %.

Ротационный вискозиметр типа RN (рис. 3.3.7) выпускается фирмой «Прюфгеретеве́рке» (Германия) и состоит из измерительного прибора (10), измерительной головки с вращающимся ротором

(3) и термостатирующего сосуда (17). Вискозиметр крепится на штативе (11) с помощью кронштейна (12) и зажимного винта (13). Рукоятка (15) служит для установки требуемой частоты вращения ротора, на которой цифрам 1, 2, 4 и 10 соответствуют следующие частоты вращения ротора (в  $\text{мин}^{-1}$ ): 160, 80, 40 и 16. Изменение скорости вращения ротора может производиться как при остановке, так и во время работы прибора.



**Рис. 3.3.7. Ротационный вискозиметр типа RN (Германия)**

Температура в термостате контролируется термометром (7). Ротор (3) соединяется с валом прибора с помощью муфты (6) и фиксируется гайкой (5). Наружный неподвижный цилиндр (18) расположен совместно с ротором (3) и крепится зажимным рычагом (16). Для очистки прибора от продукта днище неподвижного цилиндра (18) выполнено съемным, в виде крышки (1) с прокладкой и запорной гайкой (2). Термостатирующий сосуд (17) соединен с цилиндром

(18) байонетным запором и фиксируется прижимным рычагом (4). Нижнее положение прибора на штативе (11) ограничивается упором (14).

Для расширения диапазона измерения вязкости вискозиметры RN поставляются с тремя съёмными измерительными системами, состоящими из цилиндров разного диаметра и длины.

Характеристика прибора. Пределы измерения: вязкости - от  $10^2$  до 420 Па·с; напряжения сдвига - от 5,0 до 1500 Па; скорости сдвига - от 5 до 492 с<sup>-1</sup>; частоты вращения ротора - 16, 40, 80 и 160 мин<sup>-1</sup>; температуры - от -30 до 120 °С. Погрешность измерений не более  $\pm 5\%$ .

*Приборы с плоскопараллельным зазором.* Они служат для измерения сдвиговых характеристик материалов в области практически неразрушенных структур при малых деформациях: предельного напряжения сдвига, вязкости, упругости, периода релаксации и др. Приборы такого типа впервые были разработаны П.А. Ребиндером, Д.М. Толстым, Б.А. Николаевым. В приборах плоскопараллельный зазор может быть расположен вертикально, горизонтально или наклонно.

Прибор С.Я. Вейлера и П.А. Ребиндера с вертикальным зазором. Прибор (рис. 3.3.8 а) состоит из пластины (1), кюветы (2), микрошкалы (4), груза (5) и снабжен микроскопом (3). Испытания проводятся следующим образом. Кювета с плоскопараллельным зазором заполняется исследуемым продуктом. В нее посередине вставляют пластину, соединенную с грузом через блок нитью, на которой закреплена микрошкала, отградуированная в десятых или сотых долях миллиметра. Напротив нее устанавливают микроскоп для наблюдения за деформацией сдвига. Груз состоит из двух частей, одна из которых уравнивает пластину, вторая - рабочая. В момент испытаний наблюдатель включает секундомер. Груз перемещает пластину, а величину смещения, соответствующую деформации сдвига, наблюдают через микроскоп и измеряют по микрошкале. После некоторой выдержки и испытания продукта под напряжением, в результате действия которого развиваются упругие и пластические деформации в продукте, рабочую часть груза снимают. Пластина и груз уравниваются, вследствие чего развиваются деформации упругого последствия, их регистрируют до момента остановки указателя на шкале измерений.

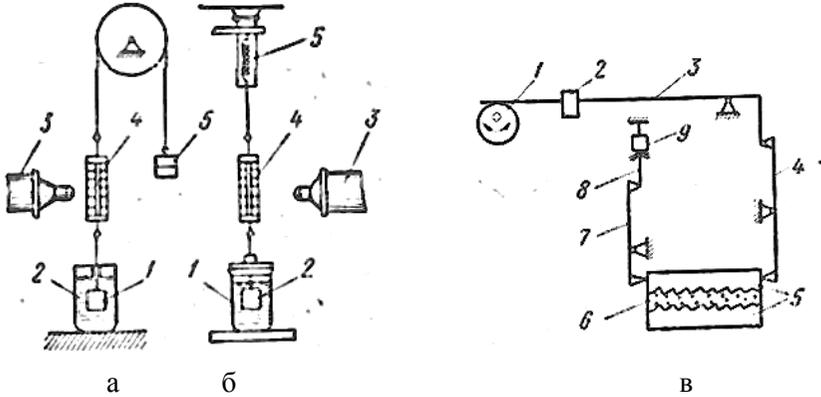


Рис.3.3.8. Приборы с плоскопараллельным зазором:  
 а) прибор С.Я. Вейлера и П.А. Ребиндера; б) - его модификация;  
 в) прибор Д.М. Толстого

Его модификацией является прибор (рис. 3.3.8 б), в котором пластину в кювете сдвигают путем опускания столика с закрепленной на нем кюветой. Испытуемое продуктом напряжение определяют по величине растяжения пружины.

Напряжение сдвига  $\theta$ , Па, определяют по деформации пружины и рассчитывают по формуле

$$\theta = P/(2F), \quad (3.3.5)$$

где  $P$  - нагрузка, соответствующая деформации, Н;  $F$  - площадь боковой поверхности пластины, м<sup>2</sup>.

Предельное напряжение сдвига  $\theta_0$ , Па, определяют по наибольшей нагрузке  $P_{max}$

$$\theta_0 = P_{max}/(2F). \quad (3.3.6)$$

Метод тангенциального смещения пластины позволяет находить не только  $\theta_0$ , но и модули упругости, эффективную вязкость, изучать процесс релаксации, а также снимать полные деформационные кривые  $\dot{\gamma}(\theta)$  при различных скоростях деформации. Приборы

обладают большой чувствительностью и применимы для исследования свойств материалов в большом диапазоне - от слабоструктурированных зелей и суспензий до твердообразных систем с высокопрочной структурой.

Прибор Д.М. Толстого (рис.3.3.8 в). Он служит для нахождения констант упруго-пластично-вязких свойств материалов с практически неразрушенными структурами. Основными элементами прибора являются две пластины (5), между которыми помещается образец продукта (6). Размеры пластин  $0,05 \times 0,02 \times 0,006$  м. Плоскости пластин, примыкающие к продукту, имеют рифление, направленное в сторону, противоположную направлению усилий, деформирующих продукт. Деформацию образцов продукта измеряют при помощи упругой балочки (8) с наклеенными на нее тензорезисторами (9). Сдвигающее усилие на образец создают поворотом эксцентрика (1), гириями (2), которые устанавливают на неравноплечем рычаге (3) прибора. От него усилие на продукт передается через равноплечий рычаг (4) и верхнюю пластину (5). Перемещение верхней пластины (5) через рычаг (7) упругой балочке (8). Во время испытаний необходимо учитывать, чтобы толщина слоя позволяла одновременно находиться минимум двум частицам материала.

На приборе определяют модуль быстрой эластичной деформации сдвига  $G_1$ , Па, модуль медленной эластичной деформации  $G_2$ , Па, наибольшую пластическую вязкость  $\eta'_0$ , Па·с и условный статический предел текучести  $\theta_{T_1}$ , Па, которые рассчитывают по формулам

$$G_1 = \theta h / \Delta h_0; \quad G_2 = \theta h / (\Delta h_m - \Delta h_0); \quad \eta'_0 = (\theta - \theta_T) / \dot{\gamma}, \quad (3.3.7)$$

где  $\theta$  - напряжение сдвига, Па;  $\theta_T$  - условный статический предел текучести, Па;  $h$  - толщина слоя продукта, м;  $\Delta h_0$  - начальная (условно-мгновенная) деформация, м;  $\Delta h_m$  - эластичная деформация, м;  $\dot{\gamma}$  - скорость сдвига,  $\text{с}^{-1}$ .

*Пластометры, пенетрометры, консистометры.* Эта группа приборов служит для измерения сдвиговых характеристик в области

практически не разрушенных структур при малых деформациях, которые в дальнейшем используются для оценки прочности, нежности, консистенции материалов. В приборах в качестве рабочего органа (тела), внедряемого в продукт, является индентор, который может быть различной формы: конус, сфера, игла, цилиндр и пр.

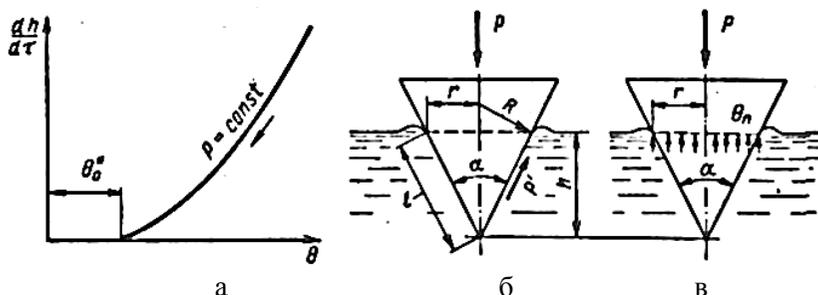
Пенетрацией называется метод исследования структурно-механических свойств полутвердых и твердых продуктов путем определения сопротивления продуктов проникновению в них инденторов со строго определенными размерами, массой и материалом при точно определенной температуре и за определенное время. Испытания могут проводиться с постоянным усилием пенетрации (при этом определяется глубина погружения); с постоянной глубиной погружения (измеряется усилие); с постоянной скоростью погружения (регистрируется усилие в зависимости от глубины погружения).

Приборы, использующие метод пенетрации для измерения структурно-механических свойств продуктов, принято называть пластометрами, пенетрометрами и консистометрами.

Предельное напряжение сдвига, как одна из важных реологических характеристик материала, служащих для оценки прочности его структуры, определяется при помощи конического пластометра.

Метод погружения конуса для измерения структурно-механических свойств вязкопластичных тел предложен П.А. Ребиндером и Н.А. Семененко.

Согласно теории конических пластометров, разработанной акад. П.А. Ребиндером, процесс погружения конуса в продукт представляет следующее. За начальное граничное условие принята точка касания вершины конуса с поверхностью продукта. При этом его движение во время испытаний должно быть строго вертикальным. Кинетика погружения конуса характеризуется кривой и представлена на рисунке 3.3.9. В момент начала погружения конуса в продукт напряжение бесконечно велико (площадь касания равна нулю), его скорость равна нулю, а ускорение ( $a = d^2h/d\tau^2$ ) соответствует ускорению силы тяжести. Поскольку сила, действующая на конус (равна массе подвижных частей системы), за все время погружения остается постоянной, а площадь соприкосновения конуса с продуктом увеличивается, то напряжение сдвига в системе конус-продукт уменьшается.



**Рис. 3.3.9. Реограмма и схемы для расчета:**

- а) зависимость скорости движения конуса от напряжения сдвига;
- б) схема для расчета предельного напряжения сдвига;
- в) схема для расчета предельного давления

При остановке конуса ( $dh/d\tau = 0$ ) погружение будет предельным, и внешняя сила уравнивается пластической прочностью структуры. Для этого случая отсчитывается предельное напряжение сдвига (отношение силы у «смоченной» части боковой поверхности конуса, (рис. 3.3.9 б) или предельное давление (отношение силы к горизонтальной площади сечения конуса, которое проходит по поверхности продукта, (рис. 3.3.9 в). Выталкивающей силой продукта (Архимедова сила) пренебрегают вследствие ее малости. Если снять полную кривую течения (рис. 3.3.9 а), то можно вычислить изменения эффективной вязкости. Однако прибор для этих целей обычно не используют.

При определении предельного напряжения сдвига предполагается, что продукт течет вдоль образующей поверхности конуса (рис. 3.3.9 б). Условия равновесия сил на поверхности конуса получим, проектируя на образующую конуса  $\ell$  движущую силу  $P$  и приравнивая ее силе сопротивления  $P'$

$$P' = P \cos(\alpha / 2). \quad (3.3.8)$$

Предельное напряжение сдвига  $\theta_0^H$ , Па, представляет собой отношение силы сопротивления  $P'$  вдоль боковой поверхности конуса к площади  $F$  этой поверхности

$$\theta_0^H = P'/F = P \cos(\alpha/2) / \pi r l = K_\alpha mg/h^2, \quad (3.3.9)$$

где  $K_\alpha$  - константа конуса,  $\alpha$  - угол при вершине конуса, град;  $m$  - масса конуса, кг;  $g$  - ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $h$  - глубина погружения конуса в продукт, м.

Константу конуса принимают по данным Н.Н.Аграната:

$\alpha$ , град	30	40	45	60	89,33	90
$K_\alpha$	0,958	0,530	0,417	0,214	0,0836	0,00683

Продолжительность испытания составляет 180 секунд.

Конический пластометр КП-3. Прибор разработан М.П. Вола-ровичем и предназначен для определения предельного напряжения сдвига различных материалов, в том числе мясных фаршей и гото-вых мясных изделий.

Значительный вклад в развитие конических пластометров внесли ученые В.Д. Косой, А.В. Горбатов и др. (МАПБ), которыми разработан целый ряд пластометров типа ПП-1, ПП-2, ПП-3, ПП-3М для исследования структурно-механических свойств вязкопластич-ных материалов, в которых используется конический индентор. При-боры обладают достаточно высокой точностью измерений, ком-пактны, надежны в работе и просты в обслуживании, имеют неболь-шую массу.

Полуавтоматический пластометр ПП-3М (рис. 3.3.10). Прибор состоит из корпуса с расположенным внутри него штоком (14) с ин-дентором (18) в нижней части и демпфирующим элементом, пред-ставляющим собой цилиндр (13) с поршнем (12) - верхней части. Ин-дентор (18) устанавливается в верхнем положении с помощью ручки (16) и фиксатора (17). Механизм регистрации перемещений инден-тора состоит из двух цилиндрических барабанов (6), (20), установ-ленных на оси (5) с возможностью вращения. Первый цилиндриче-ский барабан (6) соединен со штоком (14) посредством рычага (8), имеющего противовес (7) для балансировки механизма регистрации во время измерения. Первый цилиндрический барабан (6) снабжен контактной пластиной (3) из упругого магнитного материала, а вто-рой цилиндрический барабан (20) - стрелкой (9) для регистрации ве-личины перемещений индентора по шкале отсчета (10) и электромаг-

нитом (4), установленным с возможностью воздействия на контактную пластину (3) при замыкании электрической цепи во время контакта индентора (18) исследуемым продуктом. Одновременно электромагнит (4) обеспечивает разбалансировку первого цилиндрического барабана (20), необходимую для возврата стрелки (9) в исходное положение при подъеме индентора (18). Тумблеры включения и выключения питания, ручки и контрольные лампочки расположены на передней панели прибора (21).

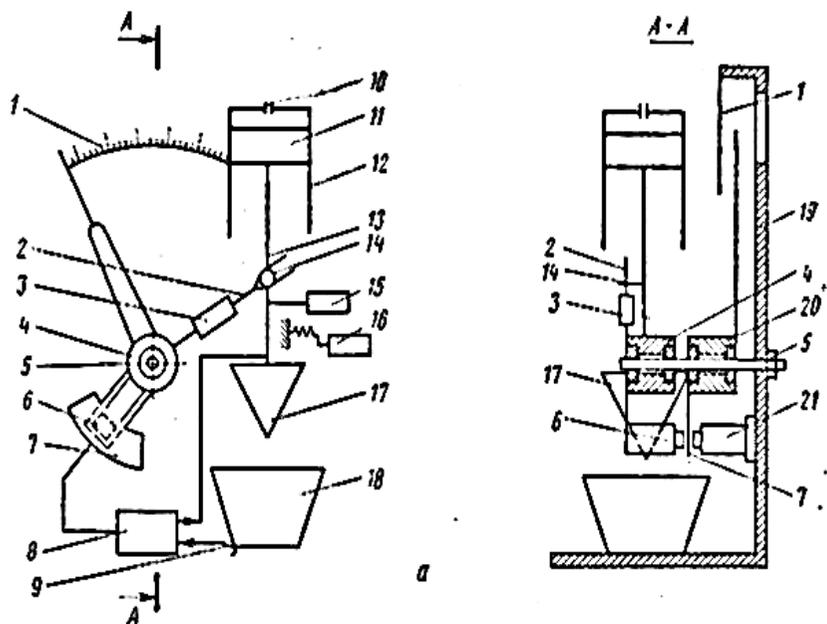


Рис. 3.3.10. Принципиальная схема полуавтоматического пластометра ПП-3М

Во время испытания исследуемый продукт, например мясной фарш, помещают в емкость (19) и устанавливают под индентором (18), обеспечивая ее контакт через реле (2) с пластиной (1), и затем освобождают фиксатор (17). Индентор под действием силы тяжести вместе со штоком (14) перемещается вниз. В момент соприкосновения индентора с исследуемым продуктом замыкается электрическая цепь. Электромагнит (4) притягивает к себе пластину (3) и тем самым обеспечивает одновременное вращение двух барабанов (6), (20). По мере погружения

индентора в исследуемый продукт стрелка перемещается по шкале отсчета (10), с которой считывают показания по окончании измерений.

Характеристика прибора: предельное напряжение сдвига -  $10 \cdot 10^4$  Па; напряжение - 220 В; габаритные размеры -  $0,19 \times 0,08 \times 0,24$  м; масса - 3 кг.

Полуавтоматический прибор ППП-4 позволяет определить характеристики продукта с преобладающими проводниковыми и диэлектрическими свойствами и предназначен для работы в трех режимах: в первом - в режиме определения предельного напряжения сдвига продукта с преобладающими свойствами проводника; во втором - в режиме определения предельного напряжения сдвига продукта с преобладающими свойствами диэлектрика; в третьем - в режиме измерения пенетрации.

Полуавтоматический пенетрометр ПП-5 (рис. 3.3.11). Прибор ПП-5 является новой и перспективной моделью, разработан на базе прибора ППП-4 и позволяет за один опыт одновременно определять предельное напряжение сдвига и степень пенетрации как вязкопластичных, так и упругопластичных продуктов.

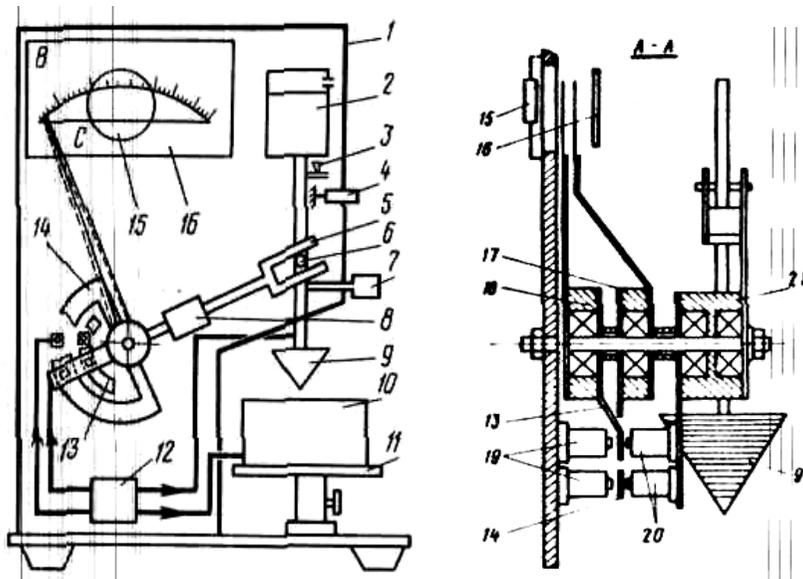


Рис.3.3.11. Принципиальная схема пенетрометра ПП-5

Полуавтоматический пенетрометр ПП-5 состоит из корпуса (1), демпферного устройства (2), микровыключателя (3), фиксатора (4), рычага (5), пальца (6), ручки подъема индентора (7), противовеса (8), индентора (9) (конуса) со штоком, емкости (10) для продукта, подъемного столика (11), блока управления (12), пластин (13), (14) соответственно для фиксации степени пенетрации или максимально глубины погружения индентора, подвижной увеличивающей линзы (15), измерительной шкалы (16), барабанов (17), (18) с измерительными стрелками для отсчета максимальной величины погружения индентора и степени пенетрации, магнитов (19) для фиксации стрелок по окончании замера, магнитов (20) для фиксации момента соприкосновения индентора с продуктом и барабана (21) с пластиной и магнитами.

Прибор работает следующим образом. Исследуемый продукт помещают в емкость и устанавливают на столике под индентором. С помощью реле задают время измерения степени пенетрации в секундах (3-10 сек) и предельного напряжения сдвига в минутах (2-5 мин). Высвобождают фиксатор, и шток с индентором перемещается вниз под действием собственного веса. В момент соприкосновения индентора с продуктом замыкается электрическая цепь управления электромагнитами, притягивающими к себе пластины. Три барабана объединяются и, совместно вращаясь, перемещают стрелки по шкале отсчета. По истечении заданного (в секундах) времени первый электромагнит отпускает работающую с ним в паре пластину, которая одновременно притягивается к жестко фиксированному на передней панели электромагниту. Таким образом, по шкале снимают показания для определения степени пенетрации. Шток с индентором продолжает погружение, и вторая стрелка перемещается по шкале до тех пор, пока не истечет заданное (в минутах) время, после чего аналогичным образом неподвижно фиксируется вторая стрелка. Показания ее служат для расчета предельного напряжения сдвига.

Пенетрация - это условно принятая величина, которая используется в качестве сравнительной оценки прочности, нежности, консистенции структуры между двумя, тремя и так далее материалами и измеряется в относительных единицах. За единицу пенетрации принят 1 мм.

Учитывая то, что замер измерения пенетрации длится всего 3-10 сек, прибор ПП-5 можно использовать для экспресс-контроля и

регулирования технологических параметров процесса.

Прибор дополнительно комплектуется набором игольчатых инденторов, содержащих либо одну иглу, либо несколько игл, запрессованных на диске по окружности (3-5 штук). В случае применения игольчатых инденторов приборы можно использовать для определения консистенции готовых продуктов (например, колбасных изделий) или для оценки нежности, прочности сырья (например, мяса).

Прибор может работать в двух режимах: в первом - в режиме одновременного определения предельного напряжения сдвига и степени пенетрации материалов с преимущественно проводниковыми свойствами; во втором - в режиме одновременного определения предельного напряжения сдвига и степени пенетрации материалов с преимущественно диэлектрическими свойствами.

В.Д. Косой и другие, на основании проведенных исследований установили, что значения величин предельного напряжения и степени пенетрации хорошо коррелируют между собой, на основании чего ими предложена зависимость между этими показателями

$$\theta_0^H = K_{II} / h_{II}^2, \quad (3.3.10)$$

где  $K_{II}$  - коэффициент пропорциональности между степенью пенетрации и предельным напряжением сдвига;  $h_{II}$  - величина пенетрации.

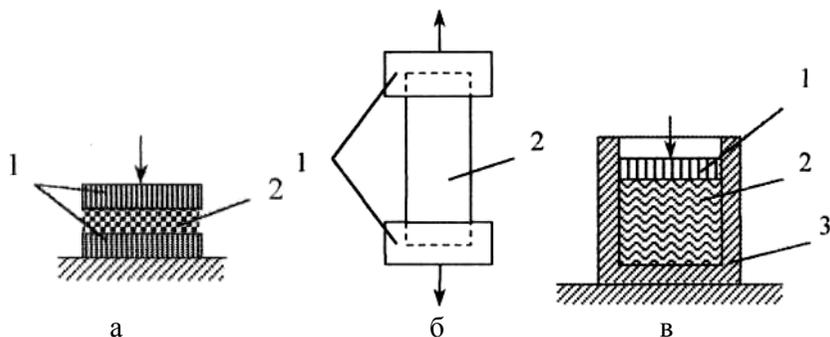
Характеристика прибора: предельное напряжение сдвига -  $10 \cdot 10^4$  Па; степень пенетрации - до  $4,5 \cdot 10^{-2}$  м; напряжение - 220 В; габаритные размеры -  $0,27 \times 0,14 \times 0,34$  м; масса - 5 кг.

### **3.4 Приборы для измерения компрессионных свойств продуктов**

Наряду со сдвигом объемное или осевое сжатие, а также осевое растяжение являются основными типами механической деформации продуктов. В ряде машин, как-то волчка, шприцах, дозирочно-формирующих прессах, дозаторах и других, продукты находятся при повышенных давлениях, что изменяет их первоначальный

объем и плотность. На выходе из машины объем и плотность также могут отличаться от первоначальных. Эти изменения в продукте определяют, основываясь на компрессионных характеристиках.

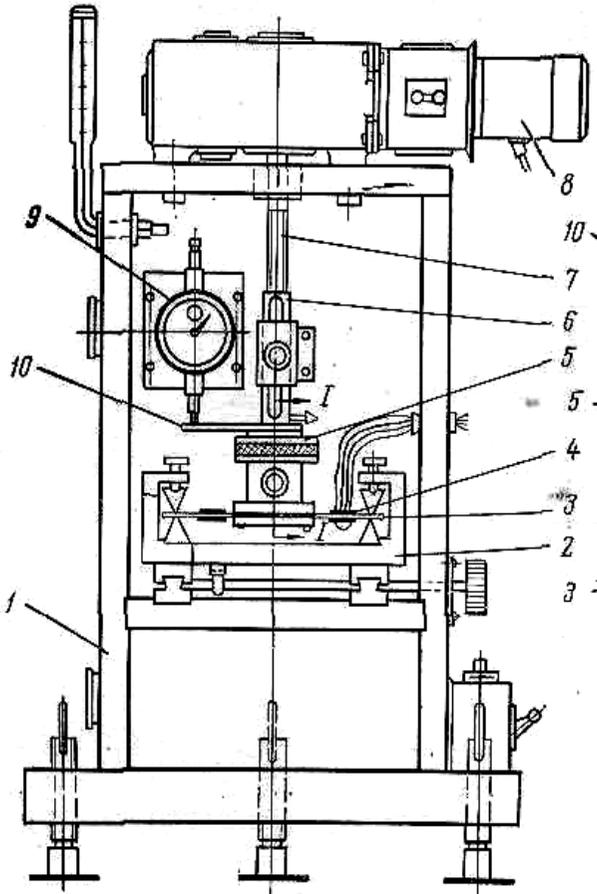
Основными методами измерения (рис. 3.4.1) компрессионных характеристик продуктов являются осевое сжатие (а), осевое растяжение (б), одностороннее объемное сжатие (в) и двухстороннее объемное сжатие.



**Рис. 3.4.1. Методы измерения компрессионных свойств продуктов**

Прибор для измерения компрессионных характеристик продуктов (рис. 3.4.2). Прибор предназначен для определения деформационных свойств продуктов при осевом сжатии.

Прибор состоит из корпуса (1), состоящего из нижней и верхней частей. Внутри верхней части установлен выдвижной столик (2), на котором расположена в фиксированном положении на призмах тензометрическая балка (3) с закрепленными на ней тензодатчиками (4). На тензометрической балке в средней ее части жестко закреплена бобышка для установки и крепления нижней пластины (5). Верхняя и нижняя пластины (5) могут быть выполнены из одного или разного материала. Подвижная штанга-гайка (6) получает возвратно-поступательное равномерное движение от винта (7), жестко соединенного с электродвигателем (9) через редуктор и ступенчатый вариатор, позволяющий создавать различные скорости движения штанги-гайки. В нижней части штанги-гайки крепится пластина-поперечина (10), служащая опорой для ножки индикатора, и верхняя рабочая пластина (5). На корпусе прибора установлены включатель и переключатель реверса. Прибор снабжен комплектом круглых пластин разного диаметра площадью 5, 7, 10, 15 см<sup>2</sup>.



**Рис. 3.4.2. Прибор для измерения компрессионных характеристик продуктов**

Перед началом испытаний прибор тарируют с помощью стандартных грузов. Для этого выдвигают столик и на нижнюю пластину поочередно устанавливают стандартные грузы. С помощью тензодатчиков на шлейфовом осциллографе отмечают значения прогиба тензобалки конкретному значению груза. После тарировки передвижной столик вкатывают назад. Затем между пластинами помещают образец продукта, верхнюю пластину подводят к образцу без нагрузки и устанавливают «зайчик» осциллографа на нуль при по-

мощи скользящего реохорда моста. Во время испытания при включенном приводе механизма опускания-подъема пластины записывают напряжение-время. После этого привод выключают и записывают нисходящую ветвь кривой релаксации напряжений. По окончании испытаний «зайчик» осциллографа вновь устанавливают на нуль, если произошло его смещение. Испытания повторяют при различной скорости деформации образцов. Образцы продукта подготавливают вырезанием, либо формовкой в цилиндре. Погрешность прибора составляет  $\pm 3\%$ . Прибор также может использоваться для определения липкости продуктов.

Универсальный прибор ВНИИМПа (рис. 3.4.3). Прибор предназначен для измерения компрессионных характеристик при осевом сжатии продуктов.

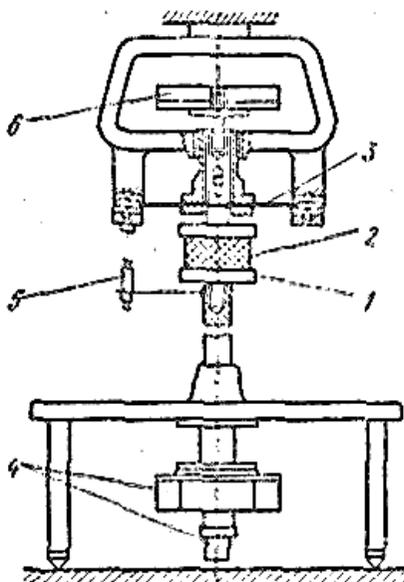


Рис. 3.4.3. Универсальный прибор ВНИИМПа

Прибор имеет основание, к которому жестко присоединены реверсивный электродвигатель с редуктором и коробка скоростей (4). На выходном валу коробки скоростей имеется подвижный шток с держателем (1) образца продукта (2). С помощью переключателя скоростей устанавливают одну из трех скоростей для перемещения

подвижного штока. На основании смонтирована стойка с кронштейном и тензометрической балкой (3). В центре тензобалки установлен полый патрон со сквозным отверстием, в которое вставляется одно из измерительных приспособлений. В центре кронштейна имеется отверстие, через которое входит хвостовик держателя грузов (6). На кронштейне и основании прибора установлены концевые выключатели, а на подвижном штоке - механический или электрический датчик (5) деформации продукта. В комплект прибора входит набор сменных измерительных приспособлений и держателей рабочего органа.

Методика проведения испытания образцов продукта такая же, как и для прибора, описанного выше. Отличие заключается в том, что перемещается нижняя пластина, а не верхняя. По полученным данным строят деформационные кривые исследуемого продукта.

Данный прибор также применяется для определения адгезионных характеристик продуктов.

Консистометр Гепплера (рис. 3.4.4). Прибор предназначен для определения компрессионных свойств вязкопластичных материалов, в частности для измерения относительных деформаций и построения кинетических зависимостей деформационных изменений материала под действием объемного сжатия.

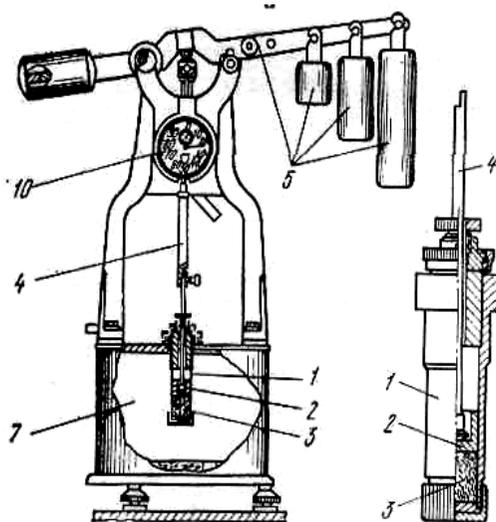


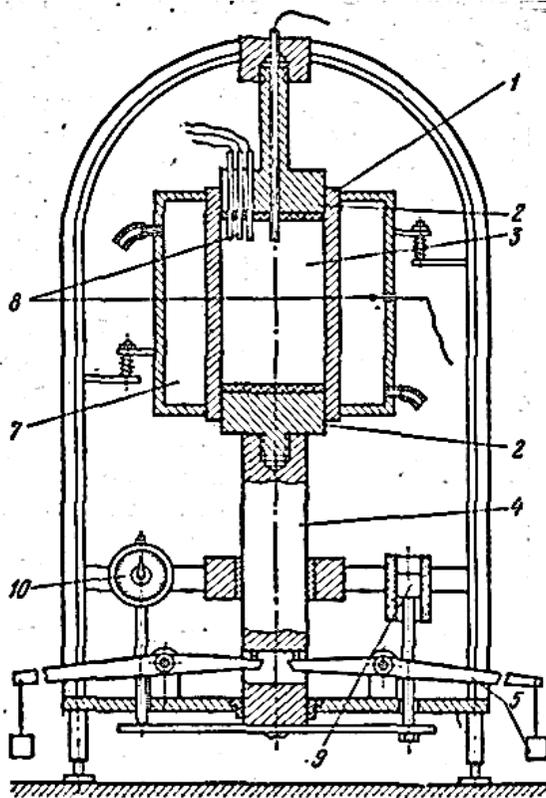
Рис. 3.4.4. Консистометр Гепплера

Прибор состоит из измерительного цилиндра (1), внутри которого находится исследуемый продукт (3), поршня (2), штока (4), передающего усилие давления, устройства (5), создающего давление, включающее грузы, поворотного рычага и установленного на нем балансира, термостата (7), индикатора часового типа (10) для измерения перемещения поршня и установочных винтов.

Испытания проводятся следующим образом. Образец продукта, взвешенный с заданной точностью (например, от  $\pm 0,05$  до  $0,1$  %), укладывают в цилиндр, в него вводят поршень и подвергают термостатированию. Для удаления воздуха продукт подпрессовывается или вакуумируется. Начальную высоту продукта в цилиндре измеряют после подпрессовки. Затем на рычаг навешивают контрольный груз и с помощью индикатора производят замер перемещения поршня. Замер величин абсолютных деформаций продукта производят через 20 сек или непрерывно. Рабочие пределы изменения давления у консистометра Гепшлера от  $1,56 \cdot 10^5$  до  $15,6 \cdot 10^5$  Па. Максимальное время, необходимое для достижения равновесного состояния, равно 180 сек, что примерно соответствует периоду релаксации для многих пищевых продуктов. Затем нагрузку снимают и исследуют кинетику восстановления образца. По результатам измерений вычисляют относительные деформации, строят кинетические зависимости. Поскольку масса продукта в цилиндре известна, то по результатам замеров можно рассчитать плотность продукта для конкретного значения давления.

Компрессионный акалориметр МТИММПа (МАПБ). Прибор (рис. 3.4.5) позволяет определять компрессионные и теплофизические свойства вязко-пластичных материалов при различных давлениях.

Прибор состоит из корпуса, подвешенного на пружинах измерительного цилиндра (1), для размещения навески исследуемого продукта (3), с водяной рубашкой (7). В цилиндре с противоположных сторон установлены поршни (2), между которыми закладывают навеску исследуемого продукта. Поверхность соприкосновения поршней и исследуемым продуктом термоизолирована эбонитовыми прокладками.



**Рис. 3.4.5. Компрессионный акалориметр МТИММПа**

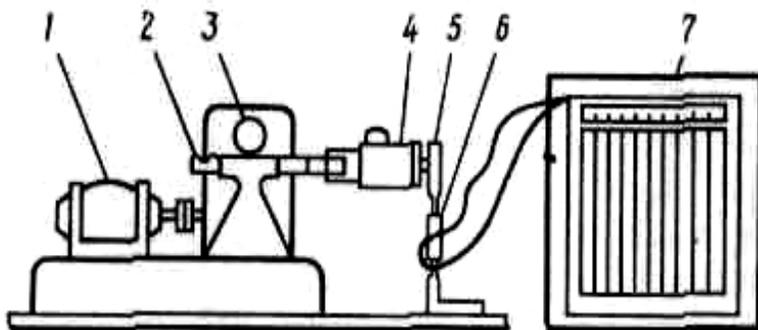
Верхний поршень закреплен неподвижно на корпусе, а нижний - на подвижном штоке (4), который посредством грузов (5), навешиваемых на рычаги, осуществляет поступательное движение, обеспечивая первоначальную подпрессовку исследуемого продукта. Шток и поршень в нерабочем состоянии уравновешены с учетом массы продукта. Со штоком неподвижно соединен плунжер (9) индукционной катушки с помощью опорного рычага, на другой конец которого опирается конец стержня индикатора часового типа (10). Для измерения температуры продукта в различных точках и греющей среды установлены терморпары (8) игольчатого типа. Запись показаний терморпар производится потенциометром КСП-4.

Во время испытаний исследуемый продукт, заключенный в цилиндр, в результате перемещения нижнего поршня подвергается объемному сжатию, изменяя при этом свой первоначальный объем. Деформационные изменения объема продукта одновременно фиксируются визуально по индикатору часового типа и записываются на диаграммную ленту потенциометра. Далее по полученным данным рассчитывают компрессионные характеристики продукта.

Прибор также позволяет проводить испытания продуктов при повышенных или пониженных значениях температуры, для чего рубашку прибора заполняют жидкостью с заданной температурой.

*Приборы среза.* Наряду с пластометрами, пенетрометрами и прочего структурно-механические свойства и прочность продуктов можно исследовать, определяя силу среза. Она используется для объективной оценки их консистенции.

Прибор для испытания на срез ПМ-3 (МГИММПа). Прибор (рис. 3.4.7) предназначен для определения усилий среза колбасных изделий, мяса, мясопродуктов и др.



**Рис. 3.4.7. Принципиальная схема прибора ПМ-3**

Прибор состоит из основания, электродвигателя (1) с реверсом, червячного редуктора (3), зубчатой рейки (2), на которой закреплен рабочий орган (4), упругой балки (5), на которой закреплены тензодатчики (6), и потенциометра (7). Рабочий орган прибора представляет собой устройство, состоящее из двух колодок, имеющих отверстие, закрываемое крышками, между колодками находится пластина с отверстием, которая одним концом прикреплена к зубчатой рейке. Перемещение пластины осуществляется от электродвигателя через

муфту, червячный редуктор и передачу зубчатое колесо-рейка. Отверстия в колодках и пластине могут быть круглой, квадратной или треугольной формы.

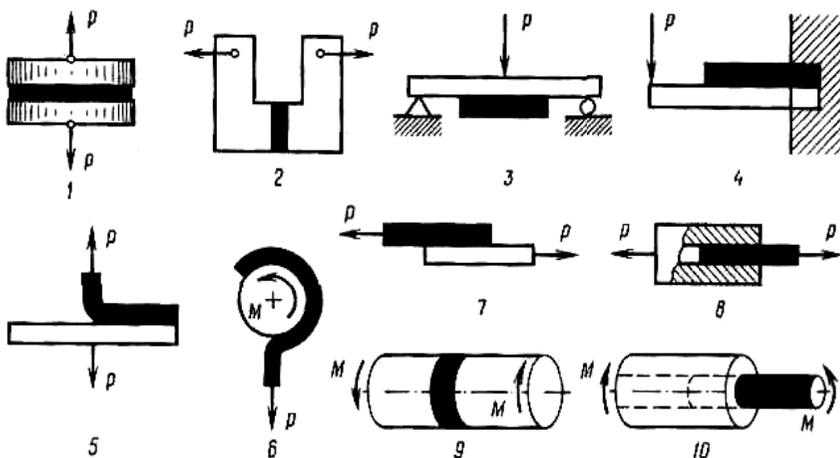
Во время испытаний предварительно вырезанный образец цилиндрической формы диаметром 10 мм из сырого или вареного мяса вкладывают в отверстие, образованное колодками и пластиной при совмещении их отверстий, и прикрывают с обеих сторон крышками. Нажатием кнопки «пуск» включают электродвигатель и приводят в движение зубчатую рейку, которая смещает пластину. Пластина, смещаясь, давит на образец и срезает его. Усилие, необходимое для среза образца, передается на тензобалку. Изгиб балки от тензодатчиков в виде электрического сигнала передается на потенциометр, где фиксируется в форме пика на диаграммной ленте. По кривой, записанной на диаграммной ленте, рассчитывают максимальное значение усилия среза и работу, затраченную на срез образца.

### **3.5 Приборы для измерения поверхностных свойств продуктов**

Приборы и методы измерения адгезии основаны на разрушении адгезионного соединения путем приложения внешнего усилия. Определение адгезионных свойств продуктов в зависимости от способа приложения усилия производят методом отрыва и методом сдвига. Для указанных методов могут применяться различные способы их проведения, которые схематично представлены на рисунке 3.5.1, где пищевой продукт (адгезив) показан темным, а материал, с которым он контактирует (субстрат) - светлым.

Разделение (отрыв) контактирующих тел в зависимости от их природы и технологических условий может быть по границе контакта (адгезионный отрыв), по слою продукта (когезионный отрыв) или смешанным (адгезионно-когезионный отрыв). Учитывая эти обстоятельства, перед испытаниями необходимо тщательно подготавливать образцы исследуемого продукта (адгезива) и материала (субстрата), с которым он будет контактировать. При адгезионном отрыве нарушаются внешние связи между материалом и продуктом, которые характеризуют энергию свободной поверхности. При когезионном отрыве нарушаются внутренние связи в продукте, которые зависят от энергии взаимодействия между элементами структуры в

условиях объемного напряженного состояния. Для пищевых продуктов чистый адгезионный отрыв наблюдается редко, поэтому в опытах измеряют усилие отрыва материала (субстрата), часто без конкретизации его вида.



**Рис. 3.5.1. Способы измерения адгезии:**

- 1 - отрыв нормальной силой при растяжении; 2 - отрыв при внецентренном растяжении (сжатии); 3, 4 - отслаивание материалов при изгибе; 5, 6 - отслаивание при отрыве; 7, 8 - разрушение соединения при сдвиге; 9, 10 - сдвиговое разрушение при кручении.

На величину адгезии влияют технологические свойства самого продукта (температура, влажность, состав и др.); марка конструкционного материала; шероховатость поверхности материала; условия измерения (геометрические, кинематические и динамические параметры прибора).

Требования, предъявляемые к адгезиомерам:

- показания приборов должны быть первичными, то есть не нуждаться в предварительной тарировке на каком-либо эталонном материале и выражаться в абсолютной системе единиц;
- перед измерением продукт должен прижиматься к субстрату для установления контакта и удаления из него воздушных пузырьков;

- нанесение продукта заданной толщины на пластины прибора должно проводиться с помощью шаблона, чтобы исключить влияние толщины на его адгезионные свойства;

- в приборах должна быть предусмотрена возможность замены пластин с целью определения влияния марки материала пластин и степени его обработки (шероховатости) на прочность молекулярных контактов;

- приборы должны допускать возможность варьирования, скорости приложения силы отрыва или сдвига в широком диапазоне, для установления влияния силы отрыва на распределение деформаций и усилий между пластинами и продуктом.

Характеристикой адгезионной способности продукта могут быть следующие величины: сила отрыва, отнесенная к площади контакта; работа отрыва, отнесенная к площади контакта; время, необходимое для разрушения связи между субстратом и адгезивом под действием заданной нагрузки. Удельную минимальную силу иначе называют адгезионной прочностью, адгезионным напряжением (давлением), давлением прилипания или удельным прилипанием.

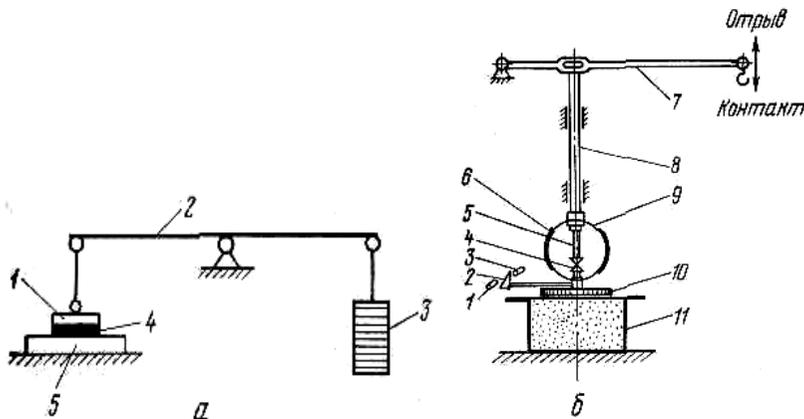
Приборы для определения адгезионных характеристик по способу приложения нагрузки делят на адгезиометры с постоянным отрывом, адгезиометры с мгновенным отрывом, а также на сдвигомеры. При равномерном отрыве нагрузка прикладывается перпендикулярно плоскости субстрата, при этом адгезия характеризуется нормальной силой, отнесенной к единице площади контакта, то есть нормальным напряжением. При сдвиге определяются касательные напряжения, возникающие при относительном смещении слоев адгезива относительно субстрата. Для исследования адгезии пищевых вязкопластичных материалов используются приборы, основанные на способе нормального отрыва.

Адгезиометр Б.А. Николаева (рис. 3.5.2). Прибор прост: сконструирован по принципу рычажных весов и предназначен для исследования адгезии вязких пищевых продуктов. Он состоит из измерительной пластины (субстрата) (1), выполненной в виде диска, двухплечевого рычага (2), к которому с одной стороны подвешен субстрат, а с другой - груз (3), и основания прибора (5). Между диском и основанием нанесен адгезив (4). Во время испытания, постепенно увеличивая массу груза (3), добиваются отрыва диска (1) от адгезива

(4). По результатам измерения рассчитывают липкость материала.

Адгезиометр Ю.В. Клаповского (рис.3.5.2 б). Прибор предназначен для определения адгезионных свойств вязких пищевых материалов, в частности конфетных масс. Он прост по конструкции и надежен в эксплуатации.

Прибор состоит из рычага (7), к нему шарнирно закреплен вертикальный шток (8), к которому через упругое измерительное кольцо (9) крепится пластина (10). Для создания предварительного контакта имеются распорный винт (5) и упор (4). Усилие отрыва измеряют при помощи тензорезисторов (6) наклеенных на упругое измерительное кольцо (9). Перемещение пластины (10) измеряют при помощи фотодиода (3), при этом шторка (2) перекрывает часть светового пучка осветителя (1), изменяя освещенность фотодиода. Исследуемый продукт укладывают в специальную емкость (11), которая имеет крышку с отверстием, в которое с малым зазором входит пластина-субстрат. Во время испытаний показания тензорезисторов и фотодиода после усиления записываются на шлейфовом осциллографе, позволяя фиксировать изменение во времени усилия отрыва и перемещение субстрата относительно адгезива.

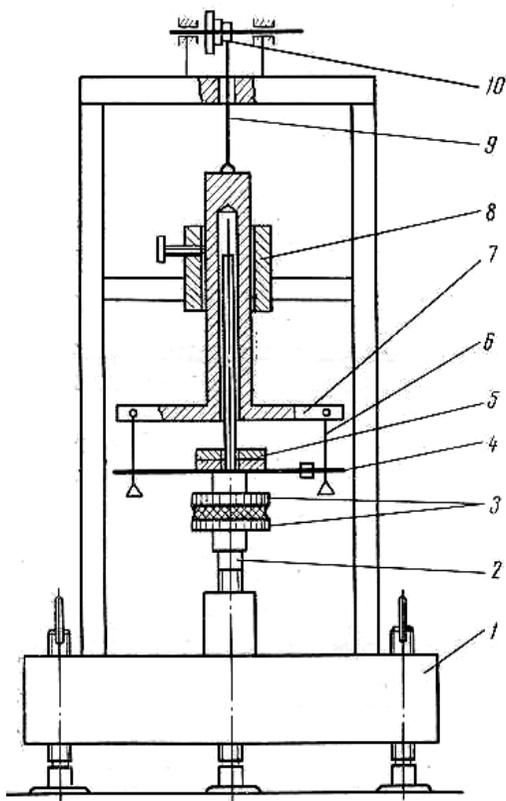


**Рис. 3.5.2. Адгезиометры:**

а) адгезиометр Б.А. Николаева; б) адгезиометр Ю.В. Клаповского

Универсальный адгезиометр МТИММПа (МАПБ). Прибор (рис. 3.5.3) предназначен для измерения адгезионных свойств про-

дуктов и позволяет менять в широком диапазоне геометрические, кинематические, динамические и другие параметры измерения.



**Рис. 3.5.3. Универсальный адгезиометр МТИММШа**

Прибор имеет корпус (1), подъемный столик (2) с микрометрическим винтом для крепления нижней пластины (субстрата) (3) и устройство для нагружения продукта и отрыва верхней пластины. Верхняя пластина фиксируется держателем, который смонтирован на тензобалке (4), и имеет хвостовик для обеспечения соосности подвижной части системы. В верхней части прибора на поперечной балке корпуса закреплена втулка (8), в которую вставлена поперечина (7) с хвостовиком, на концах которой закреплены серьги (6). На веру кор-

пуса установлен приводной вал с набором шкивов (10) разных диаметров. Вертикально вверх тензобалка перемещается серьгами, которые оканчиваются призмами и шарнирно укреплены на поперечине с хвостовиком. Последняя перемещается во втулке посредством нити (9) и набора шкивов, которые приводятся во вращение от электродвигателя через редуктор (на рисунке не показаны). Для создания предварительного контакта на тензобалку устанавливают грузы (5). В каждой серии опытов тензобалку тарируют, получая зависимость: величина нагрузки - отклонение «зайчика» на осциллограмме.

Параметры прибора: давление предварительного контакта от 300 до  $3,5 \cdot 10^5$  Па; длительность предварительного контакта - 3; 60; 180; 300; 600 с; скорость отрыва верхней пластины от продукта - 0,00167; 0,00358; 0,0093;

0,0193 м/с; площадь пластин - 0,0005; 0,0007; 0,0010; 0,0015 м<sup>2</sup>; материал пластин - сталь Ст. 3, нержавеющей сталь 1Х18Н9Т, дюралюминий, чугун, фторопласт-4, латунь; высота продукта - от 0,00003 до 0,003 м; относительная погрешность прибора -  $\pm 4\%$ .

Адгезиометр АМ-1 (рис.3.5.4). На приборе определение адгезионных свойств продуктов основано на методе сдвига и предназначен для исследования вязкопластических материалов, в частности для теста.

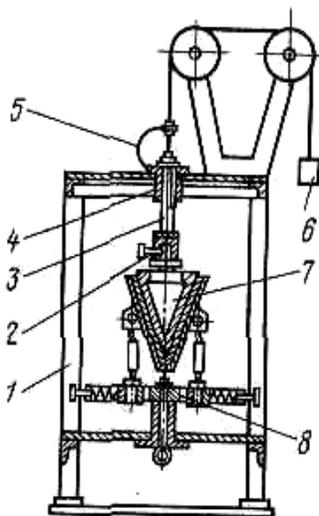


Рис. 3.5.4. Адгезиометр АМ-1

Прибор состоит из станины (1), фиксатора (2), штока (3), втулки (4), упругого элемента (5) с закрепленными на нем тензорезисторами, груза (6), матрицы (7) с заготовкой и платформы (8).

Во время испытания матрица с выпеченной тестовой заготовкой крепится к вертикальному штоку, затем заготовка обжимается двумя полуконическими колодками. При повороте платформы вокруг вертикальной оси происходит сдвиг заготовки относительно неподвижной матрицы. Подъем матрицы при помощи груза позволяет определить усилие отрыва.

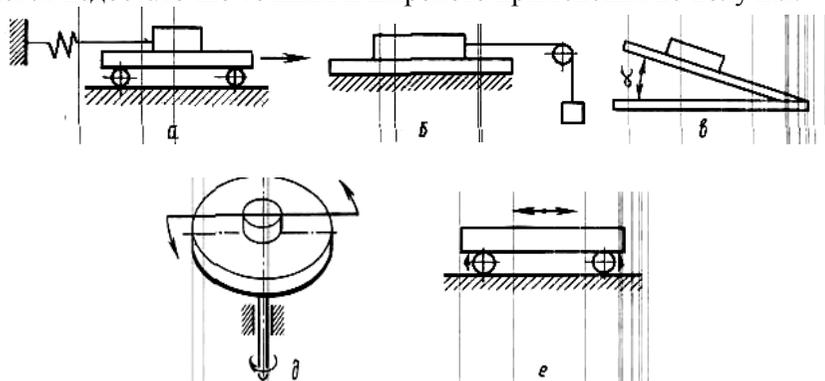
*Приборы для определения коэффициентов трения.* Приборы, применяемые для определения коэффициентов трения, пищевых продуктов называют трибометрами.

Коэффициент внешнего трения пищевых материалов в зависимости от реологических свойств, состояния фрикционных поверхностей и скорости скольжения определяется различными способами. Классический тип прибора для измерения силы внешнего трения представляет собой пару тел, соприкасающихся плоскими поверхностями, площадь которых может быть от долей квадратных миллиметров до десятков квадратных сантиметров. При этом одно из тел смещается относительно другого. Сила, прикладываемая для смещения (трения) одного тела относительно другого, измеряется тензометрическими, динамометрическими или какими-либо другими датчиками. И. В. Крагельский, положив в основу геометрический и кинематический принципы, предложил известные методы определения коэффициента трения разделить на четыре группы, которые в виде схем показаны на рисунке 3.5.5.

Первая группа - методы, в которых одна плоскость поступательно перемещается относительно другой плоскости (рис. 3.5.5а, б, в). По схеме а продукт перемещается по движущейся исследуемой поверхности, при этом сила трения измеряется динамометром любого типа. Таким наиболее распространенным методом определяют трение твердообразных материалов: мяса, рыбы, хлеба и т.п.

По схеме б продукт перемещается с помощью груза по исследуемой неподвижной поверхности. Сила трения в этом случае равна минимальной массе груза, необходимой для равномерного перемещения продукта. Этим методом определяют коэффициент трения таких продуктов, как сыр, рыба, кондитерские изделия и др. По схеме в продукт скользит по наклонной поверхности. Коэффициент трения

определяется по минимальному углу наклона  $\alpha$  поверхности испытуемого конструкционного материала, по которому скользит пищевой продукт. Такой метод позволяет определить статический коэффициент трения для сыра, сухарей, сыпучих продуктов. Метод считается недостаточно точным и широкого применения не получил.



**Рис. 3.5.5. Методы измерения силы трения скольжения:**

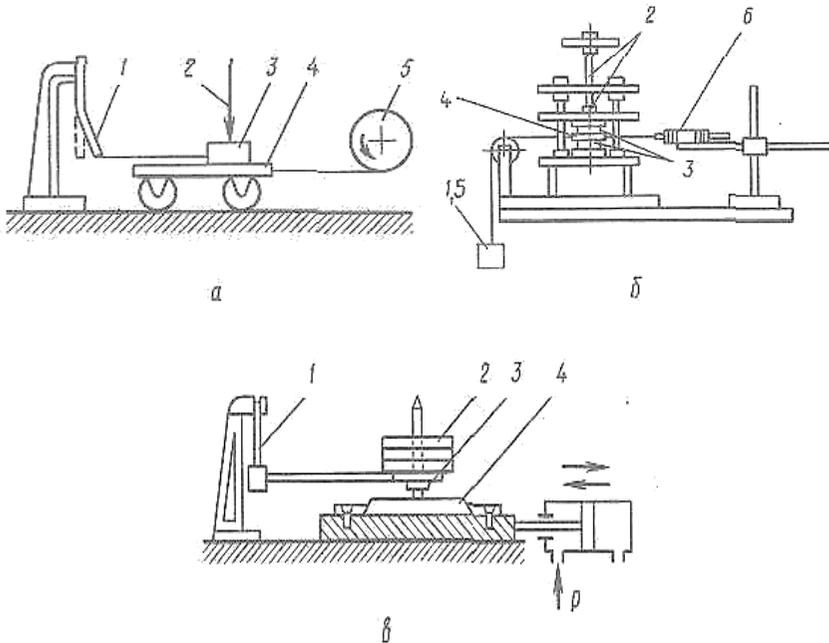
- а), б), в) при поступательном перемещении плоскостей;
- г), д) при вращательном движении одной из фрикционных пар;
- е) при соприкосновении образующей цилиндра с плоскостью;
- ж) при перемещении цилиндрической или плоской гибкой поверхности по цилиндрической поверхности

Вторая группа - методы, при которых одна из фрикционных пар совершает вращательное движение. По схеме г продукт, закрепленный на упругой балочке, скользит по вращающейся поверхности из исследуемого материала. Этим методом определяют коэффициент трения мяса, рыбы и т.п. По схеме д продукт лежит на вращающемся диске, исследуемый конструкционный материал скользит по вращающемуся продукту. Сила трения определяется по крутящему моменту, передаваемому от диска образцу.

Третья группа - методы, в которых образующая цилиндра соприкасается с плоскостью. По схеме е балка совершает колебательные движения на двух вращающихся навстречу друг другу роликах.

Четвертая группа - методы, в которых одна цилиндрическая или плоская гибкая поверхность перемещается по цилиндрической поверхности (рис 3.5.5 ж).

Трибометр с тележкой (рис. 3.5.6 а). Прибор позволяет определить силу трения и вычислить истинный и эффективный коэффициенты внешнего трения. Он состоит из устройства (1) для измерения силы трения (тензобалка), устройства (2) для создания давления контакта, рамки с исследуемым продуктом (3), тележки с закрепленной на ней пластиной (4) и электропривода (5) со шкивом.



**Рис. 3.5.6. Трибометры:**

а) трибометр с тележкой; б) трибометр с параллельным смещением пластин; в) трибометр с приводной подвижной частью от гидроцилиндров

Во время испытаний исследуемый продукт помещают в рамку, устанавливают на плоскую поверхность пластины тележки и включают электродвигатель. Нить, наматываясь на шкив, начинает перемещать тележку, и вместе с ней продукт, заключенный в рамку, от которой через нить передается тензобалке, которая под действием усилия отгибается от своего первоначального положения. При дальнейшем перемещении тележки, усилия между рамкой с продуктом и тензобалкой увеличиваются и, достигнув критической величины,

начинается скольжение рамки с продуктом по поверхности пластины тележки. При этом прогиб тензобалки будет оставаться на том же уровне постоянным. Сила трения, возникающая между продуктом и пластиной, фиксируется отклонением тензобалки, величина которого с помощью тензодатчиков, прикрепленных к ней, передается на ленту осциллографа. Для изменения скорости тележки имеется четырехступенчатый шкив, на который наматывается нить. Прибор позволяет менять геометрические (размер площади поверхности контакта, чистоту обработки поверхности и др.), кинематические (скорость смещения тележки, время предварительного контакта и пр.) и динамические (давление предварительного контакта, скорость нарастания силы и пр.) факторы. Прибор снабжен комплектом сменных пластин, изготовленных из разного материала.

Трибометр с параллельным смещением пластин (рис. 3.5.6 б). Прибор предназначен для определения адгезионных характеристик твердых продуктов, например сыра. Он состоит из грузового устройства (1) для измерения силы трения, устройства (2) для создания давления контакта, пластины (4), снизу и сверху которой расположен слой исследуемого продукта (3), грузового привода (5) и устройства для измерения перемещения в виде индикатора часового типа (6). Привод пластины осуществляется от груза с подпрессовкой образцов винтовым механизмом. Смещение пластины измеряется индикатором часового типа. Прибор может быть использован для измерения как внешнего трения, так и вязкости при малых градиентах скорости.

Трибометр с приводом подвижной части от гидропривода (рис. 3.5.6 в). Прибор предназначен для определения силы трения при малой площади контакта и больших нормальных усилиях. Он состоит из тензобалки (1), устройства (2) для создания предварительного контакта, пластины (4) и гидропривода. При измерении больших усилий трения система гидропривода имеет преимущество по сравнению с электроприводом, кроме того, гидропривод обеспечивает бесступенчатое регулирование скорости.

В настоящее время для достаточно многих мясных продуктов природа адгезии не выяснена, хотя этому вопросу посвящено большое количество исследований и предложено несколько гипотез для объяснения физико-механической сущности адгезионных явлений.

## ГЛАВА 4

### СВЯЗЬ СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И ОРГАНОЛЕПТИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ГОТОВОЙ ПРОДУКЦИИ

Оценка качества продуктов пищевых производств может осуществляться двумя способами. Первый способ – приборное измерение структурно-механических характеристик, выражаемых в определенных физических единицах. Второй способ – сенсорная (органолептическая) оценка качества, то есть субъективная чувственная оценка сопротивляемости, деформации и консистенции продукта. Развитие реологии позволило обосновать показатели качества продуктов и разработать некоторые математические принципы построения обобщенных показателей качества. Шерманом предложена классификация структурных характеристик продуктов, которая может быть использована для установления соотношения реологических характеристик продукта с органолептической оценкой (консистенцией). Характеристики разделены на три класса:

– *первичные*, связанные с аналитическими и геометрическими свойствами (содержание воздуха, влаги, жира и других компонентов;

размер и форма частиц);

– *вторичные*, связанные с основными реологическими свойствами (упругость, вязкость, адгезия);

– *третичные*, связанные с механическими процессами измельчения и жевания продукта.

*Третичные* характеристики имеют термины, наиболее часто применяемые потребителями при оценке различных пищевых продуктов. Различают следующие разновидности третичных характеристик: для твердых продуктов – рассыпчатые, хрупкие, порошкообразные, влажные, липкие, сухие, мягкие, твердые, пористые, нежные, грубые (шоколад, печенье, овощи, фрукты, мясо, сыр, хлеб, масло); для полутвердых продуктов – тестообразные, крошащиеся, прилипающие, влажные, сухие, комковые, нежные (плавленый сыр, пасты, фарш, сливки, джем); для жидких продуктов – жидкие, водянистые,

густые, жирные, липкие (растаявшее мороженое, майонез, соусы, супы).

Установлено, что сенсорная оценка вязкости продукта может быть дана при напряжении сдвига, развиваемом при скорости сдвига до  $\dot{\gamma} 50 \text{ с}^{-1}$ . Зависимость сенсорной оценки продуктов  $\psi$  (установленной вязкости) от напряжения сдвига (возбудителя)  $\tau$  при  $\dot{\gamma} = 50 \text{ с}^{-1}$  имеет вид

$$\psi = K_S \times \tau^{n_B}, \quad (4.1)$$

где  $K_S, n_B$  – эмпирические коэффициенты.

В зависимости от вида продукта  $n_B$  находится в пределах от  $0,5 \div 2,0$ . Например, по данным Вуда для супов-пюре  $n_B = 1,28$ . Таким образом, по вискозиметрическим данным при определенной скорости сдвига можно прогнозировать адекватную реакцию человека при сенсорной оценке вязкости. Однако выводы, основанные на изучении только соотношений приборной и сенсорной оценок, не могут быть просто механически использованы для широких обобщений о качестве продукта. При этом должны быть учтены значения коэффициентов корреляции; характеристики, измеряемые данным прибором, и условия опытов; однородность образцов продуктов, подвергнутых дегустации; методы расшифровки сенсорных оценок. Таким образом, для оценки качества каждого продукта необходимо проведение серии реологических измерений с параллельным дегустированием специалистами для выявления практических диапазонов связи измеряемых реологических характеристик с консистенцией продукта.

## ГЛАВА 5

### КОНТРОЛЬ ПРОЦЕССОВ И КАЧЕСТВА ПРОДУКТОВ ПО СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКИМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ

#### 5.1 Актуальность проведения контроля за технологическими процессами и качеством продукции

С каждым годом расширяется ассортимент и увеличиваются объемы выпускаемой продукции предприятиями мясной промышленности. Технологические процессы производства продуктов связаны с большим количеством выполнения различных технологических операций, процессов и применением большого количества различного технологического оборудования. При этом готовая продукция должна обязательно отвечать требованиям нормативно-технической документации, как-то ГОСТам, технологическим инструкциям (ТИ) или технологическим условиям (ТУ), в которых указываются показатели готовой продукции, которые в целом (совокупности) определяют само качество готовой продукции.

При этом вопрос о контроле технологических процессов и качества продукции стоит не просто как о каком-либо контроле, который выполняют рабочий, мастер, технолог, а о контроле объективном, проводимом с помощью приборной измерительной техники.

Сегодня на большинстве предприятий мясной промышленности, а также в других отраслях пищевой промышленности при оценке такого показателя качества, как консистенция продукта, проводится только органолептически, то есть путем надавливания, потирания, покусывания, разжевывания продукта и т. д. Органолептическая оценка консистенции продукта является субъективной оценкой и целиком зависит от чувственных личных восприятий дегустатора, эксперта. Она является только общей внешней оценкой и в случае получения «брака» не указывает на причины его возникновения.

Аналогичным образом проводится контролирование структуры сырья и при выполнении отдельных технологических операций, например, измельчение сырья на волчке (не учитывается нагрев сырья во время его прохождения через решетки и ножи, что может

резко снизить пищевую ценность продукта, а также влагосвязывающую способность) или куттере, приготовление фарша на куттере (готовность фарша определяет рабочий путем размазывания, растирания на ладони, сжатия в комочек и т.д.) или в фаршемешалке, шприцевание фарша в оболочку, добавление активных различных добавок, тепловая обработка и т. д.

Обеспечить выпуск качественной продукции возможно лишь при постоянном контроле выполнения технологических процессов и качества сырья, полуфабрикатов и готовой продукции на всех стадиях технологической обработки, используя различные методы контроля. В этой связи сегодня, как никогда ранее, вопрос о проведении контроля над технологическими процессами и качеством выпускаемой продукции является актуальным и особо значимым.

## **5.2 Автоматизированный контроль качества продуктов**

В МТИММПе (МАПБ) для полной автоматизации процесса измельчения и перемешивания разработано специальное устройство (В. Д. Косой, Ю. А. Ивашкин, Ю.В. Самусенко и др.), снабженное (рис. 5.2.1) блоком управления дозаторами. Устройство содержит пусковое реле, реле времени, магнитный пускатель и сигнальные лампы (рис. 5.2.1 в). Преобразователь сил сцепления снабжен контактным механизмом, представляющим собой две сменные диэлектрические пластины с установленными на корпусе электрическими контактами подачи компонентов и замыкатель этих контактов, расположенный на раме преобразователя. При этом контактный механизм электрической цепью связан с пусковым реле блока управления дозаторами.

Преобразователь сил сцепления с продуктом (рис. 5.2.1 а) содержит неподвижно закрепленную раму и подвижно установленный относительно этой рамы корпус с рифленной поверхностью, соприкасающейся с продуктом. Контактный механизм преобразователя содержит две сменные диэлектрические пластины (регулирующую и контактирующую), жестко закрепленные на корпусе, и замыкатель контактов. Регулирующая диэлектрическая пластина состоит из контакта подачи компонента, повышающего структурно-механические характеристики продуктов, например белка, контакта оптимального

предельного напряжения сдвига (ПНС), контакта подачи компонента, уменьшающего структурно-механические характеристики продуктов, например воды.

Контролирующая пластина имеет контакт степени измельчения. Контакты закреплены на сменной диэлектрической пластине и подключены к блоку управления дозатора. Кнопка «Пуск» КП и кнопка «Стоп» КС предназначены для пуска и остановки измельчителя при настройке и регулировке.

Устройство работает следующим образом. Реле времени настраивается так, чтобы определять структурно-механические характеристики недоизмельченного продукта через оптимальное время (например,  $\tau = 4$  мин). Нажатием кнопки «Пуск» КПА включается магнитный пускатель, производящий пуск двигателя измельчителя, и реле времени. Измельчаемый фарш взаимодействует с подвижным корпусом преобразователя, который перемещается вместе с регулирующей и контактирующей пластинами относительно замыкателя контактов. В зависимости от сил взаимодействия измельчаемого фарша и подвижного корпуса последний, перемещаясь вместе с контактами пластин, будет замыкать клеммы регулирующей или контактирующей пластины. Замыкание контактов обеих пластин происходит через время  $\tau_1$  или  $\tau_1 + \tau_2$ , заданное с помощью реле времени, при условии, что ПНС обрабатываемого продукта соответствует показателю эталонной кривой (см. рис. 5.2.1б). Замыкание контактов подачи компонентов означает, что ПНС обрабатываемого продукта находится соответственно ниже (точка *в*) или выше (точка *г*) оптимального значения и для выведения ПНС на эталонную кривую требуется вводить компонент, соответственно повышающий (например, белок) или уменьшающий (например, вода) структурно-механические характеристики. Таким образом, контактный механизм - это программа, по которой обрабатывают пищевой продукт.

Ниже приведены возможные случаи замыкания контактов.

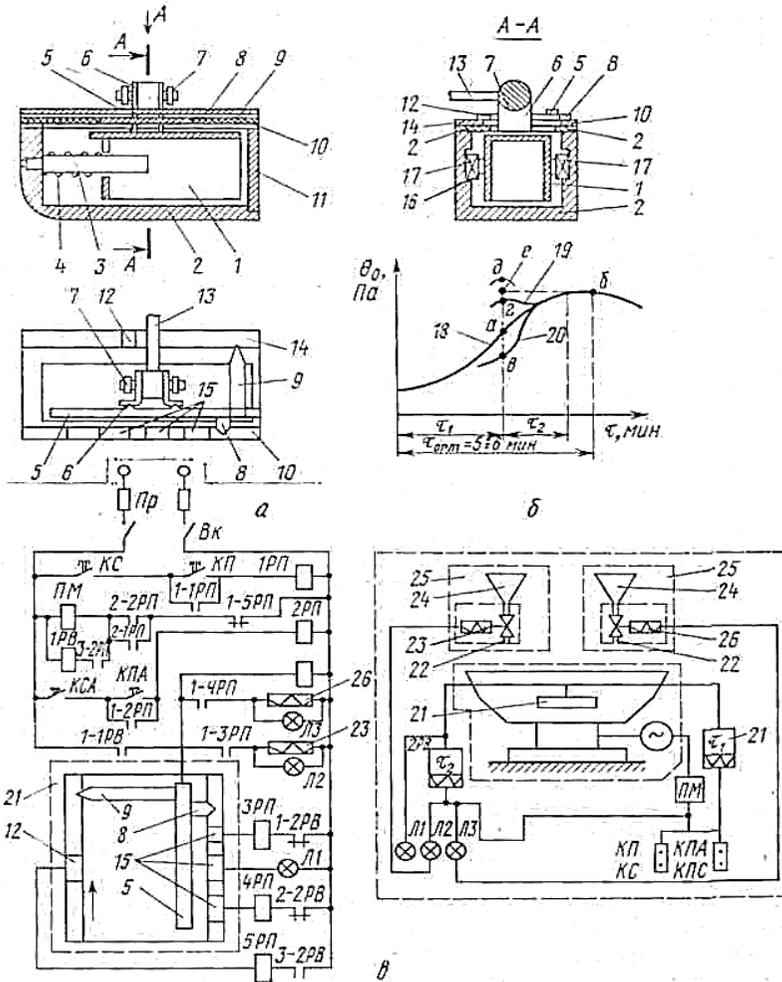
1. ПНС находится ниже эталонной кривой. Данный случай соответствует положению между точками *в* и *а* (рис. 5.2.1 б). По истечении времени  $\tau_1$  с момента включения реле времени включается преобразователь сил сцепления с продуктом. Если ПНС находится в пределах между точками *в* и *а*, то контакт подачи компонента, повы-

шающего структурно-механические характеристики продуктов, замыкается, включая пусковое реле, открывает электромагнитный клапан и включает сигнальную лампу, информирующую о происходящей операции. Компонент, например белок, из бункера поступает в чашу измельчителя. При добавлении компонента, повышающего структурно-механические характеристики продукта, значение ПНС приближается к значению эталонной кривой. Контакт при этом замыкается, и подача компонента прекращается.

2. ПНС находится на эталонной кривой. Данное положение соответствует оптимальному ПНС (рис. 5.2.1 *а*). Контакт оптимального ПНС замыкается, включая другую сигнальную лампу.

3. ПНС находится выше эталонной кривой, что соответствует положению между точками *д* и *а*, например точка *г* (рис. 5.2.1 *б*). Контакт подачи компонента, уменьшающего структурно-механические характеристики продуктов, например вода, замыкается, включая пусковое реле, которое включает электромагнитный клапан и соответствующую сигнальную лампу, информирующую о происходящей операции. Компонент, например вода, из бака подается в чашу измельчителя, уменьшая ПНС обрабатываемого продукта и приближая его значения к эталонному. Контакт при этом размыкается. Подача компонента, уменьшающего структурно-механические характеристики продуктов, прекращается.

Оптимальная степень измельчения продуктов соответствует экстремуму (рис. 5.2.1 *б*) - точка *б*. Реле времени включает второе реле времени. Последнее настраивается на время  $\tau_2$  с таким расчетом, чтобы сумма  $\tau_1 + \tau_2$  не превышала минимальное оптимальное время измельчения - 5 мин, например  $\tau_2 = 50$  с, тогда  $\tau_1 + \tau_2 = 4$  мин 50 с < 5 мин. При достижении продуктом оптимальной степени измельчения контакт оптимальной степени измельчения замыкается и отключает магнитный пускатель, останавливая электродвигатель измельчителя. Второе реле времени вводится в цепь управления с целью исключения возможности подачи компонента воды, уменьшающего структурно-механические характеристики продуктов в момент определения оптимальной степени измельчения продуктов.



**Рис. 5.2.1. Устройство для автоматического контроля процесса измельчения мясopодуктов по их структурно-механическим характеристикам:**

*а* - преобразователь сил сцепления; *б* - график изменения свойств при измельчении; *в* - принципиальная электрическая схема; 1 - неподвижная рама; 2 - корпус с рифленным дном; 3 - палец; 4 - пружина; 5 - планка замыкателя; 6 - кронштейн; 7 - шарнир; 8, 9 - замыкатели контактов соответственно регулирующей и контролирующей пластин; 10 - регулирующая пластина; 11 - крышка корпуса; 12 - контакт контролирующей пластины; 13 - рычаг; 14 - контролирующая пластина; 15 - контакты регулирующей пластины; 16 - направляющие; 17 - подшипники; 18, 19, 20 - кривые соответственно с эталонными, завышенными или заниженными свойствами; 21 - преобразователь; 22 - трубопроводы дозаторов; 23, 26 - электромагнитные клапаны дозаторов компонентов для повышения и понижения структурно-механических свойств фарша; 24 - бункер дозатора; 25 - дозаторы

Экстремальное ПНС (точка  $b$ ) находится в зоне между точками  $d$  и  $a$  (например, точка  $e$ ) (см. 3-й случай). Нормально замкнутый контакт 2-2РВ реле времени 2РВ отключает пусковое реле 4РП через время  $\tau_1 + \tau_2$ , блокируя электромагнитный клапан. Аналогичным образом нормально замкнутый контакт 1-2РВ реле времени 2РВ отключением пускового реле 3РП блокирует электромагнитный клапан дозатора, исключая подачу компонента (белка), повышающего структурно-механические характеристики через время  $\tau_1 + \tau_2$ . Кроме того, нормально разомкнутый контакт 3-2РВ реле времени 2РВ замыкается только в момент определения оптимальной степени измельчения через время  $\tau_1 + \tau_2$ .

В случае изменения ассортимента обрабатываемого продукта осуществляют замену диэлектрических пластин, которые соответствуют новой эталонной кривой. Таким образом, рассмотренное устройство позволяет автоматически контролировать процесс измельчения по заданной программе.

### **5.3 Оптимизация технологических процессов на основе реологии**

Качество готовых продуктов зависит от качества выполнения технологических операций и состава сырья. Под качеством выполнения технологических процессов понимается выполнение отдельных технологических способов обработки сырья при оптимальных режимных параметрах.

На качество готовой продукции существенное влияние оказывают режимные параметры технологической и машинной обработки сырья на стадиях производства. Определение оптимальных режимных параметров возможно путем использования универсальных реологических приборов при выполнении технологических операций.

Применение универсальных приборов для определения оптимальных режимов обработки рассмотрим на примере приготовления фарша, как одного из основных технологических процессов механической обработки - процессе измельчения мяса. Степень обработки фарша определяет глубину его технологической обработки и влияет на форму связей влаги, изменяя структурно-механические свойства.

В.Д. Косой и другие определили возможность применения приборов для определения оптимальных режимов куттерования. В качестве объекта изучения был выбран фарш для русских сосисок с

использованием 50 % говядины первого сорта и 50 % жирной свинины с добавлением определенного количества воды и льда. Приготовление фарша проводили на куттере емкостью чаши 50 л. В процессе измельчения отбирали пробы фарша для определения реологических характеристик. Из каждой пробы с заданной продолжительностью измельчения по существующей технологии готовили сосиски, устанавливали потери массы в процессе термообработки, охлаждения и хранения с целью расчета выхода. Комплекс структурно-механических характеристик фарша и готовых колбасных изделий определяли соответственно на универсальных приборах: ротационном вискозиметре и ПМ-3 (конструкции А.С. Большакова) при различной продолжительности измельчения. Результаты исследований графически представлены на рисунке 5.3.1.

Из рисунка 5.3.1 видно, что при куттеровании фарша в подготовительном (начальном) периоде до  $\tau = 5$  мин (начало формирования структуры фарша), когда частицы имеют размер немного меньше начального, добавленная влага образует толстые прослойки, облегчающие деформацию: величины предельного напряжения сдвига ( $\theta_0$ , Па) и темпа ( $m$ ) разрушения структуры (кривые 3, 4) уменьшаются, потери массы при термообработке этих проб фарша велики, готовый продукт получается сухим, жестким. При разрушении образца в рабочем органе прибора работа смятия ( $A_{см}$ , Дж/м<sup>2</sup>) и среза ( $A_{ср}$ , Дж/м<sup>2</sup>) возрастет (кривые 6, 7). При дальнейшем увеличении продолжительности куттерования (первый период) частицы интенсивно измельчаются, их общая поверхность увеличивается, влага из свободной переходит в поверхностно-связанную. В этот период фарш упрочняется, величины предельного напряжения сдвига и темпа разрушения структуры возрастают и достигают максимального значения, пластическая ( $\eta$ , Па·с) и эффективная ( $B$ , Па·с) вязкость при скорости 1м/с (кривые 1,2), а также потери массы при термообработке снижаются до минимальных значений. Образование первичной структуры фарша заканчивается при  $\tau = 14$  мин, при этом предельное напряжение среза готового продукта ( $\sigma$ , Па) достигает наибольшего значения (кривая 5), что характеризует увеличение количества связанной влаги, а работа смятия и среза (кривые 6, 7) - минимального значения. Во второй период куттерования (перекуттерования) по прошествии 14 мин происходит некоторое «размолачивание» мышечных волокон мяса, температура продукта продолжает повышаться, увеличивается число мельчайших частиц, происходит

аэрирование массы и эмульгирование жира, что ведет к вторичному структурообразованию. В этот период куттерования предельное напряжение сдвига и темп разрушения структуры снижаются, а пластическая и эффективная вязкости увеличиваются. При этом предельное напряжение среза готового продукта и сдвига фарша убывают, что свидетельствует об уменьшении количества связанной влаги. Продукт, изготовленный из перекуттерованного фарша, становится жестким и сухим, вследствие чего работы смятия и среза возрастают.

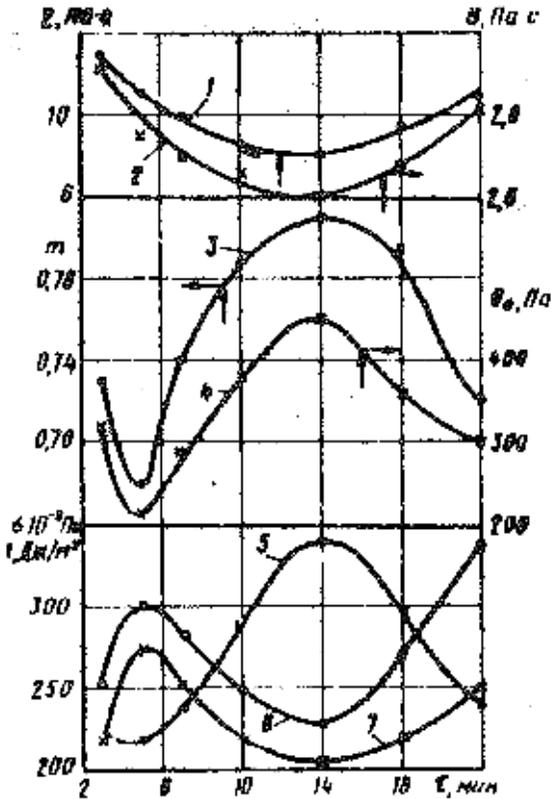


Рис. 5.3.1. Зависимость структурно-механических свойств колбасного фарша и готовых колбасных изделий из него от продолжительности измельчения: 1 - пластическая вязкость; 2 - эффективная вязкость; 3 - темп разрушения структуры; 4 - предельное напряжение сдвига; 5 - предельное напряжение среза; 6, 7 - соответственно работа смятия и среза

Из рисунка 5.3.1 видно, что экстремальные значения структурно-механических характеристик фарша и готовых изделий соответствуют одному и тому же значению продолжительности измельчения - 14 мин. Такая продолжительность куттерования является оптимальной. Несмотря на то, что структура фарша при нагревании из коагуляционной переходит в конденсационно-кристаллизационную, прочность ее, как видно из экспериментальных данных, обусловлена прочностью сырого фарша и способностью денатурированных белков удерживать воду (чем больше в продукте слабосвязанной влаги, тем более рыхлым оказывается готовый продукт).

Поскольку цель куттерования - получение фарша с прочной структурой и наибольшей водосвязывающей способностью, основной характеристикой из всего комплекса сдвиговых свойств является предельное напряжение сдвига, а не пластическая или эффективная вязкость. Предельное напряжение среза характеризует прочность структуры готового продукта, которая зависит от качества измельчения мышечной, соединительной и жировой тканей, а также влагосодержания продукта. Предельное напряжение среза легко определять по диаграмме, и оно может служить объективной характеристикой качества готового продукта в производственных условиях. Работа смятия характеризует деформируемость и упругость продукта, по ней можно судить об интенсивности отделения влаги из продукта при сжатии. Работа среза позволяет судить о количестве слабосвязанной влаги в готовом продукте, качестве измельчения мяса и соединительной ткани.

Используя установленную взаимосвязь механических характеристик готовых колбасных изделий с продолжительностью измельчения, влагосодержанием сырого фарша и его структурно-механическими свойствами, можно изменять свойства фарша в соответствии с требованиями, предъявляемыми к готовым изделиям. В конечном счете, изменяя структурно-механические свойства фарша на основе объективных критериев их оценки, можно добиться получения продукта заданного качества.

Таким образом, универсальные приборы позволяют получить комплекс реологических характеристик, необходимых не только для создания научно обоснованных методик расчета машин и аппаратов с учетом особенностей обрабатываемого продукта, но и для определения и теоретического обоснования рациональных и оптимальных режимов технологической обработки, например, колбасных изделий.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Инженерная реология жиросодержащих пищевых продуктов [Текст]/ В.А. Арет, Г.П. Забровский, Б.Л. Николаев, Л.К. Николаев.- Санкт-Петербург, 2002.- 294 с.
2. Пирогов, А.Н. Инженерная реология. Учебное пособие [Текст]/ А.Н. Пирогов, Д.В. Доня. - Кемерово, 2004. – 110 с.
3. Косой, В. Д. Реология молочных продуктов. Полный курс [Текст]/ В. Д. Косой, Н. И. Дунченко, М. Ю. Меркулов.– М., 2010. - 828 с.
4. Крусь, Г.Н., Методы исследования молока и молочных продуктов[Текст] / Г.Н. Крусь, А.М. Шалыгина, З.В. Волокитина. – М.: Колос, 2000. – 368 с.
5. Присухина, Н.В. Реология пищевого сырья, продуктов, полуфабрикатов. Учебное пособие [Текст]/ Н.В. Присухина. - Красноярск: КрасГАУ, 2013. - 140 с.
6. Рогов, И.В. Физические методы обработки пищевых продуктов [Текст]/ И.В. Рогов.- М. -Пищевая промышленность 2004.-584с.
7. Инженерная реология [Текст]: методические указания к лабораторно-практической работе [Текст]/ / сост. Р.Ф. Сагитов – Оренбург:ГОУ ОГУ, 2005. – 11 с.
8. Тишин, В.Б. Гидравлика. Однофазные и двухфазные потоки в пищевой инженерии: учебное пособие [Текст]/ В.Б.Тишин, А.Г.Сабуров.–СПб.: СПбГУНТИПТ, 2001. – 215с.
9. Хавров, Я.В. Метод оценки консистенции сырной массы на различных стадиях производства и по завершению периода созревания [Текст]/ Я.В. Хавров.- Ползуновский альманах. - 2005.- №1.- С.120-122.
10. Шалыгина, А.М. Структурно-механические характеристики пищевых продуктов [Текст] / А.М. Шалыгина.- М.: Колос, 2002.-201с.
- 11.Реометрия пищевого сырья и продуктов: Справочник [Текст] / Под ред. Ю.А. Мачихина.- М.:Агропромиздат,1990.-271с.

12. Косой, В.Д. Инженерная реология биотехнологических сред: учеб. пособ. [Текст]/ В.Д.Косой, Я.И.Виноградов, А.Д.Малышев.- СПб.: ГИОРД, 2005.

13.Сажин, С.Г. Приборы контроля состава и качества технологических сред [Электронный ресурс]: учебное пособие [Текст]/ С.Г. Сажин. – 1-е изд., изд-во «Лань», 2012. – 432 с. / [www.e.lanbook.com](http://www.e.lanbook.com).

14. Вольфсон, С.И. Реология и молекулярные характеристики эластомерных композиций [Электронный ресурс] : монография; / С.И. Вольфсон. – Казань: КНИТУ, 2009. – 112 с. / [www.e.lanbook.com](http://www.e.lanbook.com).

15.Косой, В.Д. Контроль качества молочных продуктов методами физико-химической механики[Текст] /В.Д.Косой, М.Ю.Меркулов, С.Б.Юдина.- СПб.: ГИОРД, 2005.

**ГРЕЧЕСКИЙ АЛФАВИТ**

<b>Буква</b>	<b>Название</b>	<b>Произношение</b>
Α, α	альфа	а
Β, β	бета	б
Γ, γ	гамма	глухая, шипящая Γ, типа украинской в слове «горилка»
Δ, δ	дэльта	д
Ε, ε	эпсилон	э
Ζ, ζ	дзета	з
Η, η	эта	и
Θ, θ	тэта	как в англ. th
Ι, ι	йота	и/й
Κ, κ	каппа	к
Λ, λ	ламбда	л
Μ, μ	мю	м
Ν, ν	ню	н
Ξ, ξ	кси	кс
Ο, ο	омикрон	о
Π, π	пи	п
Ρ, ρ	ро	р
Σ, σ, ς	сигма	с
Τ, τ	тау	т
Υ, υ	ипсилон	и/й/в/ф
Φ, φ	фи	ф
Χ, χ	хи	х
Ψ, ψ	пси	пс
Ω, ω	омега	о

*Учебное издание*

*Закипная Елена Витальевна,  
Зарицкая Виктория Викторовна*

РЕОЛОГИЯ

*Учебное пособие*

Лицензия ЛР 020427 от 25.04.1997 г.

Подписано к печати 28.01.2016 г. Формат 60×90/16.

Уч.-изд.л. – 5,0. Усл.-п.л. – 6,8.

Тираж 300 экз. Заказ 14.

---

Отпечатано в отделе оперативной полиграфии  
издательства Дальневосточного ГАУ  
675005, г. Благовещенск, ул. Политехническая, 86





