

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
Государственное образовательное учреждение высшего  
профессионального образования  
«Оренбургский государственный университет»

**О.А. КУЗНЕЦОВ**  
**Е.В. ВОЛОШИН**  
**Р.Ф. САГИТОВ**

## **РЕОЛОГИЯ ПИЩЕВЫХ МАСС**

Рекомендовано Ученым советом Оренбургского государственного университета в качестве учебного пособия для студентов, обучающихся по программам высшего профессионального образования по специальности «Технология хлеба, мучных кондитерских и макаронных изделий»

Оренбург 2005

УДК 664 (03)  
ББК 36 я 7  
К 89

Рецензент  
кандидат технических наук, доцент С.В. Антимонов

К 89      **Кузнецов О.А., Волошин Е.В., Сагитов Р.Ф.**  
**Реология пищевых масс: Учебное пособие. – Оренбург: ГОУ**  
**ОГУ, 2005. - 106 с.**

**ISBN**

Учебное пособие предназначено для студентов специальности 270300 «Технология хлеба, мучных кондитерских и макаронных изделий» по курсу «Реология пищевых масс».

К 4001010000

ББК 36 я 7

ISBN

© Кузнецов О.А.  
Волошин Е.В., 2005  
© ГОУ ОГУ, 2005

## Введение

Многие технологические процессы пищевой промышленности связаны с механическим воздействием на продукт, находящийся в вязкопластичном состоянии. В хлебопекарном производстве - это замес теста, тестоделение, формование тестовых заготовок. При производстве кондитерских изделий к таким процессам относятся смешивание, пластикация массы и формование отливкой, выпрессовыванием, резкой и т.д. Большое значение имеет также межоперационное транспортирование полуфабриката по трубам и на различных, конвейерах.

Во всех перечисленных случаях выбор технологического оборудования, определение режима его работы обуславливается физико-механическими и, в первую очередь реологическими свойствами перерабатываемых или транспортируемых пищевых масс, полуфабрикатов и готовых изделий. При создании совершенных технологических процессов, позволяющих получить готовый продукт высокого качества, необходимо практически в каждом конкретном случае изучать целый комплекс физико-механических свойств. Эти свойства характеризуют поведение пищевых масс под действием механических нагрузок со стороны рабочих органов машин.

Большое значение в пищевой промышленности имеет объективная оценка качества пищевых продуктов и полуфабрикатов. В связи с этим создание и применение методов и приборов для объективного контроля качества, обеспечивает не только замену органолептического контроля, но и создает предпосылки для разработки автоматических систем управления технологическими процессами пищевых производств.

В настоящее время в пищевой промышленности имеется довольно большой и разнообразный арсенал технических средств для определения и исследования физико-механических свойств пищевых материалов на различной стадии приготовления: от сырья до готового продукта. Для изучения этих свойств служат методы физико-химической механики пищевых продуктов.

# 1 Основные понятия и определения реологии

Реология – наука о деформации и течении различных тел. Слово "реология" происходит от греческого "ρεο", что означает "теку".

Деформацией называется относительное смещение частиц материального тела, при котором не нарушается непрерывность самого тела. Если под действием конечных сил деформация тела увеличивается во времени непрерывно и необратимо, то это означает, что материал течет. При деформации обычно происходит изменение формы или размеров данного тела. Однако есть случаи, в которых эти явления не обнаружены, например, при ламинарном потоке в зазоре ротационного вискозиметра.

Предметом реологии является исследование различных видов деформации в зависимости от сопровождающих их напряжений.

Макрореология или феноменологическая реология рассматривает все материалы в том виде, в каком они предстают перед наблюдателем при поверхностном осмотре невооруженным глазом, то есть как однородные и лишенные структуры. Однако феноменологически однородными являются только чистые жидкости и совершенные микрокристаллы. Большая часть материалов, исследуемых реологией, представляет собой дисперсные системы, состоящие из двух или более фаз.

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

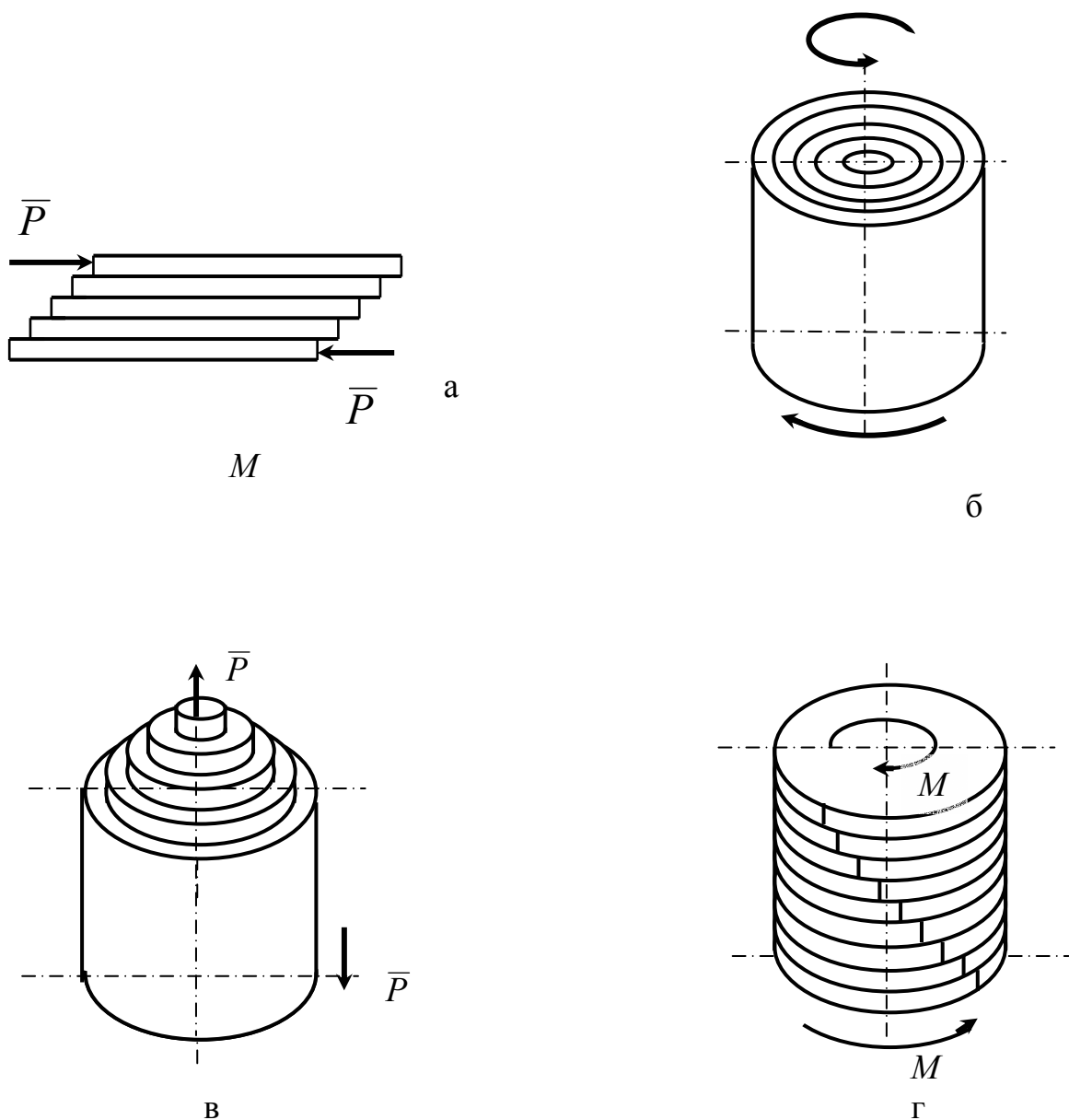
Сдвиг – это очень важный вид деформации в реологии. Простой сдвиг рассматривается как плоская деформация, параллельная неподвижной плоскости вследствие действия на гранях элементарного параллелепипеда касательных напряжений. Простой сдвиг представляет собой особый случай ламинарного потока, при котором тело можно считать состоящим из бесконечно-тонких слоев. Эти слои не деформируются, а только скользят один по другому. Виды ламинарного смещения представлены в соответствии с рисунком 1.

Напряжение является мерой интенсивности внутренних сил упругости. Величина и характер деформации зависят от свойств и материала тела, его формы и способа приложения внешних сил. Деформация сопровождается возникновением внутренних сил взаимодействия между частицами тела. Различают полное, нормальное и касательное напряжения. То есть полное напряжение раскладывают на нормальное и касательное напряжения.

Под гидростатическим давлением понимают такое напряженное состояние, при котором нормальные напряжения на гранях элемента равны между собой, а касательные отсутствуют, вследствие чего объем уменьшается (или увеличивается), но форма не изменяется. При этом модуль объемного сжатия  $E_V$  (расширения) равен отношению изменения гидростатического давления к соответствующему изменению объема.

Под напряжением сдвига в реологии понимают сопротивление тела действию касательной составляющей приложенной силы. Если при всестороннем

*М*



а – простой сдвиг; б – вращательное движение; в – поступательное (телескопическое) движение; г – кручение.

Рисунок 1 – Виды ламинарного смещения

равномерном давлении изменяется только объем тела, а форма остается неизменной, то при сдвиге изменяется форма тела при постоянном объеме.

Деформацию делят на два общих вида: обратимую (упругую), которая исчезает после прекращения действия силы, и необратимую (вязкую и пластическую) которая не исчезает после снятия нагрузки, при этой деформации часть механической энергии переходит в тепло.

В реологии различают мгновенную и запаздывающую упругую деформацию. Скорость распространения мгновенной упругой деформации чрезвычайно велика (принимается равной скорости звука в данной среде), поэтому время образования этой деформации без большой ошибки принимается равным

нулю. Мгновенная упругая деформация описывается законом Гука. Запаздывающая упругая деформация протекает во времени, причем скорость возрастания этой деформации при постоянном напряжении монотонно убывает. После снятия нагрузки эта деформация исчезает также с монотонно убывающей скоростью. Это явление называется упругим восстановлением.

Необратимая деформация – это вязкое и пластическое течение материала. При вязком течении деформация пропорциональна напряжению по закону Ньютона и после снятия нагрузки не восстанавливается. Пластическая деформация возникает при напряжении, превышающем некоторую предельную величину (предел текучести), до достижения которой материал ведет себя как упругий.

## 2 Физико-механические свойства материалов

К основным реологическим физико-механическим свойствам материалов относятся: упругость, пластичность, вязкость и прочность.

**Упругость** – это способность тела при деформации полностью восстанавливать свою первоначальную форму.

**Пластичность** – это способность тела под действием внешних сил необратимо деформироваться без нарушения сплошности.

**Вязкость** или внутренне трение – это мера сопротивления течению (смещению слоев).

**Прочность** – это способность тела воспринимать нагрузку без разрушения и образования остаточной деформации.

Большое внимание в реологии также уделяется и другим физико-механическим свойствам материалов.

**Твердость** – это комплексное свойство негуконских тел оказывать сопротивление проникновению другого тела вследствие необратимых (упругой и вязкой) деформаций. При неомогенном структурном строении тел микротвердость в различных точках неодинакова. Вследствие этого прямой зависимости между твердостью и прочностью не существует.

Твердость нельзя выразить как физическую величину с однозначной размерностью. Она является некоторым техническим параметром, который выражается в относительных величинах в зависимости от метода определения.

Твердость определяется следующими методами: нанесение царапин (шкала твердости по Мосу); внедрение в исследуемое тело более твердого тела, например шара (твердость по Бринелю), конуса (твердость по Роквеллу), пирамиды (твердость по Викерсу).

Коэффициент твердости рассчитывают по величине силы и геометрическим параметрам остаточной деформации (шарового сегмента глубине внедрения).

Между коэффициентами твердости, полученными с помощью различных методов, существуют определенные соотношения.

**Мягкость** – свойство, противоположное твердости.

**Хрупкость** – свойство твердых тел достигать разрушения без пластической деформации. Чисто гуконские тела обнаруживают хрупкое разрушение при любой скорости деформации. У негуконских тел хрупкое разрушение наступает только при высоких скоростях деформации или низких температурах, когда теряют действие вязкие свойства.

**Когезия** – сопротивление тела разрушению, связанному с преодолением сил взаимодействия между атомами и молекулами на поверхности раздела. Между работой когезии и работой хрупкого разрушения существует прямая зависимость.

**Адгезия** – свойство, которое основывается на взаимодействии двух различных тел на границе раздела фаз и вызывает сцепление тел. При разделении

тел необходимо преодолеть силы сцепления. Прочность соединения двух тел из различных материалов зависит от площади и состояния поверхности контакта между телами.

**Липкость** – свойство пограничного слоя вязких или пластичных материалов оказывать сопротивление разделению находящихся в контакте поверхностей. Оно основывается на адгезии материалов на поверхности раздела и когезии самого испытуемого материала. Если силы когезии больше чем силы адгезии, разделение происходит в результате преодоления сил адгезии, и наоборот. Если обе силы приблизительно равны, разделение происходит благодаря частичному преодолению сил когезии и адгезии.

**Внешнее трение** – сопротивление относительному перемещению двух находящихся в соприкосновении поверхностей твердого тела. Для начала скольжения необходимо приложить нагрузку, превышающую силы трения покоя.

У одного и того же материала в зависимости от его состояния и условий нагружения проявляются в разной степени те или иные реологические свойства. Например, макаронное тесто при мгновенном воздействии нагрузки ведет себя в основном как упругое тело. При других условиях нагружения больше проявляются вязкие и пластические свойства. Поэтому в первую очередь необходимо выяснять, какие свойства исследуемого материала при заданных условиях деформирования являются основными, определяющими.

Среди пищевых масс встречаются материалы, весьма разнообразные по своим реологическим свойствам. Известно много случаев, когда в процессе технологической обработки один и тот же продукт переходит из одного реологического состояния в другое, часто противоположное по свойствам первому. Например, шоколад при отливке в форму с последующим охлаждением переходит из вязкого (текучего) в твердое (хрупкое) состояние, такая же картина и при производстве конфет.



### 3 Консистенция и текстура пищевых продуктов

При сенсорной или инструментальной оценке качества пищевых продуктов часто определяют их консистенцию и текстуру.

Консистенция – степень плотности, твердости продукта. В зависимости от консистенции продукты по-разному деформируются при избранных видах нагрузки и скорости. Воспроизводимость характерных показателей, полученных при измерении консистенции, гарантирована только в том случае, если все условия измерения постоянны, особенно форма образца и его размеры, вид нагружения и его скорость. Результаты измерений обычно даются в относительных единицах, характерных для применяемого прибора. Обобщение результатов на другие условия измерения невозможно, так как консистенция отражает реологическое свойство в форме, трудно поддающейся математической обработке. При реометрическом анализе деформационные свойства материала, связанные с консистенцией, можно достаточно полно описать реологическими характеристиками или уравнениями состояния.

Сенсорная оценка консистенции, которую можно характеризовать как эмпирическую характеристику деформационного поведения материала, была известна до широкого применения реологического анализа и используется до настоящего времени. Причиной этого является простота и высокая скорость измерений, невысокие требования к приборам и процедурам обработки данных. Показатели в достаточной мере отражают анализируемые реологические свойства, обеспечивают быстрый контроль пищевых продуктов относительно соответствия или отклонения того или иного параметра от номинального значения. Пищевые продукты и сырье, являющиеся биологически активными материалами, представляют собой неустойчивые дисперсные системы, часто подвергающиеся быстрым изменениям, влияющим на реологические свойства, поэтому оценка консистенции в некоторых случаях может быть единственным методом реологического анализа.

Пищевые продукты, помимо консистенции, обладают текстурой.

Текстура - физико-структурные свойства вещества, в частности продукта, воспринимаемые органами слуха, зрения и осязания и вызывающие у человека определенные ощущения при потреблении (откусывании, разжевывании, проглатывании). Комплекс ощущений при потреблении пищи, который называется органолептическим, приводит потребителя к предпочтению или отказу от пищевых продуктов. Для создания высококачественных пищевых продуктов необходимо целенаправленно воздействовать на их органолептические свойства.

Консистенция и вязкость относятся к текстуре и представляют собой два из множества возможных ее отличительных признаков (рисунок 2).

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

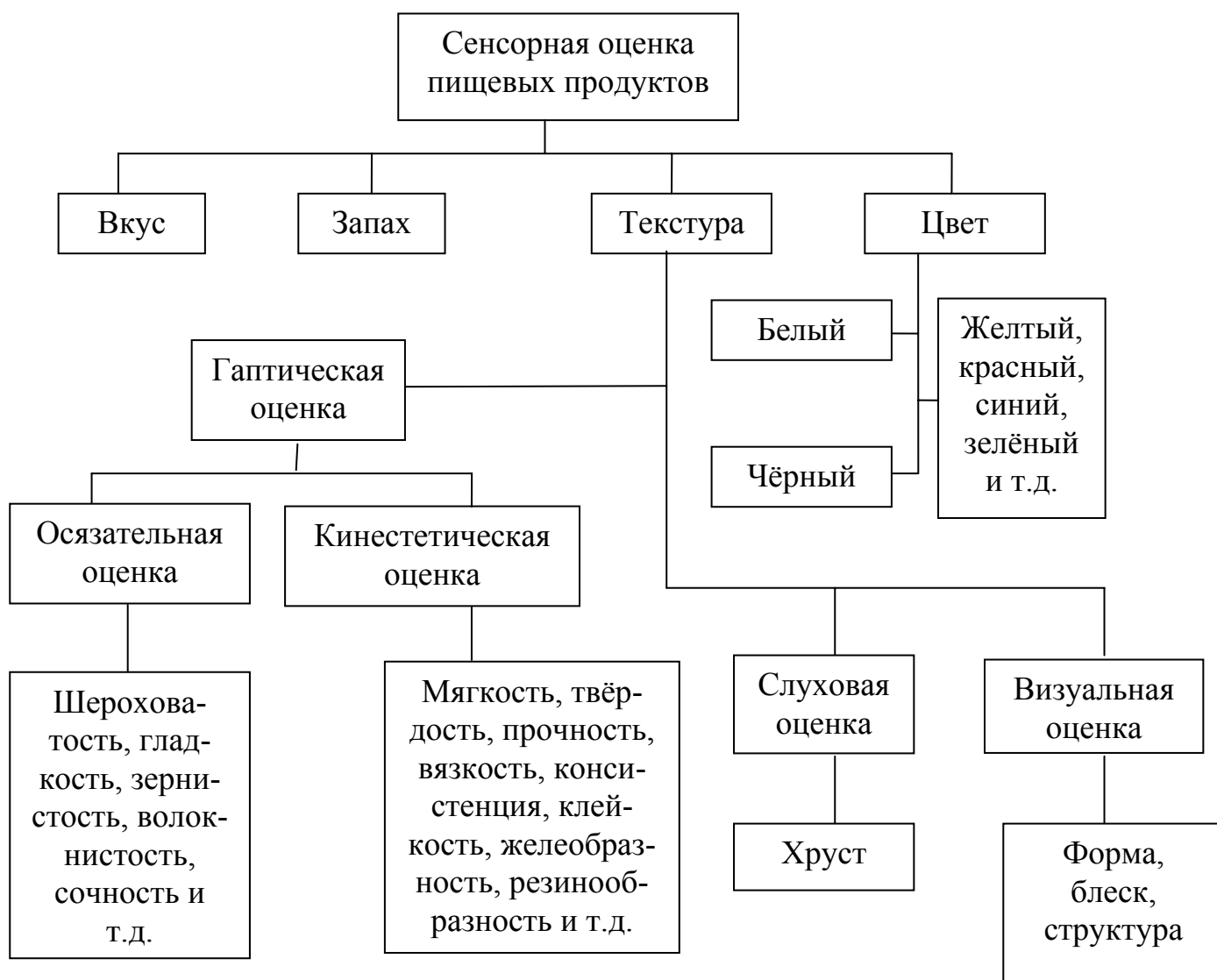


Рисунок 2 - Классификация сенсорной оценки качества и текстуры пищевых продуктов

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

1) методы точного измерения реологических величин - коэффициента вязкости, предела текучести, модуля упругости, прочности на растяжение и др.;

2) эмпирические методы, при которых продукты подвергаются воспроизводимой деформации или нагрузке при помощи измерительных приборов, не позволяющих точно определить реологические свойства. Результаты измерений представляют собой параметры консистенции. Они хорошо коррелируют с признаками текстуры, полученными при органолептической оценке;

3) имитационные методы, при которых пищевые продукты в специальных измерительных приборах подвергаются испытаниям, имитирующим реальные нагрузки при приеме пищи, например с помощью циклических нагрузок имитируется процесс разжевывания пробы. Цель такого анализа текстуры - измерение параметров, которые соответствуют признакам текстуры продукта, по-

лученным сенсорными методами. Это предполагает полное совпадение вида нагрузки, скорости деформации, температуры и других факторов испытания.

Вопросами зависимости между сенсорными и текстурными признаками, которые основываются на текучести и деформации продуктов, и их реологическими свойствами, определяемыми инструментально, занимается психореология.

## 4 Классификация дисперсных систем

Классическими объектами инженерной физико-химической механики являются дисперсные системы, состоящие из двух и более фаз. В них дисперсионной средой является непрерывная фаза, дисперсионной фазой - раздробленная фаза, состоящая из частиц, не контактирующих друг с другом. При этом под фазой понимается совокупность гомогенных частей системы, ограниченных от других частей физическими поверхностями раздела.

Упрощенная классификация дисперсных пищевых продуктов, не учитывающая дисперсности и типа контактов между фазами, приведена в таблице 1.

Таблица 1 – Классификация пищевых дисперсных систем

Дисперсионная среда	Дисперсная фаза	Название системы	Примеры
Газ	Твердая	Пыль, дым	Сухой порошок (мука) в воздухе
	Жидкая	Туман	Дисперсия молока в распылительной сушилке
	Газообразная	—	—
Жидкость	Твердая	Суспензия	Фруктоовощные соки с мякотью, сырковая масса, колбасный фарш
	Жидкая	Эмульсия	Масло в воде, молоко
	Газообразная	Пена	Крем, взбитые сливки
Твердое тело	Твердая	Твердая суспензия, сплав	Замороженное мясо
	Жидкая	Твердая эмульсия	Сливочное масло
	Газообразная	Пористое тело	Сыр

При определении реологического поведения продукта приведенные в таблице данные позволяют отнести его к той или иной группе: сыпучим, жидко- и твердообразным (в зависимости от концентрации дисперсной фазы) или твердым. В реологии жидкообразные продукты принято называть золи, а твердообразные - гели.

Продукты в таблице 1 отнесены к той или иной системе по главнейшим признакам. Например, колбасный фарш после куттерования представляет собой суспензию, насыщенную воздушными пузырьками, то есть трехфазную систему. Один и тот же продукт (сливочное масло) в зависимости от температуры может быть отнесен к разным системам. Механическое воздействие (резание,

взбивание, перемешивание) также может вызвать переход из одного вида дисперсии в другой.

## 5 Классификация структур дисперсных систем

Структура, то есть внутреннее строение продукта, и характер взаимодействия между отдельными ее элементами (частицами) определяются химическим составом, биохимическими показателями, температурой, дисперсностью, агрегатным состоянием и рядом технологических факторов.

По классификации акад. П.А. Ребиндера структуру пищевых продуктов можно разделить на коагуляционные и конденсационно-кристаллизационные.

Коагуляционные структуры образуются в дисперсных системах путем взаимодействия между частицами и молекулами через прослойки дисперсионной среды за счет Ван-дер-Ваальсовых сил сцепления. Толщина прослойки соответствует минимуму свободной энергии системы. Термодинамически стабильны системы, у которых с поверхностью частиц прочно связаны фрагменты молекул, способные без утраты этой связи растворяться в дисперсионной среде. В свою очередь дисперсионная среда находится в связанном состоянии. Обычно эти структуры обладают способностью к самопроизвольному восстановлению после разрушения (тиксотропия). Нарастание прочности после разрушения происходит постепенно, обычно до первоначальной прочности. Толщина прослоек в определенной мере зависит от содержания дисперсионной среды. При увеличении ее содержания значения сдвиговых свойств обычно уменьшаются, а система из твердообразной переходит в жидкообразную. При этом степень дисперсности, то есть преобладающий размер частиц, даже при постоянной концентрации фазы оказывает влияние на состояние системы и ее прочность.

При обезвоживании коагуляционных структур (при увеличении содержания дисперсной фазы) прочность их повышается, но после определенного предела они перестают быть обратимо-тиксотропными. Восстанавливаемость структуры сохраняется в пластично-вязкой среде, когда разрушение пространственного каркаса происходит без нарушения сплошности.

При наибольшей степени уплотнения структуры и наименьшей толщине прослоек жидкой среды восстанавливаемость и пластичность исчезают, кривая прочности в зависимости от влажности дает излом. При этом контакты частиц остаются еще точечными; они могут переходить в фазовые путем спекания или срастания при значительном повышении температур.

Для описания долговечности структуры, например, желатина, альбумина под нагрузкой П.А. Ребиндер процесс разрушения рассматривает как термомеханический, когда благодаря тепловому воздействию преодолевается энергетический барьер (энергия активации), ослабленный действием механического напряжения.

При образовании коагуляционных структур во многих продуктах пищевой промышленности существенную роль играют поверхностно-активные вещества и растворенные в воде белки, которые выступают в качестве эмульгаторов и стабилизаторов образуемых систем и могут существенно изменять их структурно-механические характеристики.

Конденсационно-кристаллизационные структуры присущи натуральным продуктам, однако могут образовываться из коагуляционных при удалении дисперсионной фазы в расплавах или растворах. В процессе образования эти структуры могут иметь ряд переходных состояний: коагуляционно-кристаллизационные, коагуляционно-конденсационные; их образование характеризуется непрерывным нарастанием прочности. Основные отличительные признаки структур такого типа следующие: большая по сравнению с коагуляционными прочность, обусловленная высокой прочностью самих контактов; отсутствие тиксотропии и необратимый характер разрушения; высокая хрупкость и упругость из-за жесткого скелета структуры; наличие внутренних напряжений, возникающих в процессе образования фазовых контактов и влекущих в последующем за собой перекристаллизацию и самопроизвольное понижение прочности вплоть до нарушения сплошности, например растрескивание при сушке.

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

## 6 Виды связи влаги с материалом

Большинство продуктов пищевой промышленности в тех или иных количествах содержат воду. Она, являясь в большинстве систем дисперсионной средой, в значительной мере определяет структуру продукта. Поэтому вид или форма связи влаги с продуктом определяют технологические показатели продукта и его структурно-механические характеристики.

Ребиндером П.А. предложена следующая классификация форм связи влаги с материалом:

- 1) химическая (ионная, молекулярная);
- 2) физико-химическая (адсорбционная, осмотическая);
- 3) физико-механическая (влага в капиллярах и макрокапиллярах, влага смачивания).

Наиболее прочным видом связи является химическая, которая обусловлена ионными и молекулярными взаимодействиями в точных количественных соотношениях. Материалами с химической связью влаги являются:  $Ca(OH)_2$  (ионная связь) и  $CuSO_4 \cdot 5H_2O$  (гидратная вода, молекулярная связь). Для нарушения этой связи нужно применять прокалывание или химическое воздействие. Она резко отличается по своим свойствам от свободной.

Физико-химическая связь обусловлена адсорбцией влаги в гидратных оболочках или осмотическим удерживанием в клетках в нестрого определенных соотношениях. Она удаляется из материала испарением, десорбцией (адсорбционная) или вследствие разности концентраций (осмотическая). Адсорбционная влага прочно удерживается на поверхности и в порах материала. Эта влага может иметь иные, чем вода, свойства и способствует диспергированию частиц и пластификации системы, она присуща обычно структурам коагуляционного типа, хотя может существовать и в структурах других типов. Осмотическая влага вызывает набухание тела и присуща клеточным структурам. Адсорбционная влага требует для своего удаления значительно большей затраты энергии, чем влага набухания. Присутствие этих видов влаги особенно характерно для коллоидных, полимерных и растительных материалов.

Физико-механическая связь обусловлена удержанием влаги в ячейках структуры (иммобилизационная), в микро- и макрокапиллярах и прилипанием ее к поверхности тела (смачивание) в неопределенных соотношениях; удаляется из материала испарением или механическими способами (отжимание, центрифугирование и т.д.). Основная масса воды находится в свободном состоянии и не меняет своих свойств.

В более широком смысле влагу материала классифицируют на свободную и связанную. Под свободной понимают влагу, скорость испарения которой из материала равна скорости испарения воды со свободной поверхности. Под связанной понимают влагу, скорость испарения которой из материала меньше скорости испарения воды со свободной поверхности.



При увеличении содержания влаги ее избыток перестает быть связанным с продуктом и самопроизвольно отделяется от него (отстаивание, расслаивание и т.п.).

По преобладанию формы связи влаги продукты можно разделить на коллоидные (физико-химически связанная влага), капиллярно-пористые (физико-механически связанная влага) и коллоидные капиллярно-пористые, имеющие качества, присущие первым и вторым, например мясной фарш, творожно-сырковая масса и т.п.

## 7 Особенности течения реальных пищевых масс

При течении материала реакция  $R$ , в соответствии с рисунком 3, зависит как от силы  $P$ , так и от вязкодеформируемого материала.

Напряжение сдвига  $\tau$ , Па

$$\tau = \frac{P}{F}, \quad (1)$$

где  $F$  – площадь верхней или нижней пластины, м.

Скорость сдвига  $\dot{\gamma}$ ,  $\text{с}^{-1}$

$$\dot{\gamma} = \frac{dv}{dy}, \quad (2)$$

где  $dv$  – скорость сдвига элементарного слоя относительно соседнего слоя, м/с:

$dy$  – толщина элементарного слоя, м.

Для ньютоновских материалов напряжение сдвига пропорционально вязкости  $\mu$ , Па · с, и скорости сдвига

$$\tau = \mu \dot{\gamma}. \quad (3)$$

Вязкость не зависит от скорости сдвига, а изменяется в зависимости от температуры и давления в данной системе. Величина, обратная вязкости, называется текучестью. Когда необходимо учитывать массу измеряемой среды, определяют кинематическую вязкость  $\nu$ ,  $\text{м}^2/\text{с}$ ,

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}, \quad (4)$$

где  $\rho$  – плотность среды,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Течение реальных материалов, перерабатываемых в пищевой промышленности, плохо описывается уравнением (3).

В уравнение (3) входит коэффициент вязкости  $\mu$ , который является константой, то есть для данного материала он постоянен и не зависит от приложенных напряжений и от возникших при этом скоростей сдвига слоев жидкости друг относительно друга. Рассмотрение же течения реальных материалов говорит о том, что коэффициент вязкости, характеризующий большую или меньшую сопротивляемость сдвигу слоев друг относительно друга, является

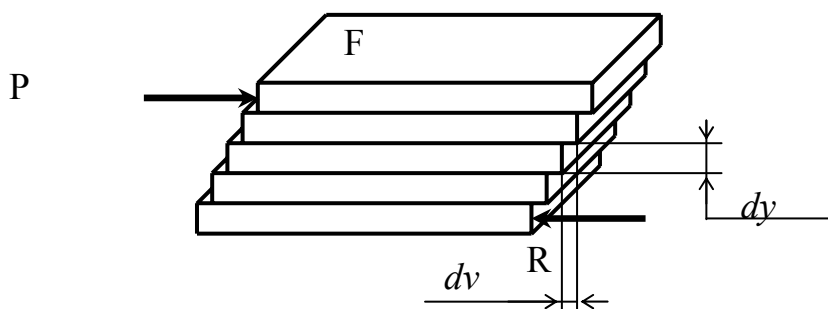


Рисунок 3 – Сдвиг материала между двумя пластинами

величиной не постоянной, зависящей от величины приложенных напряжений или скоростей сдвига.

У большинства перерабатываемых пищевых масс этот коэффициент уменьшается с ростом напряжений или скоростей сдвига. Объясняется это тем, что пищевые массы - это, как правило, структурированные системы, то есть системы, имеющие определенную макро- и микроструктуру. Например, густая конфетная масса, пралине - это какао-масло, в котором имеются измельченные, неправильной формы кусочки жареного ореха и кристаллики сахара. Когда массу приготовили - все ее компоненты как-то взаимно расположились, где-то соединились. Начинаем прикладывать напряжения - начинается сдвиг слоев друг относительно друга, с каким-то сопротивлением, определяемым организовавшейся структурой. Чем больше прикладываемые напряжения и скорости сдвига, тем в больших местах происходит разрыв связей компонентов структуры, неправильной формы частицы все больше ориентируются по потоку. За счет этого происходит уменьшение сопротивления смещению слоев друг относительно друга, то есть падает вязкость, определяемая коэффициентом вязкости, который, следуя ньютоновскому понятию вязкости, называется теперь эффективной вязкостью  $\mu_{эф.}$

$$\mu_{эф.} = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (5)$$

Итак, если у ньютоновской идеальной вязкости жидкости коэффициент вязкости постоянен, то у реальных пищевых жидкостей коэффициент эффективной вязкости не есть константа.

"Аномальное" вязкое течение пищевых масс наиболее часто встречается. И лишь очень немногие реальные жидкости подчиняются "нормальному" ньютоновскому закону.

Оствальд в 30-е годы ввел понятие структурированной системы, для которой можно наблюдать закон изменения эффективной вязкости, в соответствии с рисунком 4.

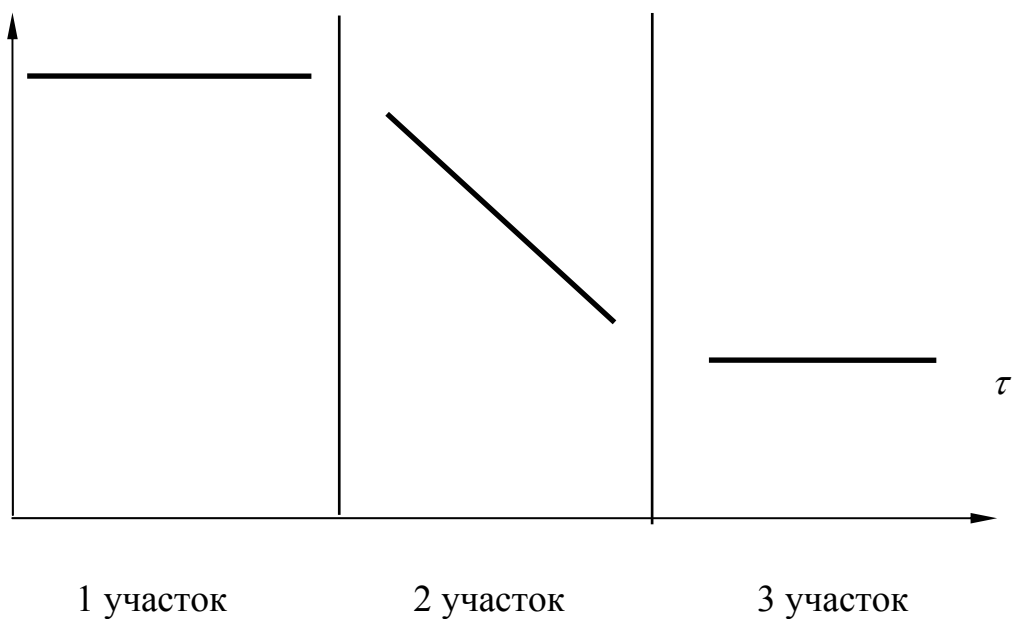


Рисунок 4 - Зависимость эффективной вязкости от напряжения для структурированных систем

У реальных пищевых масс, структурированных систем, можно наблюдать три участка: участок 1 - малые сдвиговые напряжения, практически неразрушенная структура и соответствующая ей большая, носящая ньютоновский  $\mu_{эф.}$  характер (константа) вязкость; участок 2 - растут напряжения, все больше разрушается структура, все меньшее значение приобретает эффективная вязкость; участок 3 - практически разрушена структура, вновь начинается ньютоновское течение, но уже с наименьшим значением вязкости.

## 8 Механические модели, отражающие элементарные реологические свойства

В реологии различные материалы представляются механическими моделями, составленными из простых идеализированных тел. Механические модели позволяют представить, как ведет себя тот, или иной, материал под нагрузкой. По этим механическим моделям составляют математические уравнения зависимостей различных параметров: касательных  $\tau$  и нормальных  $\sigma$  напряжений, угловых  $\gamma$  и линейных  $\varepsilon$  деформаций, скоростей изменения этих деформаций ( $\dot{\gamma}$  и  $\dot{\varepsilon}$ ), времени  $t$ . Зависимости параметров между собой часто изображают на графиках.

При составлении механических моделей исходят из положения, что деформация сложного тела является результатом наложения деформаций элементарных механических моделей идеализированных тел, отражающих основные реологические свойства. К основным реологическим свойствам, которые наблюдаются у реальных тел, относятся: вязкость, упругость и пластичность.

**Моделью упругого твердого тела** является пружина, или тело Гука, в соответствии с рисунком 5.

Соответствующей математической моделью является реологическое уравнение гуковского твердого тела для простого сдвига

$$\tau = G\gamma, \quad (6)$$

где  $G$  - модуль сдвига.

Для растяжения-сжатия

$$\sigma = E\varepsilon, \quad (7)$$

где  $E$  - модуль упругости.

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

**Механической моделью вязкой жидкости** является гидравлический поршень, в соответствии с рисунком 6, или тело Ньютона.

Соответствующей математической моделью является реологическое уравнение состояния ньютоновского тела для простого сдвига

$$\tau = \mu\dot{\gamma}, \quad (8)$$

где  $\mu$  - вязкость.

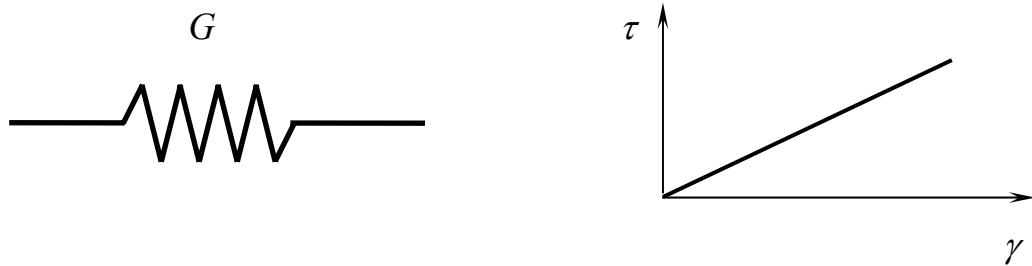


Рисунок 5 – Механическая модель тела Гука

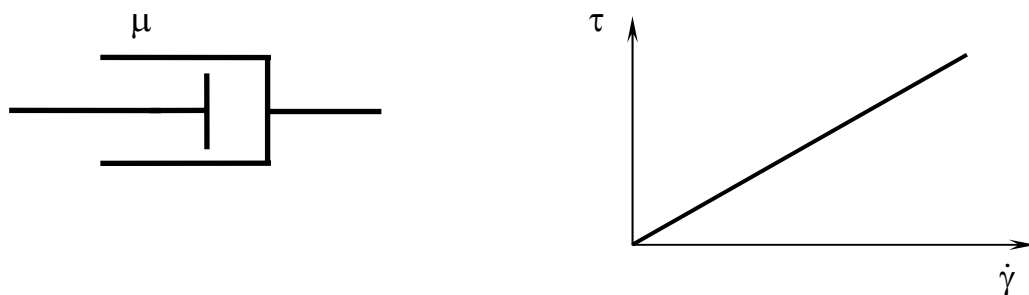


Рисунок 6 – Механическая модель тела Ньютона

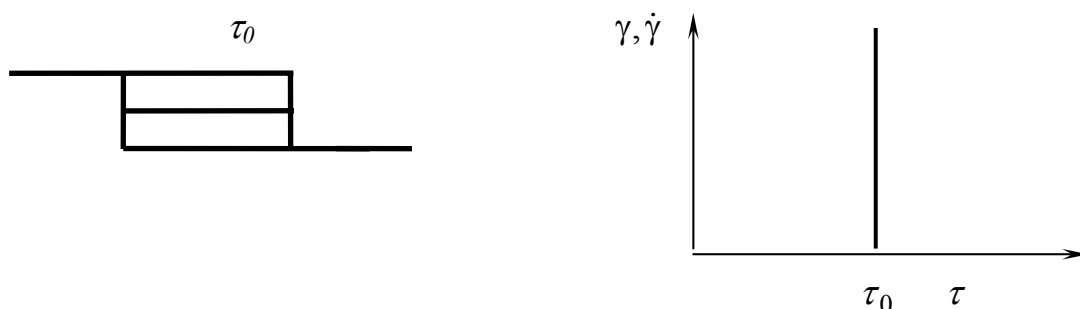


Рисунок 7 - Механическая модель тела Сен-Венана

Реологической константой является вязкость  $\mu$ . Напряжение, возникающее в этом теле, прямопропорционально скорости сдвига.

**Модель идеальнопластичного тела** изображается в виде пары трения, в соответствии с рисунком 7, и определяется как тело Сен-Венана.

Оно неподатливо ( $\varepsilon = 0; \dot{\varepsilon} = 0; \gamma = 0; \dot{\gamma} = 0$ ) при нагружении ниже предела текучести ( $\sigma < \Theta_0$  или  $\tau < \tau_0$ ), а после его превышения ( $\sigma \geq \Theta_0$  или  $\tau \geq \tau_0$ ), неограниченно деформируется ( $\varepsilon \rightarrow \infty; \dot{\varepsilon} \rightarrow \infty; \gamma \rightarrow \infty; \dot{\gamma} \rightarrow \infty$ ), при этом в теле возникают напряжения равные пределу текучести ( $\sigma = \Theta_0; \tau = \tau_0$ ). Предел текучести  $\tau_0$  является реологической константой элемента пластичности.

**Модель твердого тела**, или тело Ренкина, изображается как пара сцепленных пластин, в соответствии с рисунком 8. Реологическая константа данно-

го элемента - предел прочности  $\tau_B$  или  $\sigma_B$ . Если при нагружении достичь предела прочности ( $\tau = \tau_B$ ), сцепленные пластины необратимо разъединяются ( $\gamma \rightarrow \infty; \dot{\gamma} \rightarrow \infty$ ). При нагружении менее предела прочности ( $\tau < \tau_B$ ) тело неподатливо ( $\gamma = 0; \dot{\gamma} = 0$ ).

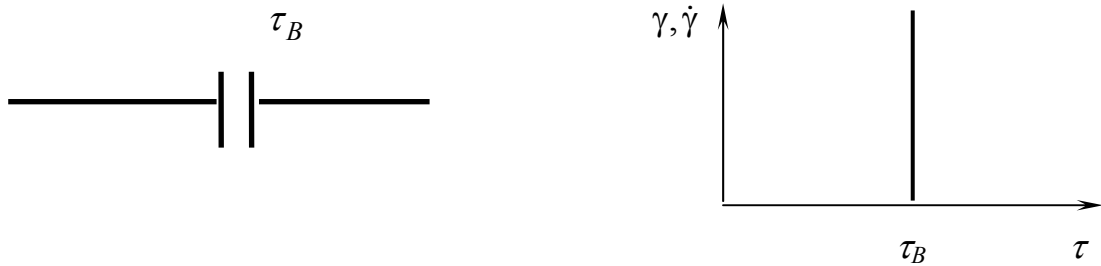


Рисунок 8 – Механическая модель тела Ренкина

**Модель твердого тела**, в соответствии с рисунком 9, учитывающая необратимую мгновенную деформацию, была введена Пелегом.

При нагружении тело Пелега сначала деформируется в пределах  $0 \leq \gamma \leq \gamma_h$ , а после достижения контакта ведет себя как жесткое тело.



Рисунок 9 – Механическая модель тела Пелега

## 9 Изменение реологических моделей, позволяющие лучше описывать поведение реальных материалов

Один из путей уточнения описания реологическими уравнениями поведения реальных материалов под нагрузками - это путь описания свойств реального материала, как комбинации тех или иных идеальных свойств. Например. Есть вязкий материал - идеальный ньютоновский. Есть пластичный - тоже идеальный - Сен-Венановский. А есть реальный - вязкопластичный, сочетающий свойства вязкости и пластичности. Прикладываем напряжения - нет течения даже с малой скоростью. Увеличиваем напряжения - все еще нет. И вот, по достижении определенной величины  $\tau_0$  начинается вязкое течение с каким-то значением вязкости, называемое в данном случае пластической вязкостью  $\mu_{nl}$ . Реологическая модель такого поведения, называемая телом Шведова-Бингама, в соответствии с рисунком 10, имеет реологическим уравнением зависимость при  $\tau > \tau_0$

$$\tau = \tau_0 + \mu_{nl} \cdot \dot{\gamma} \quad (9)$$

Эта модель также чрезвычайно распространена в инженерной практике и позволяет во многих случаях решать реальные инженерные задачи.

Модель упруго-пластического тела, в соответствии с рисунком 11, получается при последовательном соединении упругого элемента Гука и пластического элемента Сен-Венана. При небольших напряжениях это тело ведет как упругое, а при превышении определенной величины  $\tau_0$  пластическое течение.

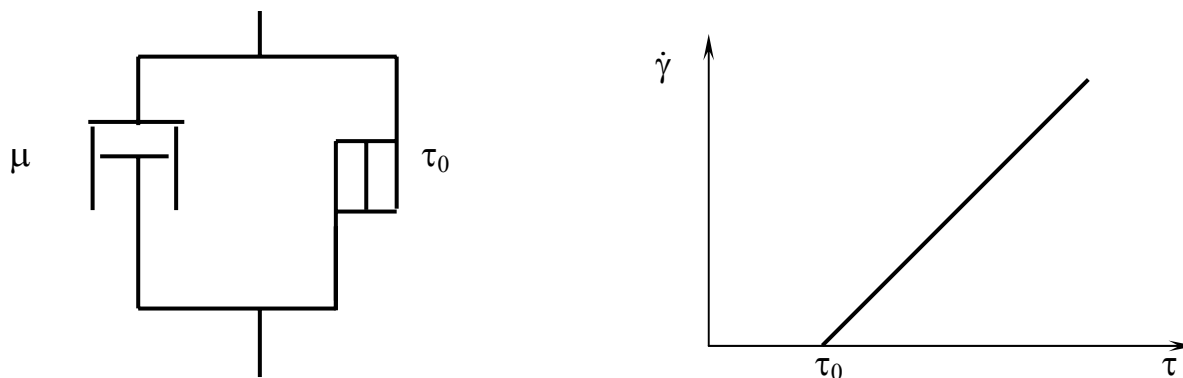


Рисунок 10 – Механическая модель тела Шведова-Бингама



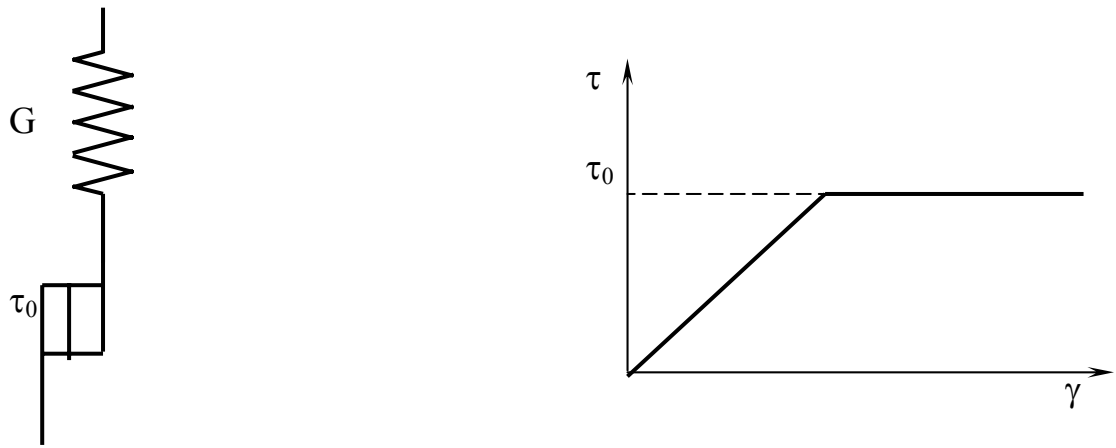


Рисунок 11 – Механическая модель упруго-пластического тела

## 10 Механическая модель тела Кельвина

В 1890 году Уильям Томпсон (он же лорд Кельвин) ввел понятие вязкости твердого тела. Механическая модель тела Кельвина представляет собой параллельно соединенные элементы Гука и Ньютона, в соответствии с рисунком 12, с реологическими характеристиками  $G$  и  $\mu$ . Наличие механической модели позволяет несложными рассуждениями перейти к математической. Для написания математической модели тела Кельвина используем то обстоятельство, что при параллельном соединении элементов деформация сложного тела  $\gamma_K$  равна деформации каждого элемента, а напряжение суммарного элемента  $\tau_K$  равно сумме напряжений в отдельных элементах  $\tau_G$  и  $\tau_H$ . Эти соображения позволяют записать систему уравнений

$$\begin{cases} \gamma_K = \gamma_G = \gamma_H \\ \tau_K = \tau_G + \tau_H \end{cases} \quad (10)$$

Воспользуемся реологическими уравнениями элементов Гука и Ньютона

$$\begin{aligned} \tau_G &= G \cdot \gamma_G, \\ \tau_H &= \mu \cdot \dot{\gamma}_H. \end{aligned} \quad (11)$$

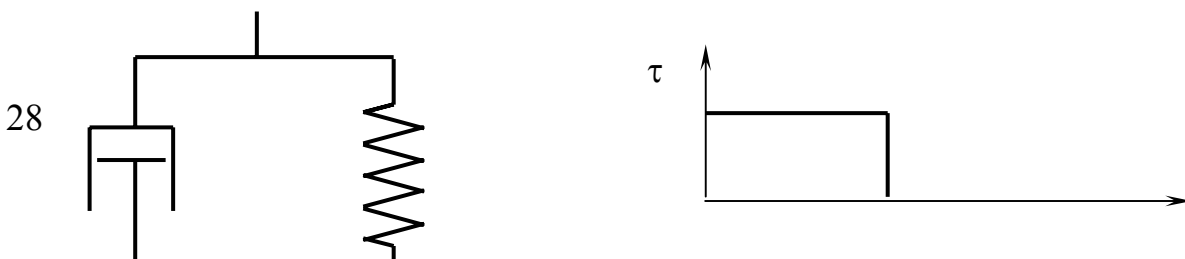
Рассмотрев совместно все четыре уравнения, получим окончательно математическую модель тела Кельвина в таком виде

$$\tau = G \cdot \gamma + \mu \cdot \dot{\gamma}. \quad (12)$$

Кельвин ввел это тело для того, чтобы иметь возможность показать свойство вязкого течения для "твердого" тела. Это явление, характеризующееся самопроизвольным развитием деформации при постоянном значении приложенных напряжений, имеет специальное название - ползучесть. Решив относительно  $\gamma$  уравнение тела Кельвина, при  $\tau = \tau_c = const$ , получим уравнение кривой ползучести  $\gamma = \gamma(t)$ , именуемое часто кривой кинетики деформации

$$\gamma = \frac{\tau_c}{G} + c \cdot e^{-\frac{G}{\mu} \cdot t}, \quad (13)$$

где  $c$  - произвольная постоянная интегрирования, определяемая из начальных условий.



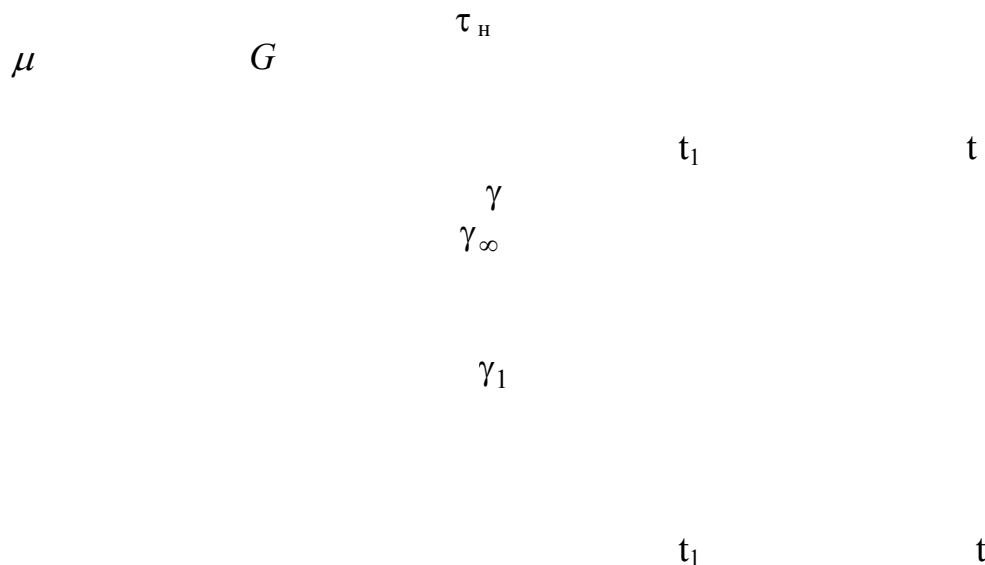


Рисунок 12 – Механическая модель тела Кельвина

В рассматриваемом случае, при  $t = 0$ ,  $\gamma = \gamma_0 = 0$ , значение произвольной постоянной  $c = -\frac{\tau_c}{G}$ .

Окончательно график уравнения кинетики деформации выглядит в соответствии с рисунком 13, где приведены кривые для трех различных пар значений реологических констант  $\mu$  и  $G$ , входящих в уравнение Кельвина.

При стремлении  $t \rightarrow \infty$  деформация  $\gamma$  асимптотически приближается к значению  $\tau_c/G$ . Вспомнив, что для тела Гука, упругие деформации которого определяются соотношением  $\gamma = \tau_c/G$  при приложении напряжения  $\tau = \tau_0$ , имела бы место мгновенно возникающая деформация, равная  $\gamma = \tau_c/G$ , то есть деформация, как раз равная тому значению, которого достигнет в конце концов деформация в теле Кельвина, при действии на него напряжения  $\tau_c$ . Этим объясняется часто употребляемое название одного из характерных свойств тела Кельвина - запаздывающая упругость, то есть не мгновенная, как в теле Гука, но достигающая того же, что и в теле Гука, значения.



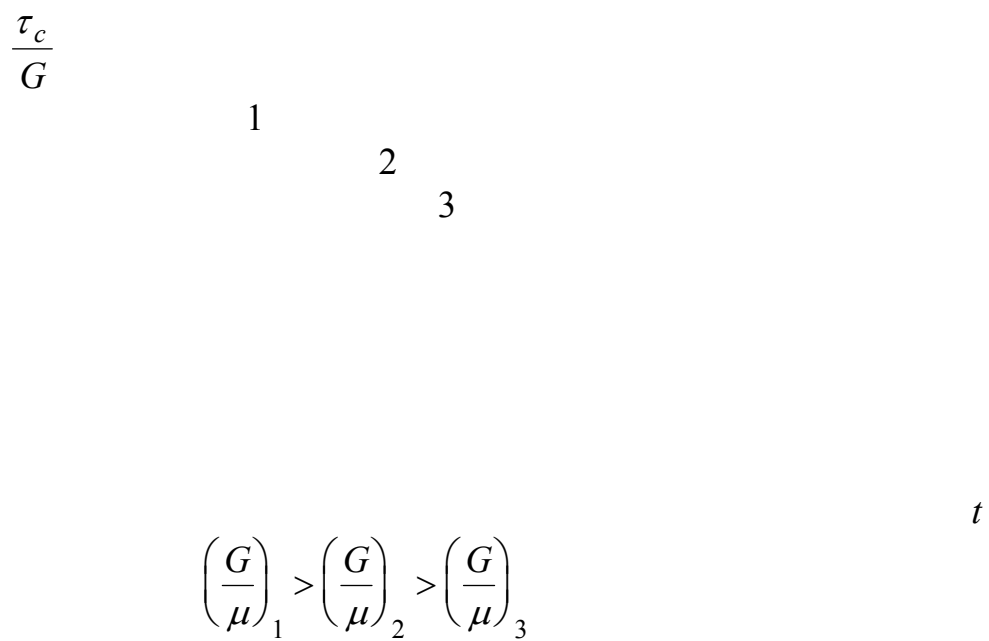


Рисунок 13 - Кривая кинетики деформации тела Кельвина

## 11 Механическая модель тела Максвелла

В 1920 году Гесс наблюдал необычное поведение вязкой жидкости. 1,5 % раствор крахмала, внешне вполне напоминает вязкую жидкость, помещался в сосуд. Сосуд вращали вокруг оси и резко останавливали. Жидкость в нем продолжала вращаться со все уменьшающейся, в силу наличия вязкости, скоростью. Аналогичный опыт проделывали с раствором глицерина в воде. Обнаружилось, что в случае затухания вращения раствора глицерина с водой, имевшего, как казалось, ту же вязкость, что и раствор крахмала, - смесь глицерина с водой, все более медленно вращаясь, наконец, останавливалась. В случае же 1,5 % раствора крахмала затухание вращения происходило так: вращение (допустим по часовой стрелке) постепенно затухало и, прекратившись, вновь начиналось самопроизвольно, но уже в обратном (против часовой стрелки) направлении. Затем, вновь остановка и вращение по часовой стрелке. Иными словами, вязкая жидкость обнаруживала наличие упругих свойств (вспомним, как затухают упругие колебания стальной пружины - тела Гука).

Для описания такого поведения в качестве первого приближения можно взять новую реологическую модель - тело Максвелла. Механический вариант тела Максвелла представляет собой последовательно соединенные элементы Гука и Ньютона, в соответствии с рисунком 14.

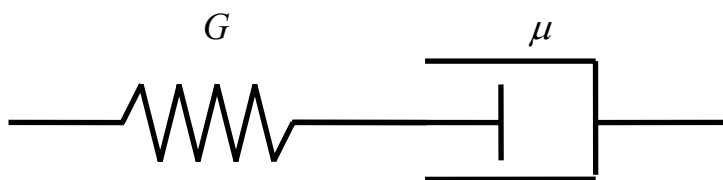


Рисунок 14 - Механическая модель тела Максвелла

В самом деле, рассматривая механическую модель, можно убедиться, что она "течет", как жидкость за счет движения элементов амортизатора. Она же обладает упругими свойствами: например, при мгновенном приложении напряжений - мгновенно деформируется как упругое тело на какую-то величину, за счет деформации пружины. После упругой мгновенной деформации, при продолжающемся действии напряжении, продолжается вязкое течение. На механической модели тела Максвелла можно "проиграть" вариант приложения напряжения и фиксации возникших деформаций, что приведет к исчезновению напряжений.

Три состояния модели, в соответствии с рисунком 15, показывают, что со временем приложенные напряжения будут уменьшаться и исчезнут вообще.

Такое явление самопроизвольного уменьшения напряжений при постоянной деформации носит название релаксации напряжений, что является характерной особенностью тела Максвелла. Аналогично тому, как делали это для тела Кельвина, можно, анализируя механическую модель тела Максвелла, получить рео-

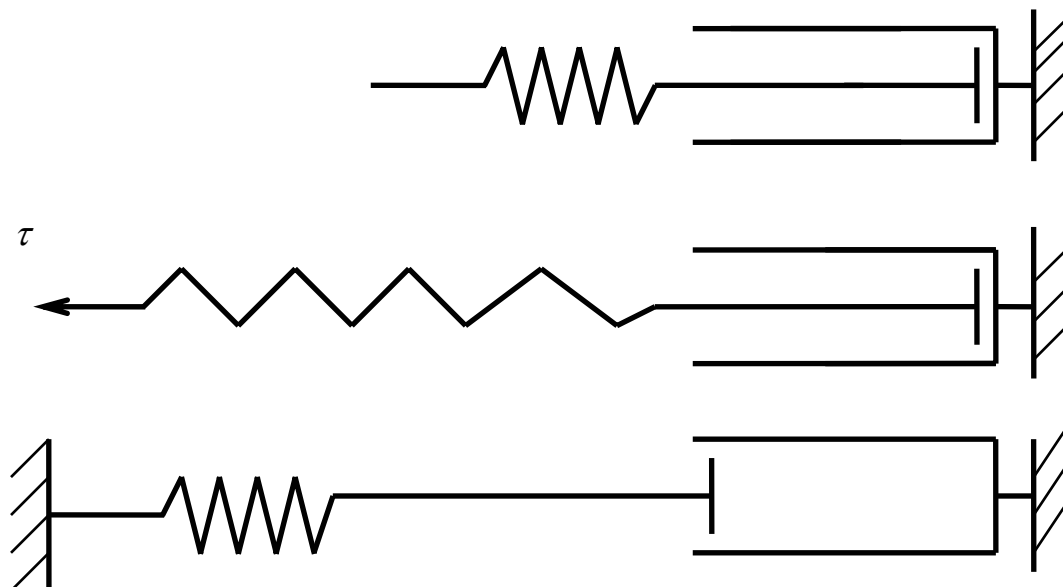


Рисунок 15 - Механическая интерпретация явления релаксации напряжений в теле Максвелла  
логическое уравнение тела Максвелла

$$\tau + \frac{\mu}{G} \cdot \dot{\tau} = \mu \cdot \dot{\gamma} \quad (14)$$

Имея это уравнение, найдем уравнение релаксации  $\tau = \tau(t)$ , при  $\gamma = const$ . Итак, пусть  $\gamma = \gamma_c = const$ . Тогда  $\dot{\gamma} = 0$  и уравнение Максвелла перейдет в

$$\tau + n \cdot \frac{d\tau}{dt} = 0, \quad (15)$$

где  $n = \frac{\mu}{G}$

Решив это уравнение, найдем уравнение релаксации вида

$$\tau = c \cdot e^{-\frac{t}{n}}. \quad (16)$$

Для определения произвольной постоянной вспомним, что в начальный момент мы приложили напряжение  $\tau = \tau_0$ , откуда следует, что  $C = \tau_0$  и окончательно имеет вид

$$\tau = \tau_0 \cdot e^{-\frac{t}{n}} = \frac{\tau_0}{e^{\frac{t}{n}}} \quad (17)$$

Случаи 2 и 3, в соответствии с рисунком 16, графически показывают релаксацию (самопроизвольное уменьшение по экспоненте) напряжений во времени.

Коэффициент  $n$ , входящий в уравнение тела Максвелла, имеет размерность времени

$$[n] = \frac{[\mu]}{[G]} = \frac{H \cdot c \cdot m^2}{m^2 \cdot H} = c \quad (19)$$

и называется коэффициентом релаксации. При  $n \rightarrow \infty$  релаксации напряжений не происходит (случай 1), при  $n \rightarrow 0$  происходит практически мгновенно релаксация напряжений (случай 3).

Как будет вести тело Максвелла при приложении постоянного напряжения (а) и постоянной скорости сдвига (б) показано в соответствии с рисунком 17.

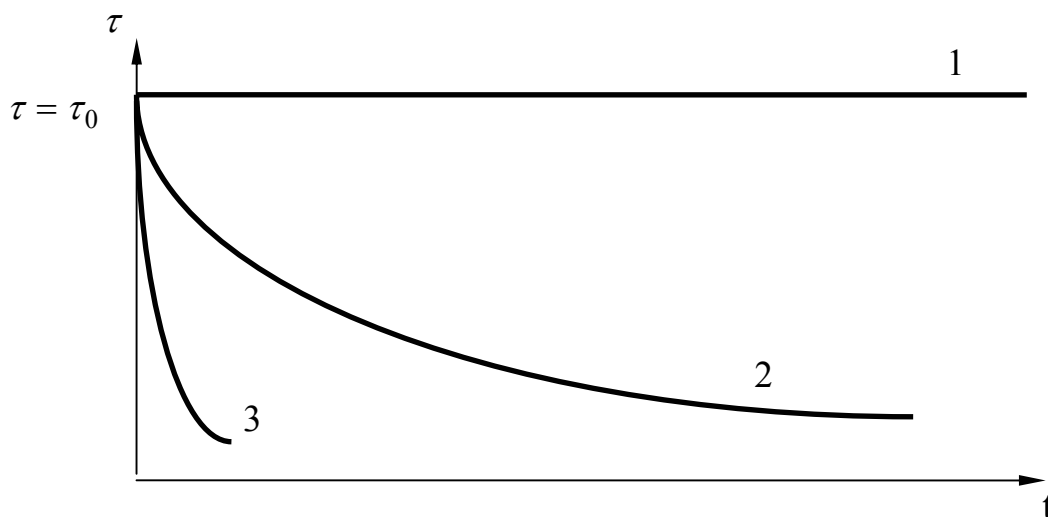


Рисунок 16 - График релаксации напряжений в теле Максвелла при разных значениях  $n$

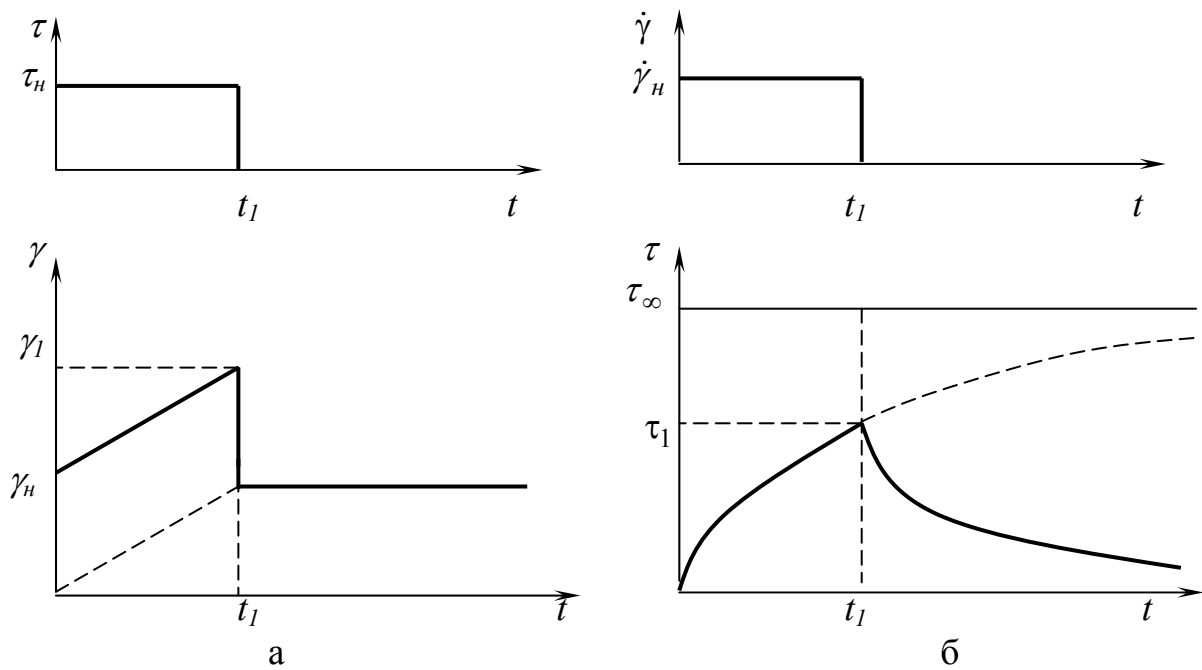


Рисунок 17 – Графики поведения тела Максвелла при приложении постоянного напряжения (а) и постоянной скорости сдвига (б)



## 12 Механические модели широко распространенных реологических тел

В природе имеются материалы, которые в первом приближении можно рассматривать как тело Сен-Венана. Они начинают течь, когда напряжение сдвига достигнет предельного значения. Если нет вязкого сопротивления, то скорость течения материала станет сколь угодно большой. Это показывает, что такие материалы могут только в первом приближении рассматриваться как тела Сен-Венана. Во втором приближении они должны обладать еще вязкостью. Все это приводит к построению тела Бингама, сочетающего упругость, вязкость и пластичность.

Механическая модель Бингама, в соответствии с рисунком 18, состоит из элементов Гука с модулем упругости  $G$ , Ньютона с вязкостью  $\mu$  и Сен-Венана с пределом текучести  $\tau_0$ . Элементы Ньютона и Сен-Венана соединены взаимно параллельно, а вместе – последовательно с элементом Гука.

Под действием напряжения  $\tau < \tau_0$  модель Бингама имеет только упругую деформацию. Реологическое уравнение этой модели при  $\tau > \tau_0$

$$\dot{\gamma} = \dot{\tau} / G + (\tau - \tau_0) / \mu. \quad (20)$$

В 80-х годах позапрошлого столетия Ф.Н. Шведов изучил релаксационные процессы в коллоидных растворах и впервые обнаружил у них упругость и вязкость. Модель этого тела отличается от модели Бингама тем, что параллельно модели Сен-Венана присоединена модель Максвелла, а у модели Бингама – элемент Ньютона.

Механическая модель Шведова, в соответствии с рисунком 18, состоит из элемента Гука с модулем упругости  $G_H$ , Сен-Венана с пределом текучести  $\tau_0$  и Максвелла с модулем упругости  $G_M$  и вязкостью  $\mu$ . При деформации модели Шведова происходит только благодаря элементу Гука. При  $\tau \geq \tau_0$  деформируются все элементы модели.

Реологическое уравнение модели Шведова в дифференциальной форме имеет вид

$$\dot{\gamma} = \dot{\tau} \left( \frac{1}{G_H} + \frac{1}{G_M} \right) + \frac{(\tau - \tau_T)}{\mu} \quad (21)$$

Методы физико-химической механики находят все большее применение в различных областях производства пищевых продуктов. Определение структурно-механических свойств пищевых масс связано с необходимостью технологического контроля производства. Существенные отклонения от принятых

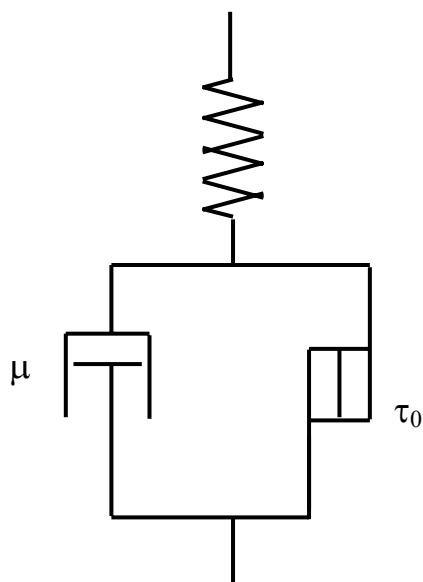


Рисунок 18 – Механическая модель тела Бингама

норм могут сказаться не только на качестве готовых изделий, но и на проведении отдельных технологических процессов. При наблюдающихся на практике диапазонах изменений скорости сдвига, температуры и давления вязкость пищевых материалов варьируется в широких пределах. Поэтому основной задачей является определение изменений свойств материала, происходящих под влиянием тех или иных факторов.

Для определения упруго-пластично-вязких свойств дисперсных систем и растворов высокополимеров предложено экспериментальное определение семейства кривых деформации чистого сдвига  $\varepsilon$  - время  $t$ , полученных при  $\tau = const$  (рисунок 19). При  $\tau < \tau_T$  испытания проводятся в области упругих обратимых деформаций (рисунок 19, а); при  $\tau > \tau_T$  появляется остаточная деформация, которая после завершения упругого последствия приводит к установившемуся течению (рисунок 19, б).

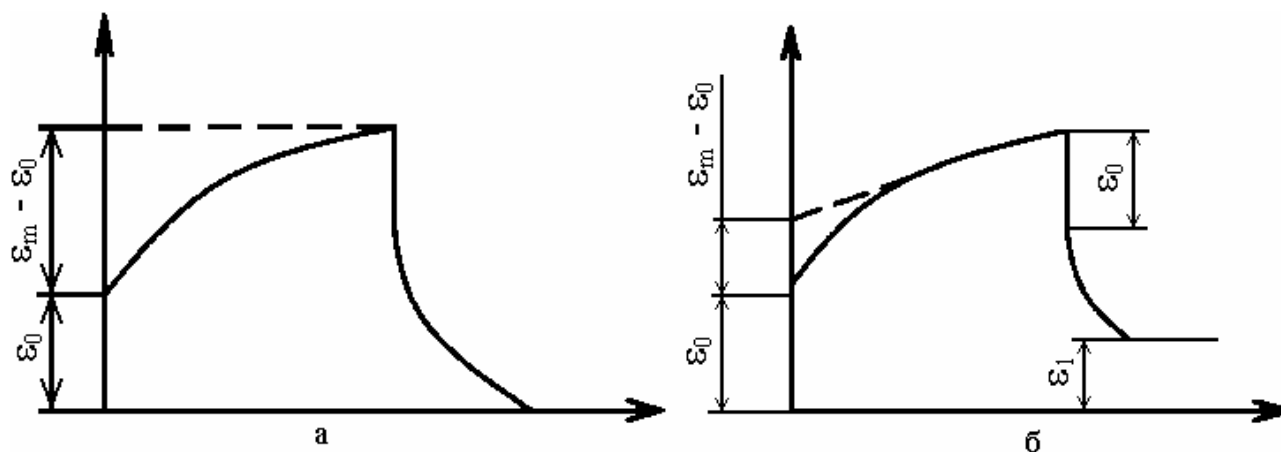


Рисунок 19 - Кривые ползучести

Исследования упруго-пластично-вязких свойств дисперсных пищевых систем по кривым кинетики деформации проводились в основном методом тангенциально смещаемой пластины на приборах типа Вейлера - Ребиндера или Толстого, а также на ротационных вискозиметрах Воларовича. По кривым деформации были определены основные характеристики хлебопекарного теста, маргарина, кондитерских масс, бисквитного теста и некоторых других пищевых материалов.

Наиболее важным реологическим показателем свойств материала является зависимость скорости деформации от напряжения. Для большинства пищевых масс эта зависимость имеет сложный характер. В этих случаях реологические свойства характеризуются кривой зависимости скорости деформации от напряжения.

Рассмотрим еще две сложные модели, довольно широко применяемые при расчете деформации пищевых и полимерных материалов. Это трехэлементная модель Максвелла - Томсона и четырехэлементная модель Бюргерса.

Модель Максвелла - Томсона представляет собой модель Кельвина - Фойгта, к которой последовательно присоединен упругий элемент Гука (рисунок 20,а). Эту модель часто называют моделью стандартного вязкоупругого тела.

Закон деформирования модели Максвелла-Томпсона можно записать в виде

$$\tau + T_p \dot{\tau} = G\gamma + T_p G_2 \dot{\gamma}, \quad (22)$$

где  $G$  — длительный модуль упругости, Па;  
 $G_2$  — мгновенный модуль упругости, Па;  
 $T_p$  — время релаксации, с;

$$T_p = \frac{\mu}{(G_1 + G_2)}; \quad G = \frac{G_1 G_2}{(G_1 + G_2)} \quad (23)$$

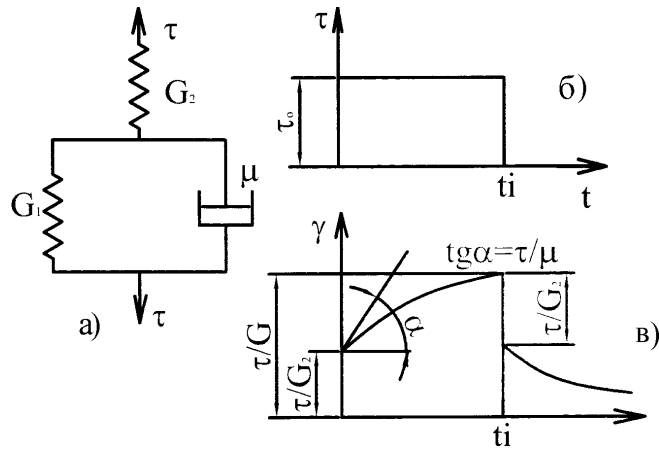


Рисунок 20 - Модель Максвелла-Томпсона

Модель Бюргера состоит из последовательно соединенных моделей Кельвина - Фойгта и Максвелла (рисунок 21).

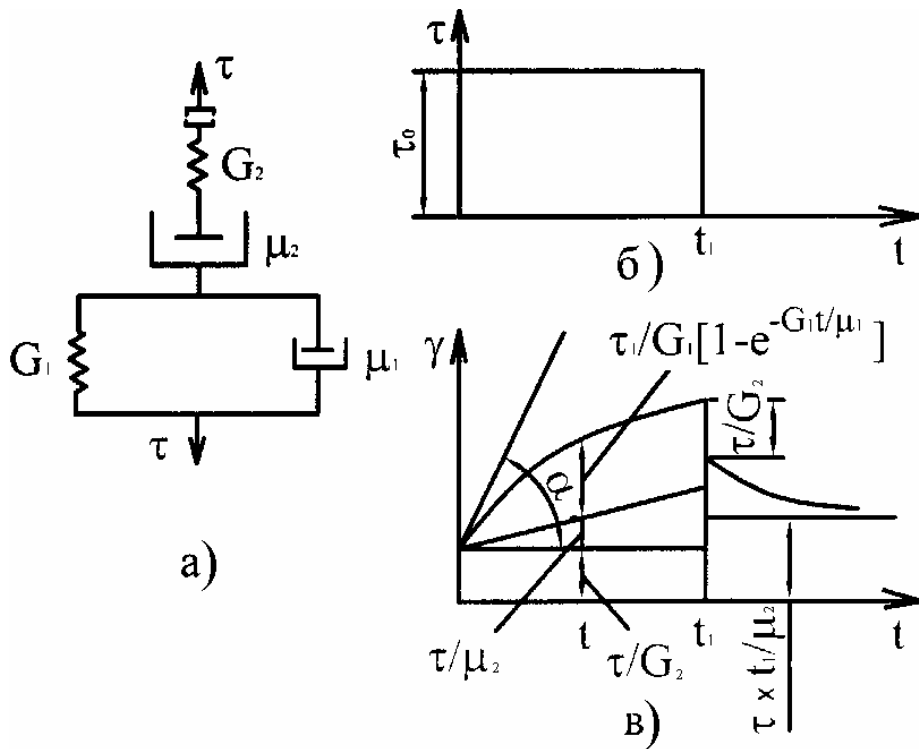


Рисунок 21 – Модель Бюргера.

Уравнение ползучести этой модели имеет вид

$$\gamma = \frac{\tau}{G_2} + \frac{\tau t}{\mu_2} + \left( \frac{\tau}{G_1} \right) \left[ 1 - e^{-\frac{G_1 t}{\mu_1}} \right] \quad (24)$$

Стремление исследователей более точно отобразить поведение пищевых материалов под нагрузкой привело к созданию сложных моделей, что значительно усложнило расчёты. Имеется ряд работ, в которых предпринята попытка моделировать тот или иной технологический процесс. Например, Н.К. Гупта и К.Д. Чойшнер предложили описывать деформацию свежего хлеба при резании реологической моделью Шоффильда - Скотт-Блера с элементом, отражающим потерю прочности хлеба при срезе (рисунок 22).

При резании хлеба давление через нож передается хлебу, который вначале испытывает мгновенную эластическую ( $G_1$ ) и замедленную вязко-упругую ( $G_2, \mu_2$ ) деформации, затем при напряжении, превышающем предел текучести ( $\tau_T$ ), материал пластически деформируется ( $\tau_T, \mu_1$ ). При напряжении, равном пределу прочности при срезе ( $\tau_B$ ), происходит разделение материала (резание).

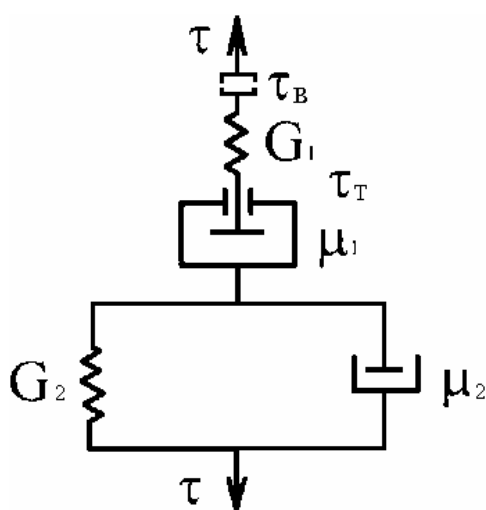


Рисунок 22 - Модель Шоффильда - Скотт-Блера

Реологическое уравнение этой модели имеет вид

$$\dot{\gamma} = \frac{\dot{\tau}}{G_1} + \left( \frac{\tau}{\mu_2} \right) e^{-\frac{G_2 t}{\mu_2}} + \frac{(\tau - \tau_T)}{\mu_1} \quad (25)$$

Резание хлеба начинается при  $\tau > \tau_B$ . Для создания небольшой пластической деформации хлеба необходимо, чтобы время приложения нагрузки (резания) было как можно меньше, т.е. скорость деформации должна быть такой, чтобы было быстро достигнуто предельное напряжение на срез, а пластическая деформация была бы незначительной.

Модель пшеничного теста при растяжении имеет более сложный вид (рисунок 23).

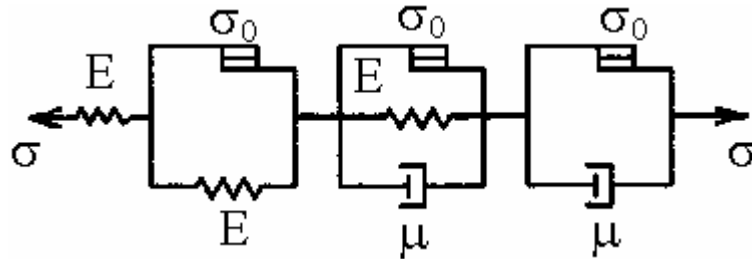


Рисунок 23 - Модель пшеничного теста при растяжении

### 13 Реологические уравнения течения

При рассмотрении реальных жидкостей с нелинейной кривой течения Уилкинсон У.Л. предложил разбить их на три группы:

1) системы, для которых скорость сдвига в каждой точке представляет собой некоторую функцию только напряжения в той же точке. К этой группе относятся неньютоновские материалы, течение которых не зависит от времени;

2) системы в которых связь между напряжением и скоростью сдвига зависит от времени действия напряжения или от предыстории жидкости (тиксотропные и реопектические жидкости);

3) системы, обладающие свойствами как упругого твердого тела, так и жидкости и частично проявляющие упругое восстановление формы после снятия напряжения (вязкоупругие жидкости).

Известно, что течение материала зависит от его физико-химических особенностей: от формы и расположения молекул, концентрации, температуры, влажности, мицеллообразования. Добавлением ингредиентов к чистому растворителю, то есть повышением концентрации, можно увеличить вязкость вещества и изменить характер его течения. Высокомолекулярные вещества в растворе дают с повышением напряжения понижение вязкости. Такое течение называют псевдопластическим.

Большинство неньютоновских материалов не имеют предела текучести (предельно напряженного сдвига), а кривые течения имеют линейную зависимость между напряжением и скоростью сдвига только при очень малых (вязкость  $\mu_0$ ) и очень больших (вязкость  $\mu_\infty$ ) значениях скорости.

Наиболее распространенные в инженерной практике эмпирические уравнения приведены ниже ( $K, n, \alpha, A, B, C$  – коэффициенты):

- уравнение Оствальд-де-Вилля

$$\tau = k \cdot \dot{\gamma}^n, \quad (26)$$

- уравнение Штейгера

$$\tau = \dot{\gamma} / (C + A\tau^2); \quad (27)$$

- уравнение Эллиса

$$\tau = \mu_0 \dot{\gamma} + K \dot{\gamma}^n; \quad (28)$$

- уравнение Рейнер-Филлипова

$$\tau = \left[ \mu_{\infty} + \frac{\mu_0 - \mu_{\infty}}{1 + (\tau/A)^2} \right] \dot{\gamma}; \quad (29)$$

- уравнение Прандтль-Эйринга

$$\tau = A \arcsin(\dot{\gamma}/B); \quad (30)$$

- уравнение Эйринга

$$\tau = \dot{\gamma}/B + C \sin(\tau/A); \quad (31)$$

- уравнение Уильямса

$$\tau = A \dot{\gamma}/(B + \dot{\gamma}) + \mu_{\infty} \dot{\gamma}; \quad (32)$$

- уравнение Сиско

$$\tau = A \dot{\gamma} + B \dot{\gamma}^n; \quad (33)$$

- уравнение Хавена

$$\tau = \mu_0 \dot{\gamma}/(1 + C \tau^n). \quad (34)$$

Для описания течения различных пищевых материалов чаще других применяется степенное уравнение Оствальд-де-Вилля. При  $n < 1$  уравнение соответствует кривой, в соответствии с рисунком 24а. В логарифмических координатах зависимость  $\tau$  от  $\dot{\gamma}$  для многих неньютоновских материалов часто становится линейной в довольно широком диапазоне скоростей сдвига, чем и объясняется широкое использование уравнения Оствальда. При  $\dot{\gamma} = 0$ , следовательно, при  $\alpha_0 = 0$  ( $\alpha_0$  - угол наклона касательной к кривой), вязкость становится бесконечно большой. Однако практически находят конечное значение этой вязкости. При  $n = 1$  степенной закон сводится к выражению Ньютона.

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

Так для псевдопластических материалов  $n < 1$ , то из уравнения Оствальда видно, что вязкость уменьшается с повышением скорости сдвига. Это реоло-



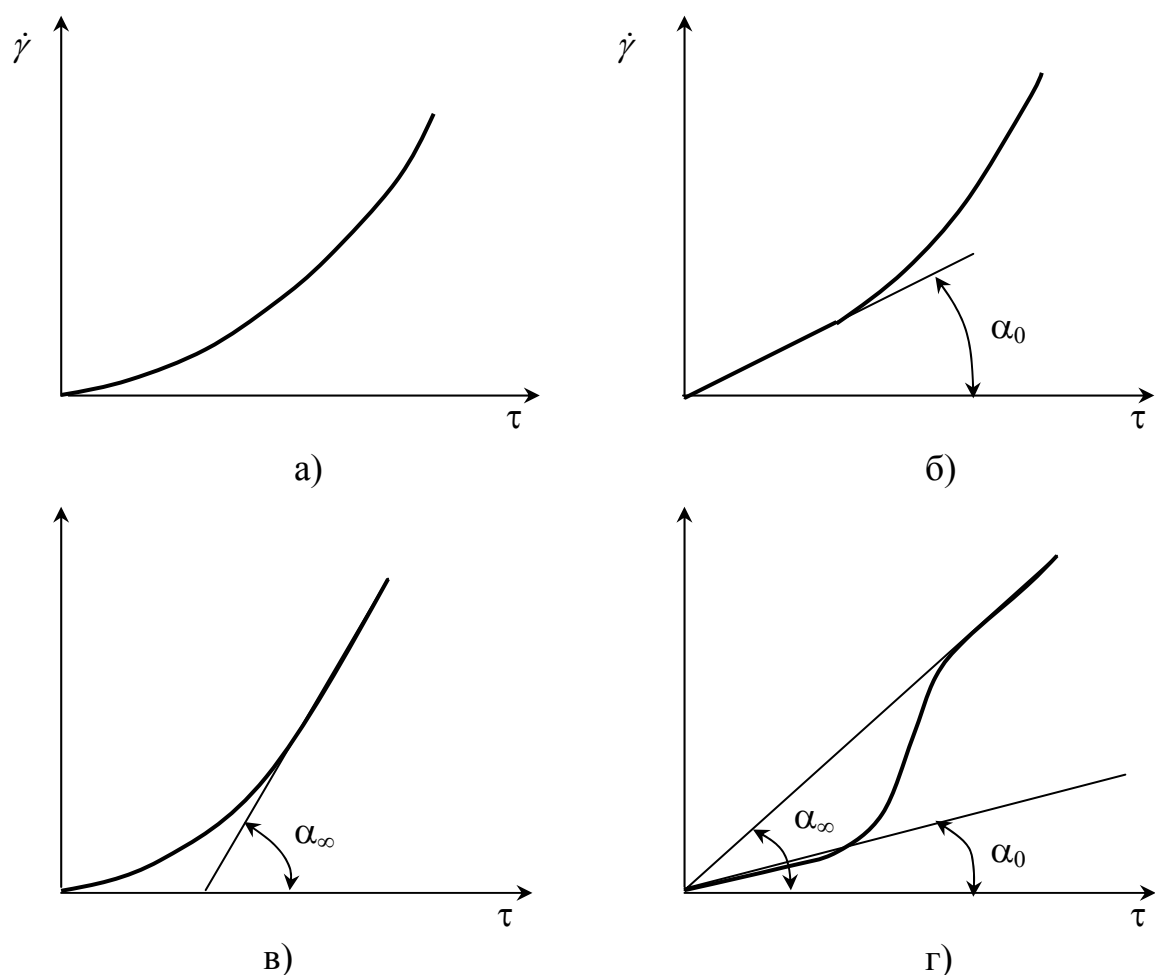


Рисунок 24 – Кривые течения псевдопластических материалов

гическое свойство объясняют тем, что в неподвижной среде расположение частиц характеризуется значительной хаотичностью, а под действием возрастающих сдвигающих сил происходит все большая ориентация частиц в направлении течения. С повышением скорости также уменьшается взаимодействие между частицами. Отмеченные явления проходят в материале так быстро, что их нельзя проследить во времени в обычных измерительных приборах.

Степенной закон получил широкое распространение для выражения течения различных неньютоновских пищевых материалов: томатных концентратов, сахарных растворов, абрикосового пюре, хлебопекарного теста, конфетных масс и других материалов. В инженерной практике уравнение (26) при  $n < 1$  часто называют уравнением псевдопластики. Однако уравнение Оствальда имеет ряд недостатков: отсутствие физического смысла формулы при предельных значениях скорости сдвига ( $\dot{\gamma} = 0$  и  $\dot{\gamma} = \infty$ ); при линейной аппроксимации в логарифмических координатах сильно нелинейных кривых течения в значения констант вносятся значительные погрешности, что снижает точность реологических расчетов.

Применение же других уравнений с большим числом параметров, как правило, связано с трудностями измерения предельных значений реологических параметров.

Кривая течения, в соответствии с рисунком 24б, которая описывается уравнением Штейгера при  $C > 0$ , которое также действительно и при  $\dot{\gamma} \rightarrow 0$ , при этом предельная начальная вязкость  $\mu_0 = 1/C$ .

Некоторые псевдопластические вещества на реограмме дают искривление при малых скоростях сдвига, в соответствии с рисунком 24в, но тем не менее их нельзя относить к пластическим. Определение вязкости  $\mu_\infty$  (при  $\dot{\gamma} \rightarrow \infty$ ) возможно только приближительное, так как при высоких скоростях неизбежно происходит выделение тепла и возникновение турбулентного течения.

Встречаются и такие псевдопластические вещества, у которых пропорциональность между  $\dot{\gamma}$  и  $\tau$  наблюдается только при очень высоких скоростях сдвига, в соответствии с рисунком 24г.

Дилатантное течение проявляют вещества у которых с повышением напряжения (скорости сдвига) непропорционально увеличивается вязкость, в соответствии с рисунком 25а. Это течение описывается уравнениями Оствальда при  $n > 1$ . При очень высоких напряжениях вязкость может стать бесконечно большой, что приведет к разрушению вещества. Дилатантные материалы в инженерной практике встречаются значительно реже, чем псевдопластические. Примером таких пищевых материалов могут служить сгущенное молоко, некоторые растворы кукурузной муки, сахара и крахмала и немногие другие.

В дисперсных системах в зависимости от концентрации, а также величины нагрузки может возникнуть течение, которое покажет отклонение от напряженного состояния. При значениях напряжения, меньших предельного, дисперсная система ведет себя как твердое тело и упруго деформируется. Если напряжение, действующее на систему, превышает предельное, то наступает пластическое течение. Для описания течения пластических материалов предложены следующие уравнения:

- уравнение Бингама

$$\tau = \tau_0 + \mu_{nl}\dot{\gamma}; \quad (35)$$

- уравнение Балкли-Гершеля

$$\tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}^n; \quad (36)$$

- уравнение Кассона

$$\tau^{1/2} = \tau_K^{1/2} + (\mu_K\dot{\gamma})^{1/2}; \quad (37)$$

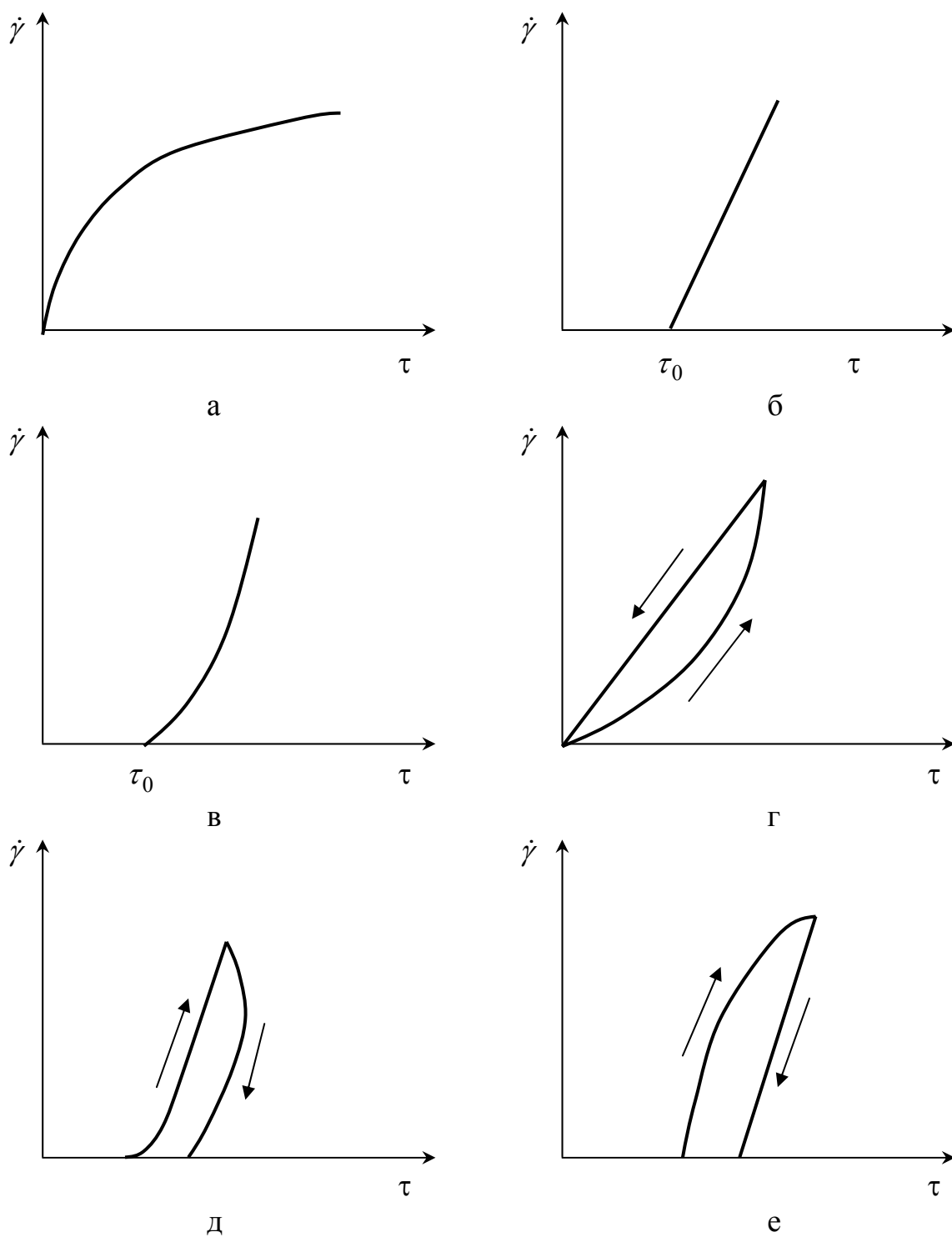
- уравнение Шульмана

$$\tau^m = \tau_0^m + K\dot{\gamma}^n. \quad (38)$$

Идеальнопластическим называется такое течение, при котором после превышения границы течения (предела текучести) наблюдается пропорциональность между скоростью и напряжением сдвига. Физическое поведение таких материалов объясняется характером их структуры, которая предотвращает движение при напряжениях, меньших предела текучести. При  $\tau > \tau_0$  структура полностью разрушается, материал испытывает сдвиговое течение. Для характеристики этого вида течения Бингам, в соответствии с рисунком 25б, предложил уравнение (35), в котором  $\tau_0$  - предельное напряжение сдвига (предел текучести), Па;  $\mu_{nl}$  - пластическая вязкость, Па·с.

Хотя реальные материалы не совсем точно проявляют пластические свойства, соответствующие модели Бингама, однако это отклонение настолько мало, что модель можно использовать при расчете процессов течения некоторых пищевых масс.

Примером систем, довольно близко следующих уравнению Бингама, могут служить маргарин, шоколадные смеси, сырково-творожные и пралиновые массы, зубная паста, жидкие мыла и моющие средства.



а – дилатантный; б – бингамовский; в – Балкли-Гершеля; г – тиксотропный; д – антистиксотропный; е – реопексный.

Рисунок 25 – Кривые течения материалов

Кривые течения некоторых пищевых материалов (например, масса для конфет "Русский узор") описываются уравнением Балкли-Гершеля, в соответствии с рисунком 25в, состоящим из предельного напряжения сдвига и степенного закона. Пластическое течение, при котором наблюдается непропорциональ-

ная зависимость между скоростью сдвига и напряжением, называется неидеальнопластическим. При достижении предела текучести структура разрушается не сразу, а постепенно, по мере увеличения градиента скорости. Кассон вывел для подобного рода течения уравнение (37), в котором  $\tau_K$  – предельное напряжение по Кассону, Па;  $\mu_K$  – пластическая вязкость по Кассону, Па·с. Для некоторых пластических материалов было выяснено, что уравнение Кассона с экспонентой  $1/2$  не согласуется с полученными на практике результатами. Поэтому для расчетов приходится подставлять экспоненты, равные от  $1/3$  до  $2/3$  (экспонента уравнения Бингама равна 1).

Кассон предполагал, что за счет сил взаимодействия между частицами дисперсной фазы образуются длинные цепи в виде нитей, которые при малых скоростях сдвига движутся как единое целое. По мере увеличения скорости происходит разрыв нитей на мелкие части, а при очень высоких скоростях сдвига они полностью разрушаются и вязкость зависит только от взаимодействия между отдельными частицами.

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

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

Материал считается тиксотропным, когда вязкость его является функцией времени, причем предполагается, что структура после определенного времени покоя возвращается к первоначальному состоянию. Время тиксотропного разрушения, так же как и восстановления, для различных структур изменяется в очень широких пределах. Тиксотропия может быть определена по реограмме при получении кривой гистерезиса. В соответствии с рисунком 25г, показана одна из разновидностей петли гистерезиса, построенной по результатам одного эксперимента, в течение которого скорость сдвига постоянно растет от нуля до максимального значения, а затем немедленно снижается до нуля (на рисунке показано стрелкой). Следует отметить, что для одного и того же материала вид петли будет разным при различном времени испытания. Примером тиксотропных пищевых материалов могут служить: бараночное тесто, пралиновые и трюфельные конфетные массы, какао тертое, мясной фарш.

Материалы, состояние течения которых во времени являются противоположным тому, какое дают тиксотропные системы, называют антитиксотропными, в соответствии с рисунком 25д.

Материалы, структура которых во времени упрочняется, обладают свойствами реопексии, в соответствии с рисунком 25е. Такие материалы, относимые иногда к антитиксотропным, относительно редко встречаются в нашей практике. Петли гистерезиса для этих материалов могут быть получены так же, как и для тиксотропных. При расчете технологических процессов тиксотропные свойства перерабатываемых пищевых сред учитывают в момент пуска оборудования после продолжительного выстоя, а реопексные – после интенсивного сдвига.

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

Большая группа пищевых материалов относится к так называемым вязко-упругим жидкостям, которые проявляют как вязкие, так и упругие свойства. Если в гукновском упругом теле напряжение, соответствующее определенной деформации, не зависит от времени, то в вязко-упругом теле напряжение постепенно падает. С другой стороны, вязко-упругие материалы текут подобно чистой вязким жидкостям, но часть их деформации при снятии напряжения постепенно восстанавливается. Примерами вязко-упругих жидкостей являются битумы, полимеры, мучное тесто. Вязко-упругий эффект проявляется в "разбухании" (увеличении поперечных размеров) жгутов теста и конфетных масс при выходе из формующих отверстий прессов макаронного и конфетного производства. Это является результатом частичного восстановления материала благодаря упругому последствию.

## 14 Определение физико-механических характеристик пищевых материалов из опыта на ползучесть

Реальные пищевые материалы обладают мгновенными упругими, запаздывающими упругими и остаточными деформациями. Поэтому простейшей моделью, с помощью которой можно описать поведение таких материалов, как тесто, конфетные массы и др., является модель, состоящая из последовательного соединения двух описанных выше двухэлементных моделей (рисунок 26). Развитие деформации во времени для реальных материалов при постоянном напряжении называется ползучестью, а графики зависимости деформации от времени - кривыми ползучести.

При мгновенном приложении напряжения  $\tau$  при  $t=0$  возникает мгновенная упругая деформация  $\gamma_1 = \tau/G_1$  (рисунок 26, отрезок  $OA$ ). Дальнейшее развитие деформации идёт по кривой  $AB$ . На этом участке одновременно развиваются

запаздывающая упругая деформация  $\gamma_2 = \frac{\tau}{G_2} \left( 1 - e^{-\frac{G_2}{\mu_2} t} \right)$  и деформация вяз-

кого течения  $\gamma_3 = \frac{\tau}{\mu_1} t$ . Через определённое время устанавливается прямолинейная

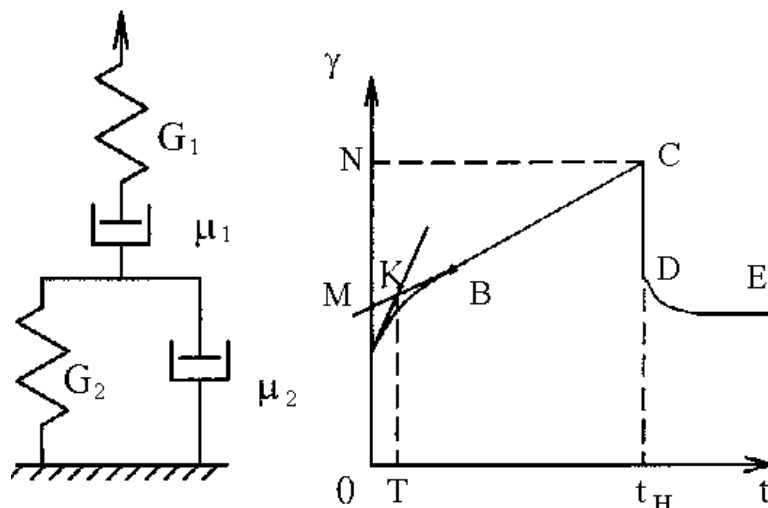


Рисунок 26 - Механическая модель и кривая ползучести пищевого материала

зависимость (рисунок 26, участок  $BC$ ), отвечающая установившемуся стационарному процессу необратимого вязкого течения при постоянном значении упругой деформации. На участке  $BC$  деформация нарастает с постоянной скоро-

стью, которая характеризуется тангенсом угла наклона прямой  $BC$  к оси абсцисс. Скорость течения пропорциональна напряжению  $\tau$  и обратнопропорциональна вязкости  $\mu$ . При  $t=t_H$  напряжение снимают, при этом исчезает мгновенная упругая деформация  $\gamma_1$  (отрезок  $CD=OA$ ), а затем монотонно убывает запаздывающая упругая деформация  $\gamma_2$ . С увеличением  $t$  кривая  $DE$  асимптотически приближается к конечному значению деформации, которая равна остаточной деформации вязкого течения  $\gamma_3$ .

Таким образом в период действия постоянного напряжения  $\tau$  при  $0 < t < t_H$  общая деформация определяется следующим выражением:

$$\gamma = \gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 = \frac{\tau}{G_1} + \frac{\tau}{G_2} \left( 1 - e^{-\frac{G_2}{\mu_2} t} \right) + \frac{\tau}{\mu_1} t, \quad (39)$$

в которое входят четыре физико-механические характеристики:

$G_1$  - модуль мгновенной упругой деформации;

$G_2$  - модуль запаздывающей упругой деформации;

$\mu_1$  - вязкость материала;

$\mu_2$  - вязкость упругого последействия.

За период нагружения  $t=t_H$  общая деформация  $\gamma$  согласно рисунка 26 соответствует отрезку  $ON$ , упругая деформация - отрезку  $OA$ , деформация вязкого течения  $G_3$  -  $MN$ , где точка  $M$  получается при пересечении отрезка  $BC$  с осью  $\gamma$ , деформация - отрезку  $AM$ . Характеристики  $G_1$  и  $\mu_1$  определяются с учётом равенства (39) по следующим формулам:

$$G_1 = \frac{\tau}{\gamma_1}, \quad (40)$$

$$\mu_1 = \frac{\tau \cdot t_H}{\gamma_3}. \quad (41)$$

Учитывая, что запаздывающая упругая деформация  $\gamma_2$  практически полностью завершается в точке  $B$ , модуль  $G_2$  можно определить:

$$G_2 = \frac{\tau}{\gamma_2}. \quad (42)$$

Вязкость упругого последействия  $\mu_2$  определяют следующим образом. Отношение  $\frac{\mu_2}{G_2}$  имеет физический смысл времени, в течение которого деформация  $\gamma_2$  достигает 63 % от максимального значения и носит название времени



релаксации  $T$ . Величина  $T$  определяется абсциссой точки пересечения касательной к кривой ползучести в точке  $A$  с прямой  $MBC$ . Объясняется это следующим.

Уравнение касательной в точке  $A$  имеет вид:

$$\gamma = \gamma_1 + \left( \frac{\tau}{G_2 T} + \frac{\tau}{\mu_1} \right) t, \quad (43)$$

а уравнение прямой  $MBC$  определяется выражением:

$$\gamma = \gamma_1 + \gamma_2 + \frac{\tau}{\mu_1} t \quad (44)$$

Приравнивая выражения (43) и (44), получим абсциссу точки пересечения  $t = T$ . Тогда

$$\mu_2 = G_2 T \quad (45)$$

С целью повышения точности определения физико-механических характеристик получают несколько кривых ползучести при различных напряжениях. Это даёт возможность, во-первых, проверить линейность зависимостей мгновенной упругой деформации, запаздывающей упругой деформации и скорости деформации вязкого течения от напряжения сдвига и, во-вторых, графически определить характеристики материала по результатам нескольких параллельных испытаний.

Примером использования характеристик материала является расчёт процесса нанесения рисунка на тестовую заготовку. Очевидно, что для сохранения рисунка необходимо, чтобы материал тестовой заготовки обладал остаточными деформациями, существенно превышающими упругие. Зная напряжение, действующее в материале при внедрении штампа, а также его физико-механические характеристики можно вычислить продолжительность силового воздействия на тестовую заготовку.

Простейшим видом испытания материала на ползучесть является сдвиг между двумя параллельными пластинами. Схема нагружения показана на рисунке 27, Образец материала заполняет пространство между горизонтальными пластинами (прибор Толстого). Поверхность пластин должна быть рифлёной для предотвращения проскальзывания материала по пластине. Площадь пластины -  $F$ , зазор между пластинами -  $H$ . Нижняя пластина неподвижна, а верхняя - связана с индикатором часового типа. Если к верхней пластине приложить нагрузку  $P$  в горизонтальном направлении, то на поверхности пластины возникнут касательные напряжения  $\tau$ , уравновешивающие приложенную нагрузку, то есть  $\tau = \frac{P}{F}$ . Под действием напряжения материал деформируется, и верхняя пластина получает смещение  $X$ , которое регистрируется индикатором часового

типа. Деформация сдвига определяется отношением смещения к зазору:  $\gamma = \frac{X}{H}$ . Наблюдая за развитием деформации во времени, получаем кривые ползучести исследуемого материала.

Для проведения исследований может быть использовано устройство в виде рифлёной пластины, помещённой в сосуд с параллельными стенками. К пластине прикладывается нагрузка, вытягивающая её из исследуемого материала (прибор Вейлера-Ребиндера). При этом в слое массы, находящейся между пластиной и стенками сосуда, возникают напряжения сдвига.

Целью работы является определение механических характеристик четырёхэлементной модели (рисунок 26) приличного теста при комнатной температуре.

#### 14.1 Описание экспериментальной установки прибора Толстого

На рисунке 28 показана кинематическая схема прибора Толстого, предназначенного для изучения ползучести при сдвиге. Прибор состоит из двух

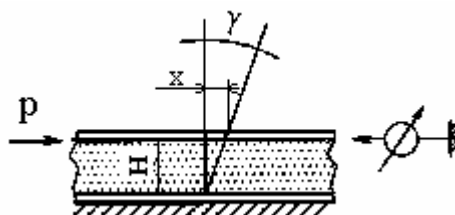


Рисунок 27 - Схема устройства для получения кривой ползучести пищевых материалов

рифлённых пластин 1 и 2, между которыми помещается исследуемая масса, нагружающего устройства, состоящего из рычагов 7, 10 и груза 8, ограничителя 9 и индикатора часового типа 4. Для закрепления нижней пластины 1 в гнезде 3 служит винт 12. Ограничитель 9 необходим для обеспечения строго горизонтального перемещения верхней пластины в процессе испытаний, Кулачок 5 и упор 6 предназначены для безударного приложения нагрузки к верхней пластине. Для ликвидации люфтов в рычажном механизме служит винт 11 промежуточного рычага 10.

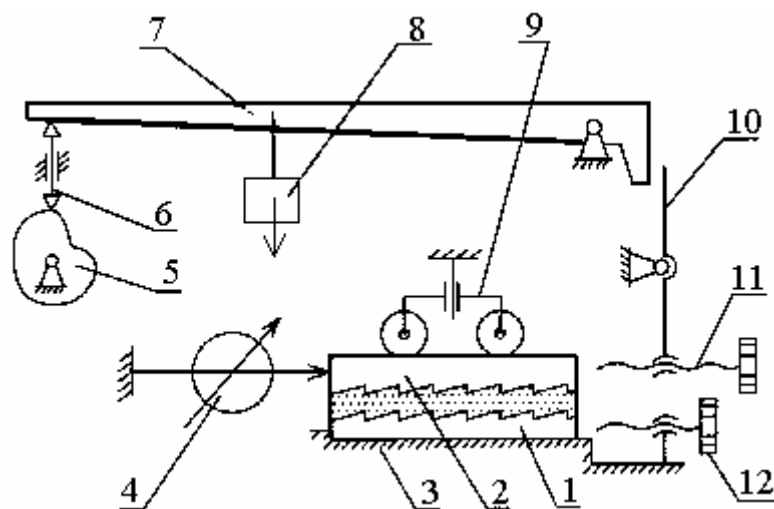


Рисунок 28 - Кинематическая схема прибора Д.М. Толстого

#### 14.2 Описание экспериментальной установки прибора Вейлера-Ребиндера

На рисунке 29 показана схема прибора Вейлера-Ребиндера. Прибор состоит из сосуда с параллельными стенками 1, рифлёной пластины 2 с хвостовиком, нагружающего устройства, представляющего собой груз 3, подвешенный на нити 4, перекинутой через блок 5, измерительного микроскопа 7, укрепленного на штативе 8. Для измерения перемещений на хвостовике пластины

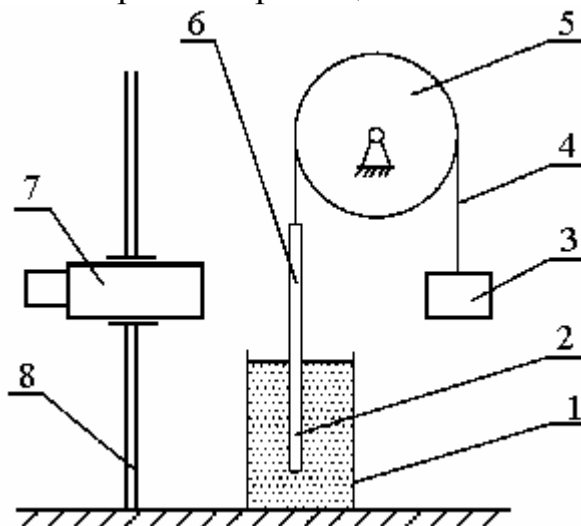


Рисунок 29 - Кинематическая схема прибора Вейлера-Ребиндера

нанесены риски, которые находятся в поле зрения измерительного микроскопа. Цена деления шкалы микроскопа – 0,1 мм.

## 15 Изучение ползучести пищевых материалов в условиях всестороннего осевого сжатия

При изготовлении изделий пищевой промышленности многие технологические операции осуществляются при избыточном давлении. В связи с этим возникает необходимость изучения физико-механических свойств пищевых масс в условиях всестороннего сжатия.

В условиях всестороннего сжатия в материале возникают относительные объемные деформации

$$\varepsilon = \frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta H}{H}, \quad (46)$$

где  $V$  - первоначальный объём материала, м<sup>3</sup>;

$\Delta V$  - изменение объёма, м<sup>3</sup>;

$H$  - высота слоя материала, м;

$\Delta H$  - изменение высоты слоя материала, м.

Деформационные процессы, происходящие с материалом в условиях объёмного сжатия аналогичны процессам при сдвиге, подробно описанным в предыдущем разделе. Так, деформационное поведение пищевых масс при объёмном сжатии можно описать с помощью четырёхэлементной модели, для которой общая деформация подсчитывается по формуле

$$\varepsilon = \varepsilon_{V1} + \varepsilon_{V2} + \varepsilon_{V3} = \frac{P}{E_{V1}} + \frac{P}{E_{V2}} \left( 1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) + \frac{P}{\eta_{V1}} t, \quad (47)$$

где  $\varepsilon_{V1}$  - мгновенная упругая деформация;

$\varepsilon_{V2}$  - запаздывающая упругая деформация;

$\varepsilon_{V3}$  - пластическая деформация;

$p$  - всестороннее давление, Па;

$E_{V1}$  - модуль мгновенной упругой объёмной деформации, Па;

$E_{V2}$  - модуль запаздывающей упругой объёмной деформации, Па,

$\eta_{V1}$  - объёмная вязкость, Па·с ;

$\eta_{V2}$  - объёмная вязкость упругого последствия, Па;

$T$  - период релаксации, с .

Физико-механические постоянные материала определяют на основании экспериментальных исследований материала на ползучесть – деформирование материала при постоянном напряжении.

Типичная кривая ползучести при всестороннем сжатии показана на рисунке 30. Отрезок  $OA$  характеризует мгновенную упругую деформацию, модуль которой можно подсчитать по формуле

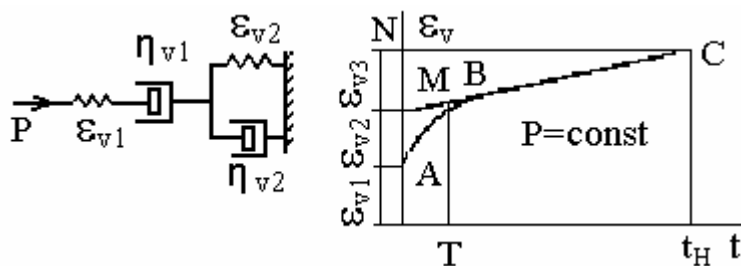


Рисунок 30 - Механическая модель и кривая ползучести пищевого материала при всестороннем сжатии

На участке  $AB$  происходит запаздывающая и пластическая деформации, параметры которой можно рассчитать следующим образом

$$E_{V2} = \frac{P}{\varepsilon_{V2}}, \text{ Па} \quad (48)$$

Период релаксации  $T$  определяется графически, как абсцисса точки пересечения касательной к кривой в точке  $A$  и прямой, являющейся продолжением участка вязкого течения  $BC$ . Тогда объёмная вязкость упругого последствия равна

$$\eta_{V2} = E_{V2}T, \text{ Па}\cdot\text{с} \quad (49)$$

Объёмную вязкость можно подсчитать по формуле

$$\eta_{V1} = \frac{P}{\varepsilon_{V3}}t_H, \text{ Па}\cdot\text{с} \quad (50)$$

Для повышения точности расчёта обычно строят семейство кривых при различных давлениях и характеристики материала определяют путём их совместной обработки.

Особый интерес представляет изучение ползучести при осевом сжатии. Такой вид деформации встречается, например, при нанесении рисунка на тестовые заготовки при производстве печенья. Процессы всестороннего и осевого сжатия имеют много общего. В связи с этим данное выше описание процесса деформирования справедливо и для осевого сжатия.

Например, уравнение (47) в случае осевого сжатия приобретает вид

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{E_2} \left( 1 - e^{-\frac{t}{T}} \right) + \frac{\sigma}{\eta_1} t, \quad (51)$$

где  $\sigma$  - напряжение при сжатии образца, определяется отношением нагрузки к площади поперечного сечения образца материала.

В отличие от всестороннего сжатия ползучесть при осевом сжатии можно исследовать лишь для таких материалов, которые способны сохранять форму не деформируясь под действием сил тяжести.

Таким образом, целью данной работы является определение физико-механических характеристик пряничного теста из опыта на ползучесть при всестороннем сжатии или в условиях осевого сжатия.

### 15.1 Описание экспериментальной установки и методика проведения исследований

Схема установки для изучения ползучести пищевых материалов в условиях всестороннего сжатия показана на рисунке 31.

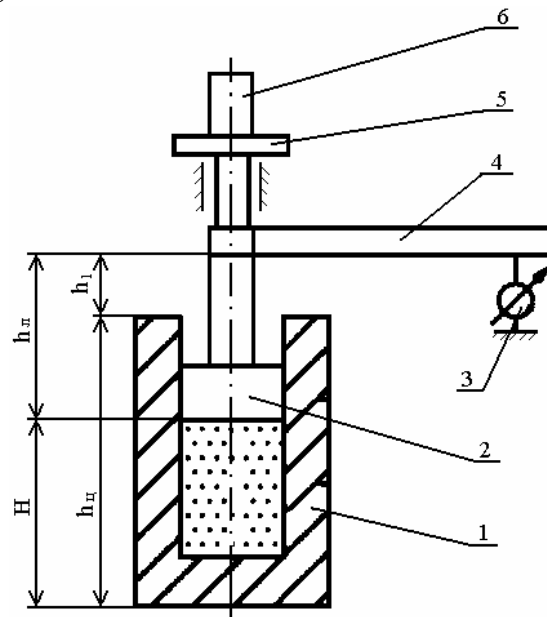
Методика опыта состоит в следующем. Исследуемый материал помещают в цилиндр 1, сверху устанавливают поршень 2, легко уплотняют материал и глубиномером определяют высоту  $h_1$ . После того планку 4 поршня 2 приводят в соприкосновение со штоком индикатора часового типа 3 и устанавливают его шкалу на нуль. Далее одновременно опускают гирю на столик для груза, включают секундомер и отмечают первое показание индикатора (в течение первой секунды). Затем показания индикатора отмечают через определенные промежутки времени и записывают в таблицу результатов наблюдений.

Схема установки для изучения ползучести при осевом сжатии показана на рисунке 32. Особенности методики проведения опытов заключаются в следующем.

Перед началом измерений готовят образцы из исследуемого материала с помощью специального приспособления, которое представляет собой короткий полый цилиндр определённых размеров. Для этого из фольги или другого материала, отличающегося малым прилипанием к исследуемому материалу, вырезают полоску шириной, равной высоте цилиндра, и длиной, равной длине окружности внутренней поверхности цилиндра. Полоску помещают в цилиндр и прижимают её к внутренней поверхности цилиндра. Затем порцию массы помещают в полость цилиндра, предварительно поставив его на ровную гладкую поверхность, уплотняют массу и выравнивают её поверхность, убирая излишки массы. Далее аккуратно вынимают порцию массы из цилиндра и снимают полоску фольги. Таким образом, получают образец, диаметр которого равен внутреннему диаметру цилиндра, а высота равна высоте цилиндра.

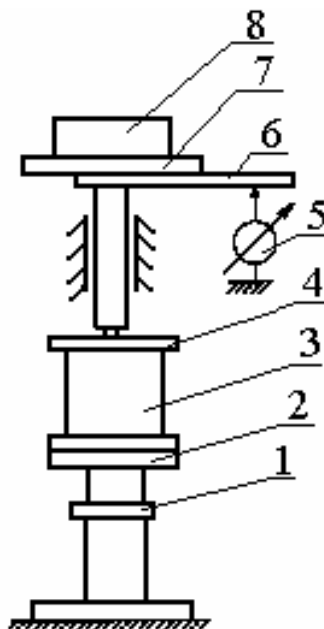
После этого устанавливают упор, фиксирующий положение площадки с грузом (на схеме не показан). Далее образец 3 помещают на подъёмный столик 2, накрывают лёгким диском 4 и, вращая гайку 1 подъёмного столика 2, подни-

мают образец до соприкосновения со штоком 9. На площадку 7 устанавливают груз 8 нужной массы и, быстро убирая упор, включают секундомер и отмечают показания индикатора, как описано выше.



1 - цилиндр, 2 – поршень, 3 - индикатор часового типа, 4 - планка, 5 – столик для груза, 6 - груз.

Рисунок 31 - Схема экспериментальной установки



1 - гайка, 2 - столик подъемный, 3 - образец, 4 - диск, 5 – индикатор, 6 - планка, 7 - площадка, 8 - груз.

Рисунок 32 - Схема экспериментальной установки

## 16 Определение предельного напряжения сдвига пищевых материалов

Предельным напряжением сдвига или пределом текучести называется минимальное напряжение, при котором происходит пластическое или вязкое течение материала. Эта физико-механическая величина характерна не только для металлов и других конструкционных материалов, но и для многочисленного класса реальных материалов, в том числе и пищевых, которые по своим свойствам занимают промежуточное положение между твёрдыми упругими телами и вязкими жидкостями.

На рисунке 33 показана зависимость касательных напряжений  $\tau$  от сдвиговых деформаций  $\gamma$ , характерная для испытания на сдвиг пластичного материала. Как видно из рисунка 33, при  $\tau < \tau_0$  в материале развиваются только упругие деформации. При  $\tau \geq \tau_0$  наблюдается пластическое течение материала, т.е. изменение деформации во времени при постоянном напряжении.

Для пластичных материалов, например для малоуглеродистой стали, процесс пластического течения не безграничен, так как наступает упрочнение. При деформировании пищевых материалов упрочнение отсутствует. Более того, может наблюдаться постепенное уменьшение напряжения при значительной деформации.

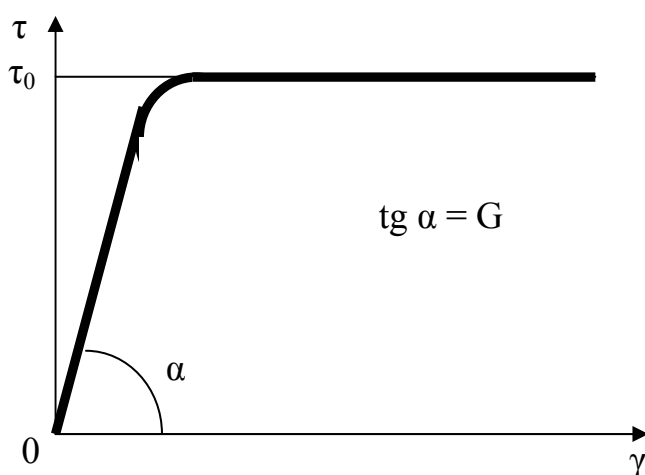


Рисунок 33 – Диаграмма нагружения при сдвиге

Предельное напряжение сдвига является физико-механической константой и входит в реологическое уравнение течения большой группы так называемых бингамовских материалов, к которым, в частности, относятся пралиновые конфетные массы,



Кроме того, предельное напряжение сдвига имеет также и самостоятельный интерес. Так,  $\tau_0$  определяет способность материала сохранять свою форму под действием сил тяжести. Это имеет значение, например, при формовании конфетных масс выпрессовыванием. Корпуса конфет из масс, обладающих малым предельным напряжением сдвига, под действием сил тяжести деформируются, что приводит к большим возвратным отходам.

Наиболее простым методом определения величины предельного напряжения сдвига  $\tau_0$  является метод внедрения в материал конуса. С погружением конуса в массу растёт поверхность, по которой действуют напряжения сдвига  $\tau$ , которые при этом постепенно уменьшаются. Наконец, при определённой глубине погружения наступает остановка. В этот момент  $\tau = \tau_0$ .

Рассмотрим силы, действующие на конус при погружении в испытываемую среду (рисунок 34).

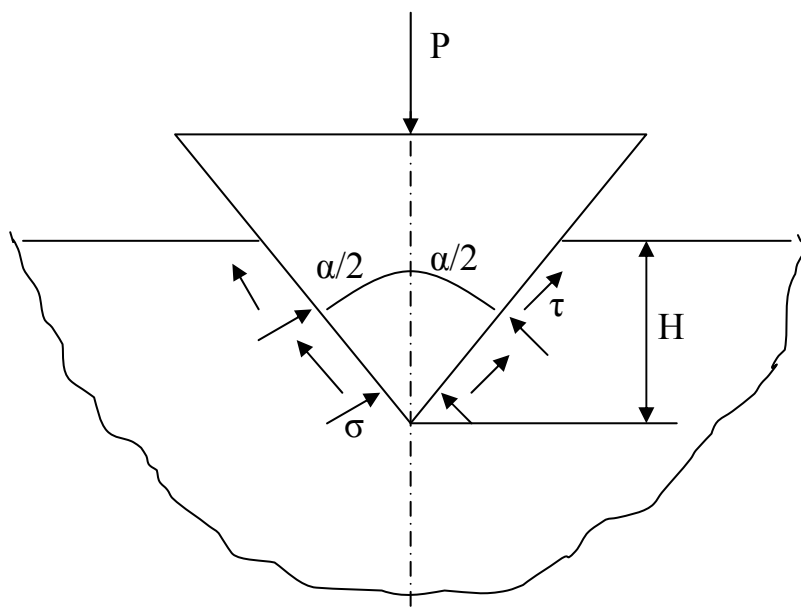


Рисунок 34 - Схема нагружения конуса при внедрении в исследуемый материал

Сила  $P$  приложенная вдоль оси конуса уравнивается напряжением, возникающим на его поверхности  $S$ , соприкасающейся с материалом. Полное напряжение  $p$  определяется суммой нормального  $\sigma$  и касательного  $\tau$  напряжений. Учитывая, что

$$S = \pi \cdot R \cdot L \quad (52)$$

где  $R$  - радиус основания догруженной части конуса;  
 $L$  - образующая этой части.

Полное напряжение  $p$ , Па равно

$$p = \frac{\tau}{\cos \frac{\alpha}{2}} \quad (53)$$

Условие равновесия будет иметь вид:

$$P = \left( \frac{\tau_0}{\cos \frac{\alpha}{2}} \right) \cdot S, \text{ Н} \quad (54)$$

Выражая R и L через глубину погружения H, и подставляя в (54) получим:

$$P = \left( \frac{\tau_0}{\cos \frac{\alpha}{2}} \right) \cdot \pi \cdot H \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \cdot \frac{H}{\cos \frac{\alpha}{2}}, \text{ Н} \quad (55)$$

Решая уравнение (55) относительно  $\tau_0$  получим расчётную формулу (56)

$$\tau_0 = K \cdot \frac{P}{H^2}, \text{ Па} \quad (56)$$

$$K = \frac{1}{\pi} \cdot \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2} \cdot \cos^2 \frac{\alpha}{2} \quad (57)$$

Известно, что при использовании конусов с различными углами для определения предельного напряжения сдвига многих реальных пищевых материалов в результате опытов получают различные значения  $\tau_0$ . Следовательно, величина  $\tau_0$  не инвариантна по отношению к форме конуса.

В таких случаях, очевидно, определяемая характеристика является не абсолютной физической константой материала, а относительной величиной, характерной только для определённого конуса. Использование таких величин возможно при сравнении физико-механических свойств материалов или при определении иных свойств материалов, если известна связь относительной величины, например, с качественными параметрами материала.

Целью работы является определение  $\tau_0$  с помощью конусов с различным углом и проверка зависимости предельного напряжения сдвига от угла конуса.

## 16.1 Описание экспериментальной установки

Опыты проводятся на коническом пластометре КП-3, схема которого приведена на рисунке 35.

Основным узлом прибора является конус 7, укрепленный с помощью стопорного винта 8 на нижнем конце штанги 9, которая может перемещаться в вертикальном направлении в обойме с подшипниками 10. Штанга имеет диск 12 для установки рабочей нагрузки 13. Обойма, в которой движется штанга с

конусом, закреплена в П - образной станине 2, стоящей на плите 1 - основании прибора. На плите под конусом расположен столик 5, на котором устанавливается ёмкость 6 с исследуемой массой. Столик снабжён подъёмным винтовым механизмом, состоящим из винта 4 и гайки 3.

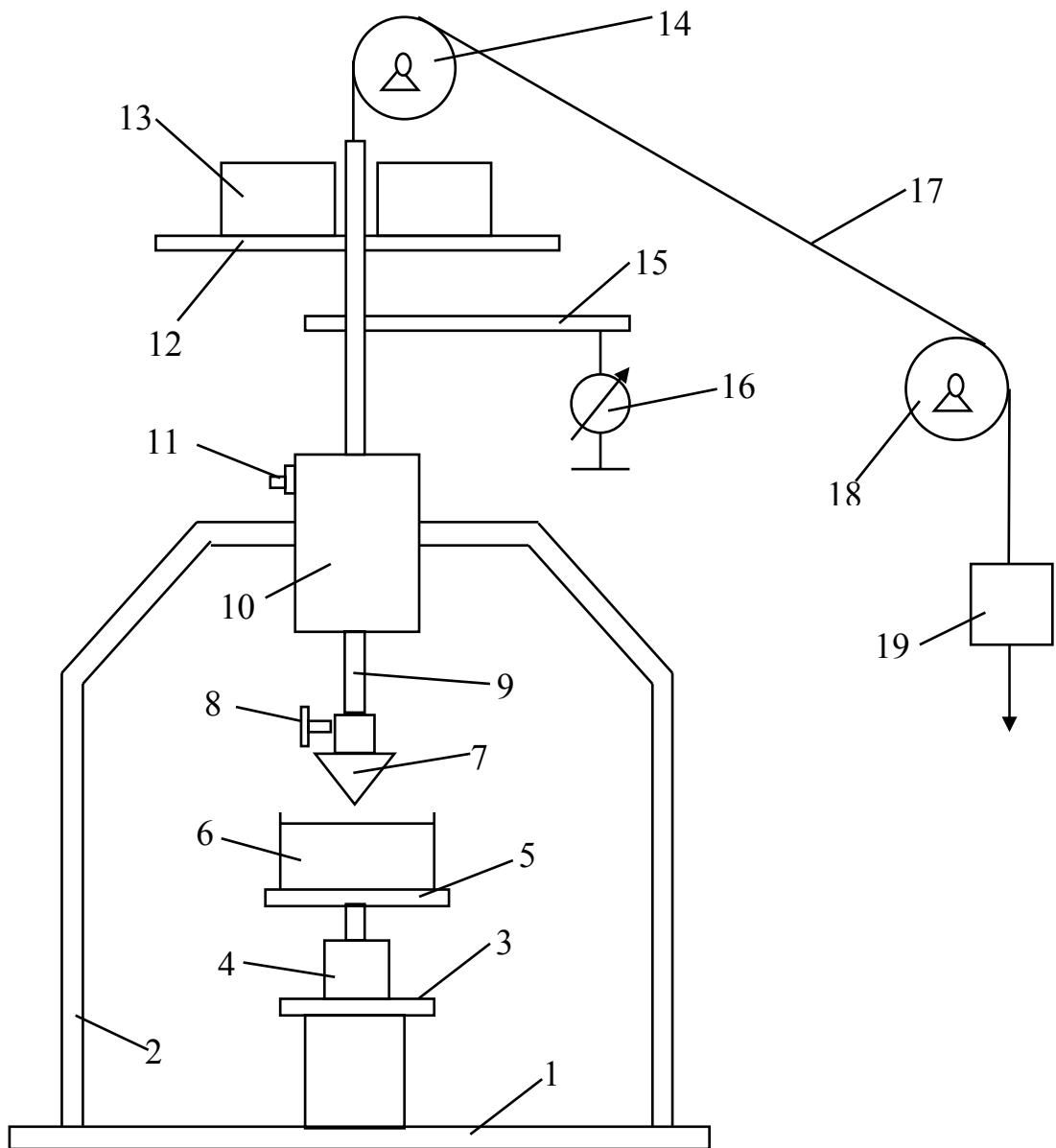


Рисунок 35 - Схема конического пластометра типа КП-3

Для определения глубины погружения конуса имеется жёстко связанный со станиной и упирающийся в движущуюся со штангой пластину 15 индикатор часового типа 16 с ценой деления 0,01 мм. Нагружающее устройство, состоящее из конуса, штанги и грузов, имеет стопор 11, позволяющий удерживать конус перед погружением в массу. Штанга с конусом уравнивается нагрузкой 19, для чего к верхнему концу штанги присоединяют нить 17, перекинутую через блоки 14 и 18. Масса отдельных частей пластометра приведена в таблице 2.

Таблица 2 - Масса отдельных частей пластометра

Угол конуса, град	Масса штанги, г	Масса конусов, г	Масса уравнивающих грузов, г	Масса подвеса, г	Рабочая нагрузка, г
30	288	47	279	-	-
45	-	37	-	-	-
60	-	31	-	-	-
90	-	59	-	-	-

## 16.2 Методика проведения исследований

### 16.2.1 Подготовка образцов

Пряничное тесто помещают в специальные металлические ёмкости, слегка уплотняют и выравнивают поверхность так, чтобы края ёмкости находились на одном уровне с поверхностью теста. Ёмкости закрывают крышками, помещают в термостат и выдерживают при температуре опыта до его начала, но не менее 30 мин. Для проведения опыта необходимо приготовить 5 - 8 образцов в зависимости от количества измерений.

### 16.2.2 Подготовка прибора к работе

Конический пластометр устанавливают по уровню на столе так, чтобы исключить возможные толчки и колебания прибора во время работы и проверяют наличие всех составных и дополнительных частей и инструментов.

Устанавливают необходимой конус, для чего вставляют его хвостовик в отверстие штанги и фиксируют стопорным винтом. По таблице 2 определяют величину уравнивающей нагрузки, устанавливают её на грузовой площадке и проверяют начальное показание индикатора, которое должно находиться в пределах 7,1 - 7,3 мм. На подвижный столик устанавливают испытуемый образец массы и, вращая винт подъёмного механизма, приводят в соприкосновение поверхность массы и остриё конуса.

### 16.2.3 Проведение измерений

В таблицу 3 записывают порядковый номер опыта, угол конуса, уравнивающую нагрузку, рабочую нагрузку и начальное показание индикатора. Засекают время опыта и одновременно нажимают стопорную кнопку и не отпускают её до тех пор, пока показание индикатора не превысит 12 мм. В противном случае пружина кнопки будет воздействовать на штангу, затрудняя её движения. Во время погружения конуса наблюдают за индикатором. Через 2

мин после начала опыта фиксируют показания индикатора, записывают его в таблицу наблюдений и поднимают штангу вверх до щелчка. Вращая винт подъёмного механизма, опускают столик и перемещают образец так, чтобы расстояние от следа конуса до нового его положения составило не менее 10 мм, затем вновь вращают винт подъёмного механизма и приводят в соприкосновение остриё конуса с массой, таким образом, прибор готов для очередного измерения.

После выполнения измерений с первым конусом, его снимают, освобождая стопорный винт, и устанавливают второй конус. После этого повторяют все действия, описанные выше.

Таблица 3 – Результаты наблюдения

Угол конуса, град	Уравновешивающая нагрузка	Рабочая нагрузка	Показания индикатора		Глубина погружения конуса
			начальное	конечное	

## 17 Изучение адгезионных свойств пищевых масс

При проектировании и расчете механизмов и машин и технологических процессов, а также для выбора конструкционного материала и определения технологических режимов работы оборудования, необходимо знать силы взаимодействия между обрабатываемой пищевой массой и поверхностью рабочих органов. Адгезия (липкость), определяющая поверхностные свойства пищевых масс, проявляется на границе раздела между продуктом и твёрдой поверхностью. Адгезия имеет существенное значение в процессе производства пищевых масс, особенно в тех случаях, где возможен контакт между массой и поверхностью обрабатывающей машины. В настоящее время адгезии уделяют большое внимание, особенно при проектировании нового оборудования. Адгезия пищевых масс изучена сравнительно мало, т.к. на её величину влияют многие факторы, такие как температура и влажность массы, геометрические, кинематические и динамические условия, время контактирования массы с поверхностью машины.

Приборы, которые позволяют определить адгезионные свойства пищевых масс, называются адгезиометрами. В большинстве своём адгезиометры выполнены в единичных экземплярах и используются для исследований каких-то определённых масс: кондитерских, мясных и молочных, хлебопекарных и др. По принципу действия адгезиометры делятся на две группы. Первая группа приборов характерна тем, что нарушение контакта происходит одновременно на всех участках площади (рисунок 36). Во второй группе нарушение контакта происходит путём последовательного отрыва отдельных участков, т.е. расслоением, отдираанием (рисунок 37).

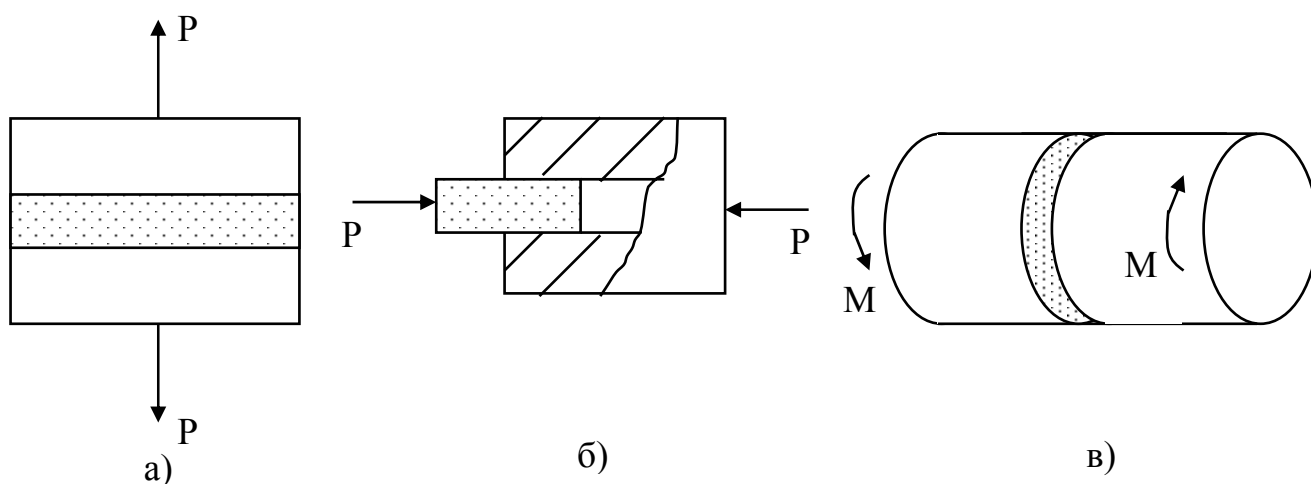


Рисунок 36 – Адгезиометры с одновременным нарушением контакта на всех участках площади

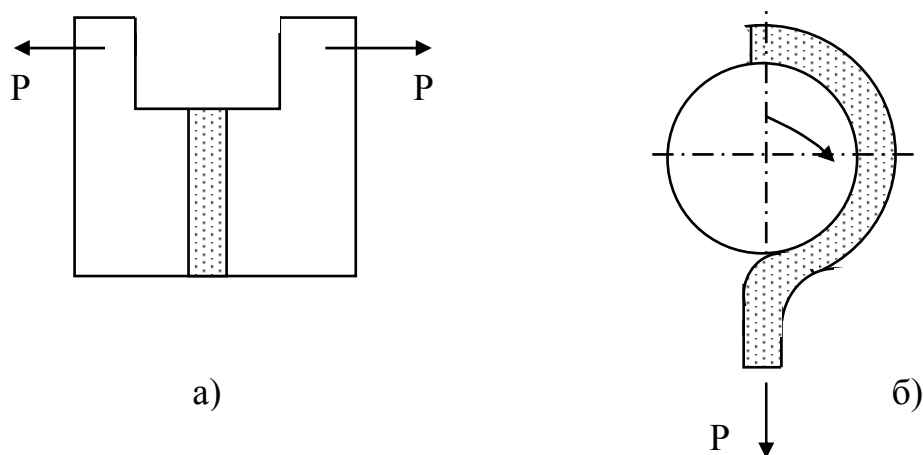


Рисунок 37 - Адгезиометры с последовательным отрывом отдельных участков

Оба метода определения адгезионной прочности нашли практическое применение.

При первом методе нагрузка может быть приложена в направлении как перпендикулярном к плоскости контакта поверхностей, так и параллельном ей. Нагрузку в данном случае относят к единице площади поверхности контакта. Во втором методе нагрузку, необходимую для расслоения склейки, относят к единице длины. Наибольшее распространение в адгезиометрах получила схема а, изображённая на рисунке 36.

Целью данной работы является определение зависимости адгезионного напряжения от продолжительности контакта при различном напряжении контакта.

### 17.1 Описание экспериментальной установки

На рисунке 38 показана кинематическая схема прибора, предназначенного для изучения адгезионных свойств пищевых масс. Работа прибора основана на принципе отрыва конструкционного материала (субстрата) от пищевой массы (адгезива). В основе конструкции прибора (адгезиометра) использованы технические весы. Исследуемая масса помещается в емкость 1, которая устанавливается на основание весов. Стальной диск 2 вводят в контакт с массой некоторым постоянным усилием, которое создаётся грузом 4, установленным на площадке 3. Усилие отрыва диска 2 от пищевой массы определяется массой груза 8, который помещается в чаше 7 весов. В нерабочем положении коромысло 5 весов лежит на двух опорах 6. Чтобы привести весы в рабочее положение, необходимо при помощи рукоятки повернуть кулачок 10 на 1/4 оборота, который поднимает штангу 9 вместе с коромыслом 5. Перед проведением эксперимента весы уравниваются.

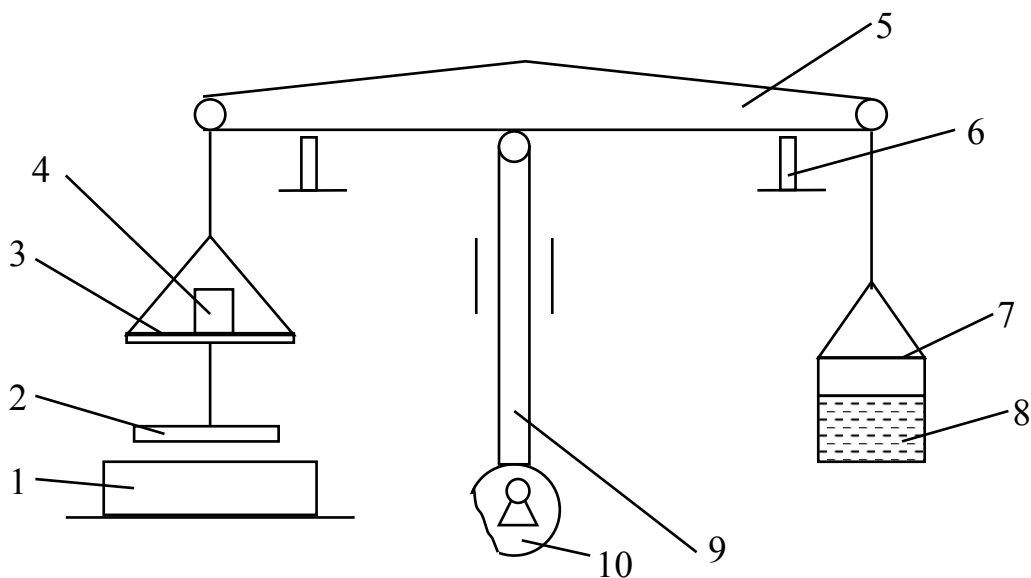


Рисунок 38 - Схема экспериментальной установки

## 17.2 Методика проведения исследований

Для исследований адгезионных свойств пищевой массы необходимо небольшое количество массы поместить ровным слоем в ёмкость 1 так, чтобы она немного выступала над уровнем её краёв. Далее аккуратно накрывают массу пластинкой (из органического стекла) и лёгким нажатием уплотняют массу до тех пор, пока поверхность её не станет ровной. После этого ёмкость с массой устанавливают на основание весов под диском 2. На площадку 3 помещают груз минимальной массы, например, 50 г, чему соответствует усилие контакта  $P_{\text{кон}} = 0,5 \text{ Н}$ . Плавно поворачивают кулачок 10 и приводят прибор в рабочее положение, при этом диск 2 входит в контакт с массой. Через определённое время в чашу 7 весов наливают воду из мерного цилиндра, в который предварительно наливают 400 мл воды, до тех пор, пока не произойдёт отрыв диска 2 от массы. По количеству вылитой воды из цилиндра определяют усилие отрыва  $P_{\text{отр}}$ . Причём

$$P_{\text{отр}} = \rho \cdot g \cdot V = 0.01V \quad (58)$$

где  $\rho$  - плотность воды,  $1000 \text{ кг/м}^3$ ;

$g$  - ускорение силы тяжести,  $\sim 10 \text{ м/с}^2$  ;

$V$  - объём воды, вылитой из цилиндра, мл.

После окончания эксперимента воду из чашки наливают обратно в мерный цилиндр и повторяют эксперимент с той же массой и тем же грузом, но при другом времени контактирования (20, 30, 60, 90, 120 и 180 с). По окончании этой серии экспериментов проводят эксперименты с грузами массой 100, 150 и 200 г.



## 18 Определение ударной вязкости готовых изделий

При укладке, завёртке, упаковке и транспортировке готовых, например, кондитерских изделий должны быть обеспечены условия сохранения их товарного вида. С этой целью нужно знать механические характеристики готовых изделий.

Одной из механических характеристик прочности при динамических нагрузках является ударная вязкость.

Напряжения и деформации при ударной нагрузке существенно превышают напряжения и деформации, получаемые при статическом нагружении упругой системы той же по величине силой.

При ударе частицы упругой системы начинают перемещаться. Из-за инерционности материала перемещение частиц происходит не одновременно, а в виде волны деформаций, движущейся со скоростью распространения звука в данной среде. Одновременно с увеличением напряжений и деформаций при ударной нагрузке упругой системы изменяется также сопротивляемость материалов ударному воздействию.

Точных способов определения сопротивляемости материалов ударному воздействию пока не имеется в виду сложности процесса соударения тел.

В настоящее время широко распространён лишь один вид испытания на удар, а именно - определение количества энергии, идущей на разрушение образца материала.

Образец материала разрушают изгибающим ударом. Критерием способности материала противостоять удару является удельная ударная вязкость  $a$ . Она равна величине энергии  $u$ , затрачиваемой на разрушение образца, отнесённой к площади поперечного сечения образца  $F = h \cdot B$ , где  $h$  и  $B$  - размеры поперечного сечения по месту разрушения. Считая, что эта энергия равна работе внешних сил, получили

$$a = \frac{A}{F}, \text{ Н} \cdot \text{м}/\text{м}^2 \quad (59)$$

Целью работы является:

- 1) ознакомление с устройством типа маятникового копра для измерения энергии разрушения при ударе;
- 2) определение ударной вязкости печенья;
- 3) определение доверительного интервала для средней величины ударной вязкости.

### 18.1 Описание экспериментальной установки

На рисунке 39 представлено устройство для измерения энергии разрушения печенья. Основным рабочим органом устройства является маятник 7, подвешенный между стойками 1 и 2 на оси 5. На этой оси закреплена градуиро-

ванная шкала 6, которая поворачивается вместе с маятником. Угол поворота маятника фиксируется на шкале с помощью неподвижной стрелки, укрепленной на стойке 1. С другой стороны маятника на его оси свободно установлена поворотная градуированная шкала 3, которая поворачивается в направлении рабочего хода маятника при взаимодействии со специальным пальцем, закрепленным на маятнике. Величина поворота, а следовательно, и максимального отклонения маятника от вертикали отличается с помощью неподвижной указательной стрелки 4 на стойке 1.

На оси качания маятника имеется храповое колесо, которое взаимодействует с подпружиненной собачкой. Это устройство позволяет зафиксировать маятник при взводе после поворота его на заданный угол. Выведение собачки из зацепления с храповым колесом - и тем самым освобождение маятника осуществляется вручную с помощью кулачка и рычага, расположенного на стойке 2 внизу.

На стойках имеются опоры 9 и 10 для размещения на них испытуемого образца 8. Для установки прибора строго по отвесу предусмотрены три регулировочных винта 11.

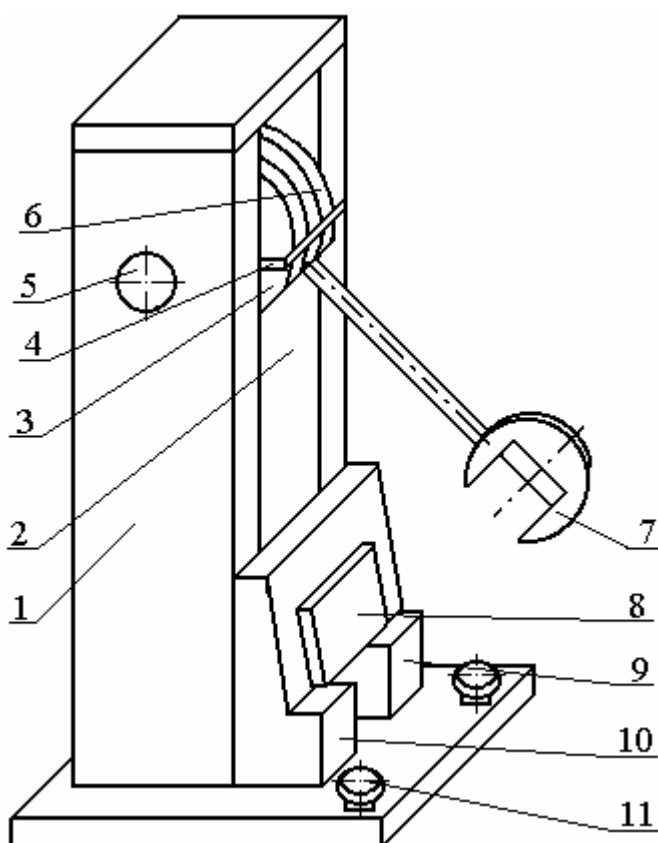


Рисунок 39 - Схема устройства для определения ударной вязкости

## 18.2 Методика проведения исследований

### 18.3.1 Порядок проведения испытаний

Вначале определяется работа потерь маятника при холостом ходе. Маятник отклоняют на неопределённый угол  $\alpha$  отсчитываемый от вертикали и фиксируемый по шкале 6. Затем собачка выводится из зацепления с храповым колесом, и маятник под действием собственного веса начинает падать, одновременно поворачивая шкалу 3. Угол взлёта, отсчитываемый от вертикали, фиксируется на этой шкале, затем на опоры 10 и 12 кладут печенье, снова поднимают маятник на угол  $\alpha$  и отпускают его.

При падении маятник разбивает лежащее на его пути печенье и за счёт, оставшегося запаса кинетической энергии продолжает перемещаться. Конечный угол взлёта  $\beta$  отмечается на шкале 3. Работа, затраченная на разрушение печенья, определяется зависимостью

$$A = mgl \left( \cos \beta - \cos \alpha - (\cos \gamma - \cos \alpha) \frac{\alpha + \beta}{\alpha + \gamma} \right) \quad (60)$$

где  $\alpha$  - угол подъёма маятника;

$m$  - масса маятника, кг;

$l$  - приведенная длина маятника;

$\gamma$  - угол взлёта маятника при холостом ходе;

$\beta$  - угол взлёта маятника после разрушения образца (рисунок 40)

Чтобы определить приведенную длину маятника, экспериментально определим период качания маятника  $T$ . Зная период качания маятника  $T$ , по формуле (61) находим приведенную длину маятника

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}, \text{ с} \quad (61)$$

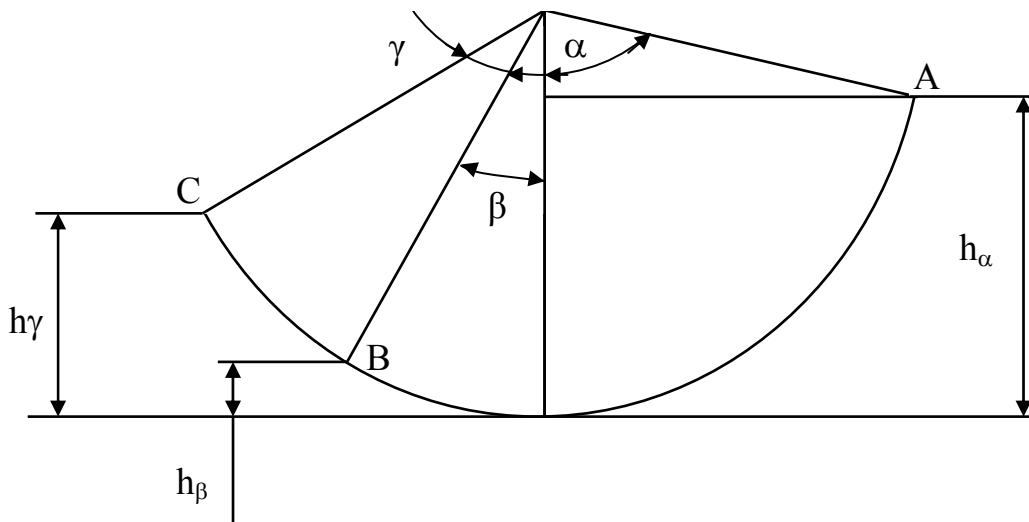


Рисунок 40 - Схема движения маятника при ударе

## 19 Ротационные вискозиметры. Определение физико-механических характеристик пищевых материалов на ротационном вискозиметре РВ-4

### 19.1 Конструкции ротационных вискозиметров

**Реометр Штормера** (рисунок 41) является наиболее простым прибором, на котором измеряют частоту вращения рабочего ротора за определенное время при постоянном напряжении сдвига. Принцип работы прибора следующий. Испытуемый материал помещают в неподвижный внешний цилиндр 1, затем поднимают его на штативе 8 до такого положения, при котором вращающийся внутренний цилиндр 2 погрузится на определенную высоту в материал. Вращение цилиндра осуществляется за счет падающего груза 7, подвешенного на нити, перекинутой через блок 6 и барабан 5. Момент от барабана передается через зубчатую передачу 4 на ось рабочего цилиндра. Таким образом, испытание проводится при известном крутящем моменте (напряжении сдвига), а частоту вращения ротора определяют по счетчику 3. Большим преимуществом такого прибора является простота конструкции, а недостатком - короткое время для замера, равное продолжительности падения груза.

**Вискозиметр Гатчека** (рисунок 42) классический реометр, в котором приводится во вращение внешний цилиндр 1, а замеряется угол поворота внутреннего цилиндра 2, подвешенного на упругой нити 5. Угол поворота измеряется по отклонению светового луча при помощи зеркала 4, прикрепленного к нити. Вращение цилиндра 1 с пищевой массой осуществляется приводом 3.

**Вискозиметр Реутова** (рисунок 43) нашел широкое применение в практике технологических лабораторий кондитерских предприятий. На нем определяется вязкость шоколада и других маловязких жидкообразных масс. От электродвигателя, установленного в корпусе 7, через редуктор вращение передается на подставку 6, на которую устанавливают стакан 5 с испытуемым продуктом. В образец массы погружен свободно подвешенный на валике 4 металлический ротор в форме цилиндра с коническими торцовыми поверхностями. Валик укреплен в вилке, являющейся частью стержня 3. Стержень механически связан с пластинкой, на которой укреплен противовес 2. Поворот стержня фиксирует стрелка показывающего прибора 1.

**Вискозиметр Воларовича РВ-8** предназначен для испытания относительно вязких материалов и используется для определения вязкости и предельного напряжения сдвига широкого круга пищевых материалов: мучного теста, полуфабрикатов хлебопекарного производства, различных видов мясного и рыбного фарша, плодово-ягодной мезги, абрикосового сока, томатных концентратов, конфетной массы пралине и ирисной, сахарно-паточно-молочного сиропа и молочной помады, эмульсий для сахарного и затяжного печенья, какао тертого, теста для пирожных и т.д. Опыты могут вестись при температуре от 60 до 150 °С. Пределы измерения вязкости - от 0,5 до 10<sup>6</sup> Па·с, напряжение сдвига от 5 до 10<sup>4</sup> Па. /9/

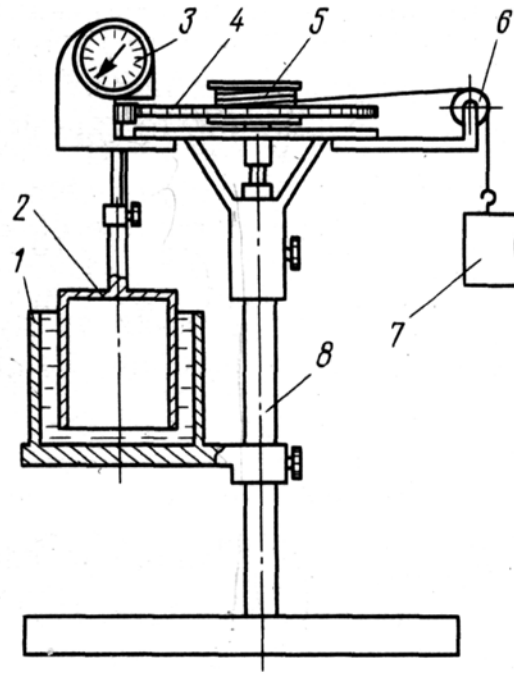


Рисунок 41 - Вискозиметр Штормера

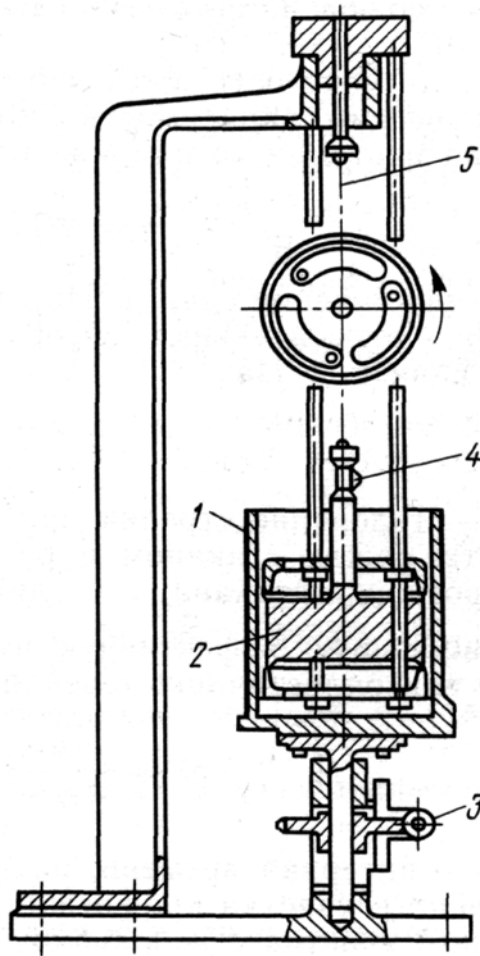


Рисунок 42 - Вискозиметр Гатчека

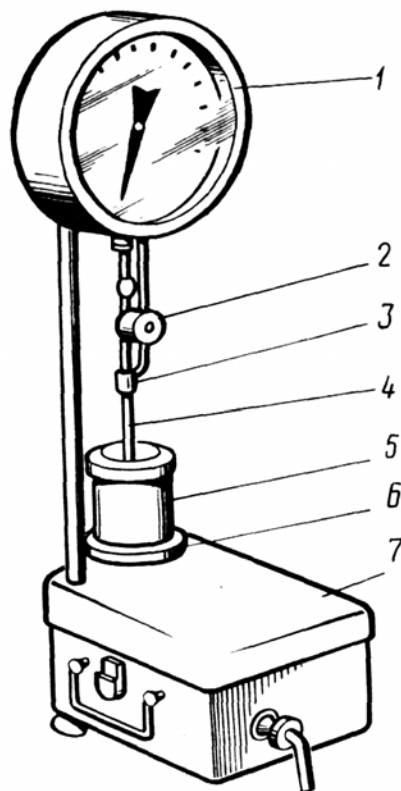


Рисунок 43 - Вискозиметр Реутова

Наружный цилиндр ( $R_H = 1,9$  см) неподвижен. Внутренний цилиндр ( $R_B = 0,605$  см) приводится во вращение при помощи падающих грузов. Длина ротора  $L_B = 8$  см. Отсчет углов поворота производится визуально по шкале и указателю с использованием секундомера. /5/

Схема вискозиметра РВ-8 представлена на рисунке 44. Внутренний ротор 5 с полусферическим дном установлен внутри неподвижного наружного цилиндра 6. Переходная втулка соединяет внутренний ротор с валом 2, который вращается на двух шариковых подшипниках, установленных в установочной шайбе. На верхнем конце вала закреплен шкив 1, который стопорится специальным фиксатором 9. При нажатии на фиксатор шкив с цилиндром освобождаются и приводятся во вращение под действием падающих грузов, подвешенных на тросе через балку 3. Угол поворота цилиндра определяется по перемещению стрелки 11 на неподвижной шкале 10. Время вращения ротора определяется по секундомеру. Наружный цилиндр закреплен в текстолитовой шайбе и застопорен в ней штифтами. Стенки сосуда 4 покрыты теплоизоляционным материалом 8, в них закреплены электронагревательные элементы 7. Для испытаний при температуре ниже комнатной термостат заполняют керосином или

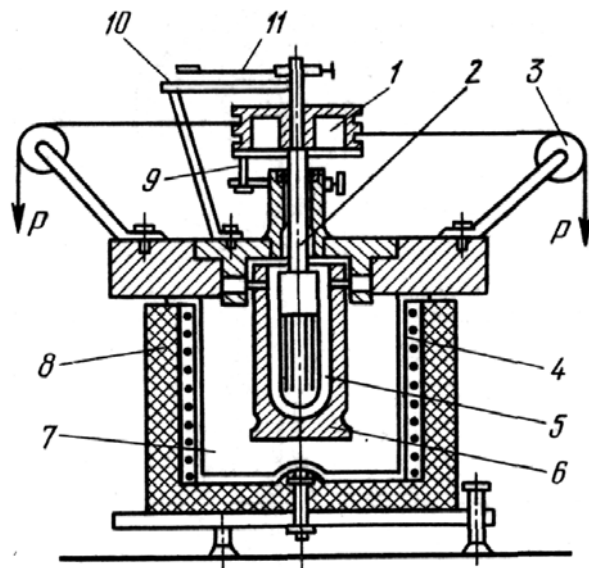


Рисунок 44 - Вискозиметр Воларовича РВ-8

спиртом, в который бросают кусочки твердой углекислоты. Вискозиметр РВ-8 существенно не отличается от РВ-7.

**Вискозиметр ВР-2М** (рисунок 45) предназначен для изучения реологических свойств высоковязких пищевых тестообразных масс. Прибор имеет основание 1, соединенное со сварным корпусом 2, в котором помещен привод. Вращающий момент от двухскоростного двигателя 4 типа ДКС - ГСМ через ременную передачу со шкивом 13, соединенным с зубчатым колесом 14, блок шестерен 3 и зубчатое колесо 14, насаженное на ведущий стакан 16, передается на наружный измерительный цилиндр 19, соединенный с помощью байонетного замка со стаканом 16, надетым на втулку 12. Внутренний измерительный цилиндр 18 при помощи замка 17 присоединен к измерительному валу 11, установленному с помощью двух шарикоподшипников во втулке 12 и нагруженному спиральной калиброванной пружины 10. На измерительный вал 11 насажен кольцевой лимб 9, расположенный в одной плоскости с подвижным круговым лимбом 6 и неподвижным кольцевым лимбом 8, установленным на стойках 5. Круговой лимб 6 поворачивается с помощью рукоятки 7. На лимбы нанесены шкалы: на круговой лимб 6 - шкала напряжений сдвига, а также индекс для отсчета пластичной вязкости; на кольцевой подвижный лимб 9 по внешнему диаметру - шкала для отсчета предельного напряжения сдвига, по внутреннему диаметру - шкалы напряжений сдвига и пластичной вязкости.



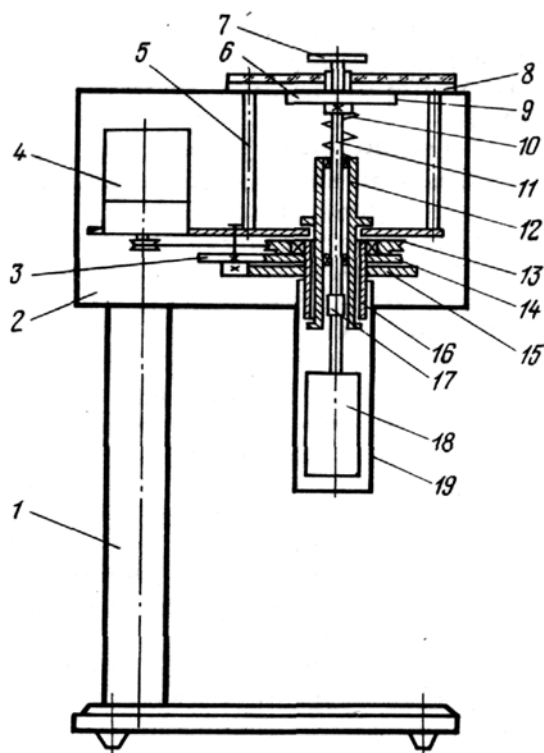


Рисунок 45 - Вискозиметр ВР-2М

**Электрореометр** - прибор, основанный на применении электрического поля, в частности на явлении вращения диэлектрика /19/. Стакан 1 (рисунок 46) с электродами 2 заполнен электрореологической суспензией 3 и помещен в термостат 4. Стержень 5 из диэлектрика закреплен в подшипниках 6 и жестко связан с цилиндрическим вискозиметрическим телом 7, погруженным в измеряемую среду 8 между двумя рабочими поверхностями неподвижного двойного цилиндра 9. Напряжение электрического поля от источника 10 подается на электроды 2 и регистрируется вольтметром 11. Сначала вольтметром измеряют напряжение на электродах 2 и тахометром - обороты холостого хода стержня 5 с телом 7 без исследуемой жидкости 8. Затем цилиндр 9 заполняется измеряемой средой и момент сопротивления тела 7 увеличивается, хотя напряжение на электродах 2 остается постоянным. Для ньютоновских жидкостей вязкость пропорциональна разнице угловых скоростей вращения тела 7. Для неньютоновских жидкостей с вязкостью, зависящей от скорости деформации, реометр предварительно тарируется в единицах вязкости по эталонной жидкости. Ротационный вискозиметр позволяет измерять вязкость при разных градиентах скорости сдвига и получать кривую течения исследуемой жидкости.

Структурно-механические характеристики определяются на ротационных вискозиметрах, как правило, при атмосферном давлении. Однако в большинстве технологических операций (при формовании, транспортировании по

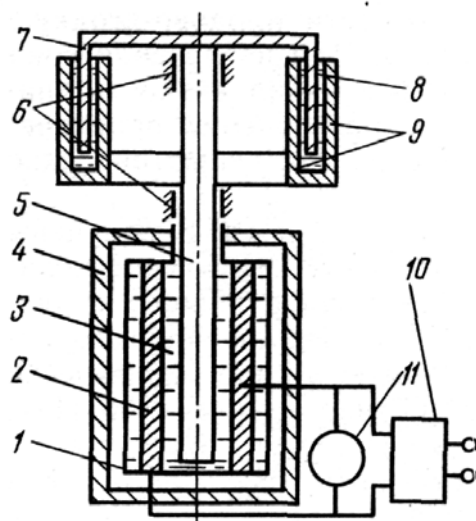


Рисунок 46 - Ротационный электрореометр

трубам, штамповании и т.д.) пищевая масса подвергается воздействию тех или иных нагрузок, создающих в ней избыточное давление.

Поэтому для механических расчетов узлов машин, устройств и процессов, в них протекающих, необходимо знать реологические характеристики продуктов в зависимости от давления.

**Ротационный вискозиметр** (рисунок 47) создан на базе вискозиметра РВ-4 для измерения реологических характеристик при повышенном давлении. Диаметр ротора 32 мм, внутренний диаметр стакана 38 мм. Цилиндр 7 неподвижен; вращается рифленый ротор 5, который выточен заодно с хвостовиком 4.

Давление в цилиндре 7 создается за счет ввинчивания поршня 9, который снабжен манометром 10 и мембраной 11 для измерения давления; в рабочем зазоре давление измеряют тензометрическими датчиками 6. Вискозиметр смонтирован на подставке 1, ротор приводится во вращение от падающих грузов через блоки 2 и барабан 3. Краник 8 служит для сброса излишка продукта.

Влияние трения в подшипниках и уплотнениях учитывается при тарировке на разных давлениях и частотах вращения ротора. Первый способ заключается в том, что в рабочий зазор вискозиметра заливают маловязкое масло велосит или трансформаторное (при 20 °С вязкость соответственно 0,013 и 0,025 Па·с). Напряжение сдвига, обусловленное вязкостью масла, учитывают при построении тарировочных реограмм. По второму способу вместо рабочего ротора с хвостовиком вставляется хвостовик с ротором бесконечно малой длины и зазор также заливается маслом.

Этот способ наиболее эффективен, так как позволяет при тарировке исключить влияние торцевых поверхностей, что особенно важно при испытании материалов при повышенном избыточном давлении. Возможная ошибка измерений, обусловленная тарировкой, не превышает  $\pm 0,5\%$ . /5/

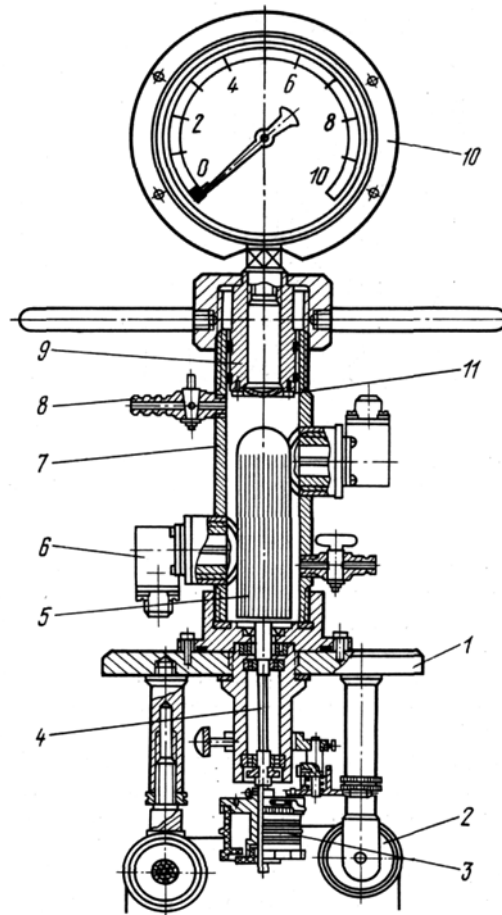


Рисунок 47 - Вискозиметр для измерения при повышенном давлении

При построении рабочих реограмм для исследуемого продукта массу грузов (напряжение сдвига) уменьшают на соответствующую величину по тарировочной реограмме и той же частоте вращения ротора.

**Ротационный вискозиметр РМ-1** (рисунок 48) состоит он из плиты 2, на которой неподвижно укреплены две стойки 1 и 3 с основаниями 15 и 20. На основании 20 установлены рабочая камера 18 и опорный узел 21. Для поддержания требуемой температуры рабочая камера имеет рубашку 16. Внутри камеры запрессована рифленая втулка 19, наличие которой устраняет возможность проскальзывания продукта. Сменный ротор 8 установлен на приводном валике 22. Давление в исследуемой массе создается посредством поршня 9 с уплотнительными кольцами. Перемещение поршня осуществляется винтом 14 при вращении ручки 13. Избыточное давление регистрируется тензометрическими датчиками 17. Валик 22 приводится в движение от шкива 5, который вращается под действием момента, создаваемого грузами 10. Грузы подвешены на нитях 11 через блоки 6 и 12. Измерение угла поворота осуществляется при помощи фотоэлектрического датчика и перфорированного диска 4, закрепленного на валике 22 специальным устройством. Для остановки и фиксации ротора в определенном положении служит фиксатор 7.

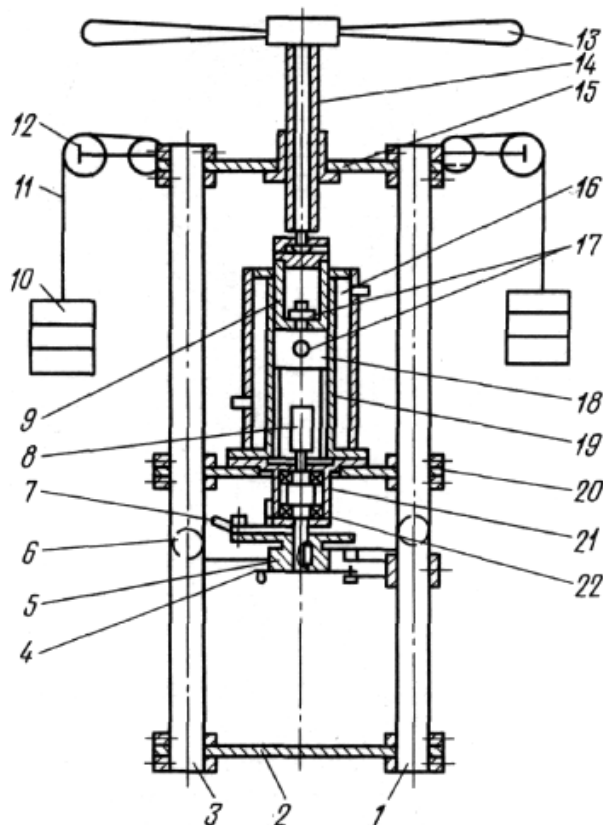


Рисунок 48 - Вискозиметр РМ-1

Угловая скорость ротора регулируется самопишущим прибором. При обработке опытных данных следует учитывать моменты сил трения в опорах, поэтому определяется масса грузов, необходимая для обеспечения холостого хода подвижной части прибора.

Обработка экспериментальных данных проводится по общепринятой методике для данного типа приборов.

Пределы измерения: эффективной вязкости от  $10^2$  до  $10^7$  Па·с; напряжения сдвига от 10 до  $4 \cdot 10^4$  Па; скорости сдвига - от 0 до  $100 \text{ с}^{-1}$ ; давления от 0 до  $10^5$  Па. Габаритные размеры 0,53 X 0,255 X 0,69 м. /18/

**Вискозиметр РМ-2** (рисунок 49) состоит из следующих основных узлов: наружного неподвижного цилиндра 9 с рубашкой для поддержания необходимой температуры, внутреннего цилиндра (ротора) 8, связанного с валом измерительного сельсина 3. Вращение сельсина 3 сообщается от силового сельсина 4, жестко через муфту 5 связанного с электродвигателем 6.

Напряжение, возникающее при торможении измерительного сельсина, пропорционально углу рассогласования сельсинов, т.е. пропорционально моменту сопротивления, приложенному к ротору 8, от исследуемого материала, находящегося в зазоре между цилиндрами 9 и 8. Сигнал рассогласования поступает в измерительный блок 7. /17/

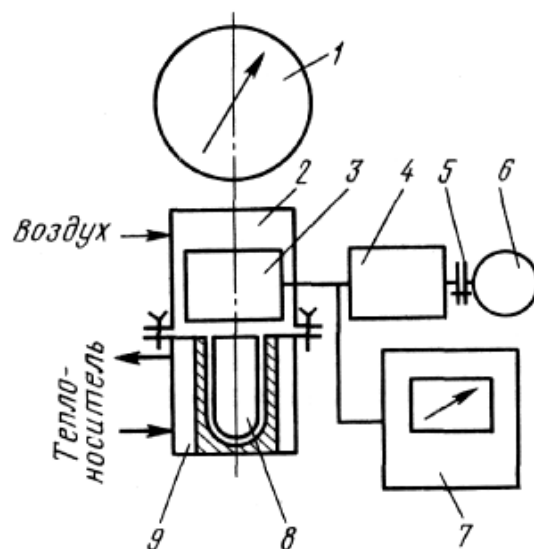


Рисунок 49 - Вязкозиметр РМ-2

Измерительный сельсин крепится в кожухе 2, который герметично соединен с наружным цилиндром 9. В образованную таким образом герметичную камеру поступает сжатый воздух или газ под давлением, которое контролируется манометром 1. Если подключить камеру к вакуум-наосу, то можно создавать в ней разрежение.

Так как при возрастании момента сопротивления от исследуемого материала выше  $28 \cdot 10^{-4}$  Н·м возможно проскальзывание роторов сельсинов, то с целью расширения пределов измерения прибора предусмотрен набор из 11 сменных роторов 8 диаметром 15; 16; ...; 25 мм.

Электродвигатель 6 имеет встроенный редуктор; угловая скорость выходного вала постоянна и равна  $3,14 \text{ с}^{-1}$ .

Практический интерес представляет измерение вязкости при различной частоте вращения ротора 8, т.е. при различной скорости сдвига материала, поэтому в приборе предусмотрено отсоединение двигателя 6, при этом вращение силового сельсина 4 осуществляется моментом, создаваемым на шкиве, устанавливаемом вместо муфты 5. Груз подвешивается на нити через блок, смонтированный в радиальном шарикоподшипнике. Угол поворота ротора 8 фиксируется по углу поворота стрелки, установленной на валу силового сельсина 4. В этом случае измерительный блок 7 отключается, а расчет значений вязкости и напряжения сдвига ведется по обычной методике.

Пределы измерения: эффективной вязкости от 10 до  $2 \cdot 10^2$  Па·с; напряжения сдвига от 5 до 50 Па; скорости сдвига от 0 до  $100 \text{ с}^{-1}$ . Габаритные размеры 0,25 X 0,4 X 0,6 м.

**Пластовязкозиметр системы В.П. Павлова** в отличие от приборов РВ-8 и РМ-1 с постоянным крутящим моментом, определяемым величиной подвешиваемого груза, имеет постоянную скорость вращения, изменяемую ступенча-

то при помощи коробки передач. Вращение от синхронного электродвигателя передается внутреннему ротору вискозиметра. В зазор шириной 0,25 мм, образованный ротором и внешним цилиндром, подается при помощи ручного прессы исследуемая масса. Градиент скорости сдвига в приборе может изменяться от 0,4 до 3000 с<sup>-1</sup>.

**Ротационные вискозиметры «Реотест»** нашли широкое распространение. Помимо основного чувствительного цилиндрического элемента, эти приборы снабжены устройством типа конус - плоскость, предназначенным для измерения вязкости при повышенных скоростях сдвига для средне- и высоковязких продуктов. Угол между плоскостью и образующей конуса составляет 0,3°. Прибор позволяет изменять скорость сдвига от 0,56 до 4860 с<sup>-1</sup>, напряжение сдвига от 40 до 2,2·10<sup>5</sup> Па. Величина измеряемой вязкости находится в пределах от 8 до 40·10<sup>7</sup> МПа·с.

**Вискозиметр «Реотест-RV»** (рисунок 50) является одной из первых моделей этой марки. Внутри станины 1 прибора установлен синхронный электродвигатель, соединенный с 12-ступенчатой коробкой передач, которая позволяет изменять частоту вращения внутреннего цилиндра 2 от 0 до 1500 с<sup>-1</sup>. Крутящий момент от коробки передач передается ведущему валу 6 и далее через спиральную пружину 5 - ведомому валу 4, соединенному с внутренним цилиндром 2 муфтой. Наружный цилиндр 3 крепится к корпусу вискозиметра специальным зажимом. В приборе имеется термостатирующий сосуд. Величина крутящего момента отсчитывается по шкале прибора 8, скорость вращения - по указателю 9. Измеритель моментов торсионного типа с омическими датчиками работает на принципе превращения механических усилий в электрические импульсы. Показания прибора 8 прямо пропорциональны крутящему моменту, а также напряжению сдвига и вязкости исследуемого материала. Частота вращения синхронного электродвигателя и, следовательно, внутреннего цилиндра 2, зависит от напряжения тока в сети.

Отклонения от номинальной частоты 50 Гц фиксируются прибором 7.

Пределы измерения вязкости от 10<sup>-2</sup> до 10<sup>4</sup> Па·с; скорости сдвига от 0,1667 до 1,458·10<sup>3</sup> с<sup>-1</sup>; напряжения сдвига от 12 до 3·10<sup>3</sup> Па; температуры от 30 до 150 °С. Погрешность измерений ±3 % (для ньютоновской жидкости). /10/

**Ротационный вискозиметр типа RN** (рисунок 51) 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. Скорость можно изменять как при остановке, так и во время работы вискозиметра. Цифрам 1, 2, 4 и 10, имеющимся на рукоятке 15, соответствуют следующие частоты вращения ротора (в мин<sup>-1</sup>): 160, 80, 40 и 16.

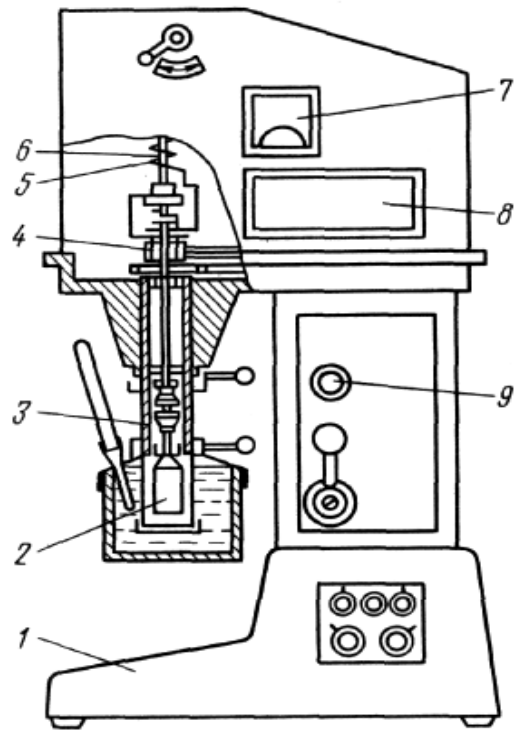


Рисунок 50 - Вискозиметр «Реотест»

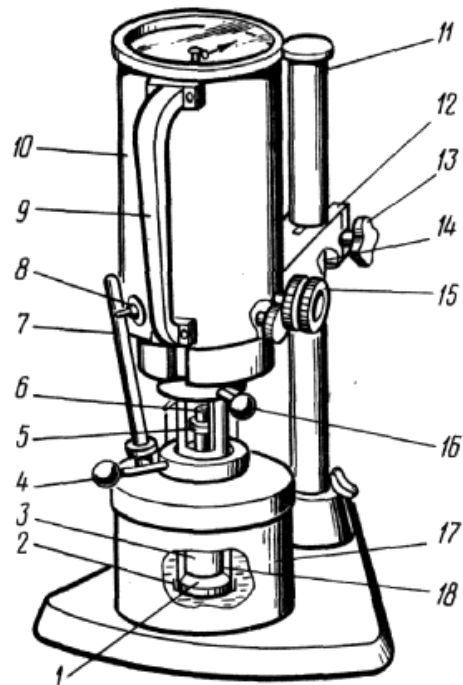


Рисунок 51 - Вискозиметр RN

С помощью муфты 6 ротор 3 соединяется с валом измерительного прибора, фиксация производится гайкой 5. Наружный неподвижный цилиндр 18, расположенный соосно с ротором 3, крепится зажимным рычагом 16. Хорошая очистка прибора от продукта обеспечивается тем, что днище мерного цилиндра выполнено съемным в виде крышки 1 с прокладкой и запорной гайкой 2. Байонетным запором термостатирующий сосуд соединяется с цилиндром 18. Он арретируется зажимным рычагом 4. Температура контролируется по термометру 7. Положение прибора по высоте относительно штатива 11 можно регулировать; нижнее положение ограничивается упором 14 таким образом, что в состоянии, готовом к измерению, прибор не опирается на плиту штатива.

Вискозиметр подсоединяется к сети напряжением 220 В частотой 50 Гц с помощью кабеля; выключатель 8 расположен около рукоятки 9.

Для расширения диапазона измерения вязкости для вискозиметра RN фирма поставляет три измерительные системы, состоящие из цилиндров различного радиуса и длины.

Кроме измерения со взятием пробы, вискозиметр RN может применяться и без термостатирующего сосуда 17, крышки 1, запорной гайки 2 и цилиндра 18, т.е. для измерения вязкости погружением. Описанный вискозиметр может применяться и при свободном погружении ротора непосредственно в сосуд с измеряемым материалом.

Пределы измерения вязкости от  $10^{-2}$  до 420 Па·с; напряжение сдвига от 5,0 до 1500 Па; скорости сдвига от 5 до 492  $\text{с}^{-1}$ ; частоты вращения ротора 16; 40; 80 и 160  $\text{мин}^{-1}$ ; температуры от 30 до 120 °С. Погрешность не более  $\pm 5\%$ . Габаритные размеры прибора 0,25 X 0,28 X 0,44 м.

Вискозиметр RN можно использовать для изучения как ньютоновских, так и неньютоновских материалов, в том числе минеральных масел, пластмассовых растворов и дисперсий, вискозы, шоколадных масс, фармацевтических изделий и т.п.

**Вискозиметр «Ротовиско»** (рисунок 52). Прибор с большим измерительным диапазоном, пригоден для измерения вязкости как ньютоновских жидкостей, так и пластичных дисперсных систем. Наружный цилиндр неподвижный, во вращение приводится внутренний цилиндр. Крутящий момент измеряется динамометром торсионного типа с реостатным датчиком. Прибор снабжен набором сменных измерительных узлов с цилиндрами разных размеров.

В корпусе 1 закреплен наружный неподвижный цилиндр 2. Подвижный внутренний цилиндр 3 соединен с валом 4, вращаемым в двух подшипниках 5. Вал 4 через спиральную пружину 6 соединен с ведущим валом 9, который связан с приводом, обеспечивающим десять частот вращения цилиндра от 3,6 до 486 об/мин. Между валами 4 и 9 находится торсионный динамометр (спиральная пружина) с реостатным датчиком 8, измеряющим крутящий момент. Реостатный датчик закреплен на валу 9, а его движок 7 - на валу 4.



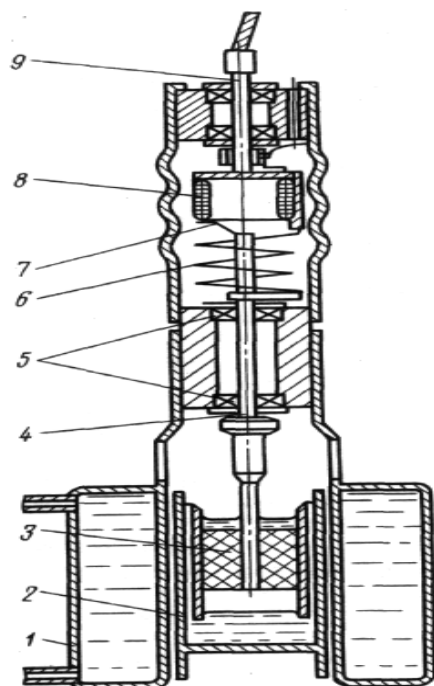


Рисунок 52 - Измерительная головка вискозиметра «Ротовиско»

Пределы измерения: вязкости от  $5 \cdot 10^4$  до  $1 \cdot 10^7$  Па·с; напряжений сдвига от 0,5 до  $10^6$  Па; скоростей сдвига от  $10^{-2}$  до  $10^4$  с<sup>-1</sup>. Погрешность измерения вязкости не более 4 %. Предел регулирования температуры материала от 30 до 150 °С.

В исследовательской измерительной практике встречаются вискозиметры типа конус - плоскость и конус - конус. Воспринимающий элемент отличается малым углом между конусом и диском (порядка  $0,3^\circ$ ), что требует малого количества ( $0,1 \text{ см}^3$ ) исследуемого материала и обеспечивает высокую однородность поля напряжений сдвига (от 0 до  $5,68 \cdot 10^7$  Па). Градиент скорости сдвига можно было изменять от 0,1 до  $10^6$  с<sup>-1</sup>, вязкость измерять от 0,1 до  $10^5$  Па·с.

**Вискозиметр Хеплера** (рисунок 53) типа конус - конус предназначен для изучения как высоковязких, так и маловязких материалов. Испытания ведут при постоянном нагружении сдвига. Конус приводится во вращение при помощи падающего груза 12. Наружная коническая поверхность выполнена в цилиндре 3, который укреплен в корпусе прибора при помощи накидной гайки 1. Внутренний конус 2 закреплен на валу 5, вращающемся в подшипниках скольжения измерительного узла. Вал 5 соединен с ведущим валом 7 посредством муфты 6. Измерительный узел прибора помещен в термостатирующий сосуд 4. Груз 12 подвешен к фигурному рычагу, от которого через коническую передачу во вращение приводится вал 7 с прикрепленным к нему барабаном 10 с нанесенными делениями. При измерении вязкости скорость вращения внутреннего конуса отсчитывают по секундомеру. В случае изучения маловязких

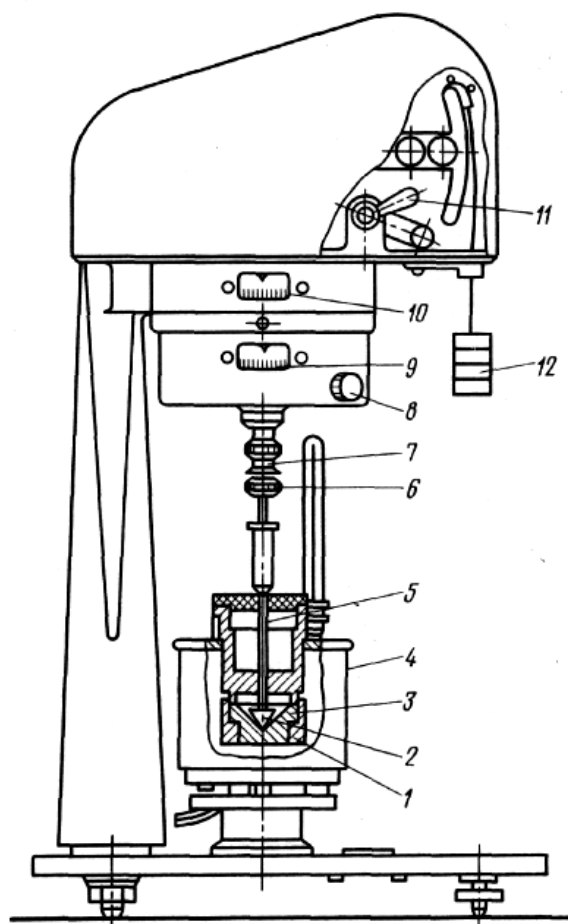


Рисунок 53 - Вискозиметр Хепплера

жидкостей при помощи особого фрикциона включается двухпружинный динамометр. Отсчет производится по шкале 9, проградуированной в единицах крутящего момента. В этом случае вращением винта 8 крутящий момент поддерживается в заданных пределах. Рычаг 11 предназначен для подключения привода к внутреннему конусу.

Пределы измерения вязкости прибором от  $10^3$  до  $10$  Па·с; изменение температуры исследуемого материала от  $25$  до  $100$  °С. Углы конусов при вершине  $60$  и  $82$ °, длина образующей внутреннего конуса  $1,79$  см.

## 19.2 Теория эксперимента и задачи исследования

Поведение многих пищевых масс под действием нагрузки определяется зависимостью между скоростью деформации сдвига  $\dot{\gamma}$  и напряжением сдвига  $\tau$ .

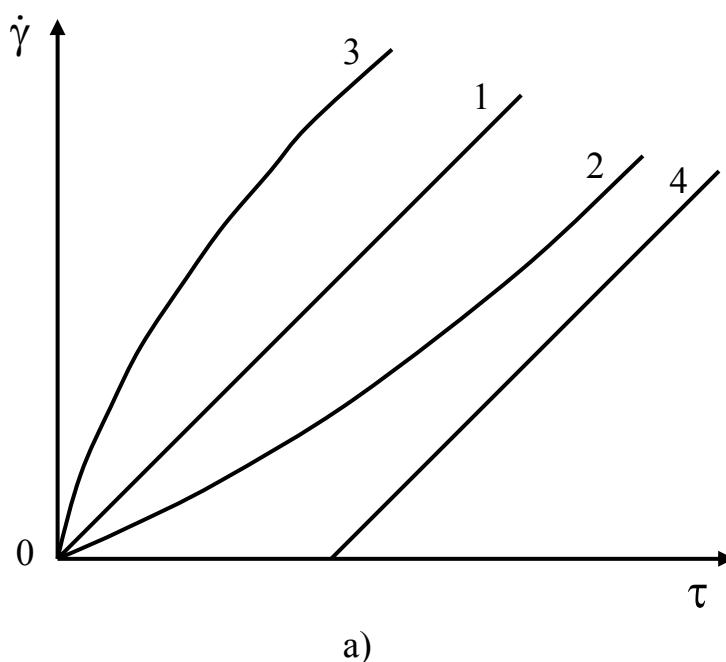
Для ньютоновской вязкой жидкости эта зависимость или реологическое уравнение течения имеет вид

$$\tau = \eta_0 \cdot \dot{\gamma}, \quad (62)$$

где  $\eta_0$  - коэффициент вязкости, постоянный для данной жидкости при данной температуре.

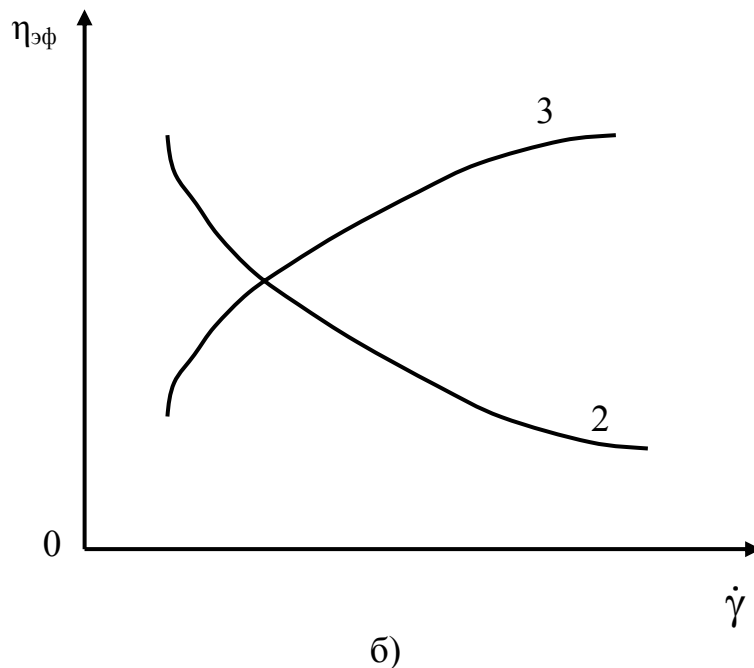
График этой зависимости представляет собой прямую линию, выходящую из начала координат (рисунок 54).

Однако для большой группы пищевых материалов зависимость  $\tau = f(\dot{\gamma})$  имеет иной характер. На рисунке 54 показаны типичные кривые течения (зависимости  $\tau = f(\dot{\gamma})$ ) для реальных пищевых материалов. Так, кривые 2 и 3 характерны тем, что коэффициент вязкости не остаётся постоянным при изменении скорости сдвига или напряжения сдвига. Причём для кривой 2 характерно уменьшение коэффициента вязкости  $\eta$  при увеличении напряжения сдвига. Такие материалы называются псевдопластическими. Для кривой 3 характерно увеличение коэффициента вязкости при увеличении напряжения сдвига. Подобные материалы называются дилатантными.



1 - ньютоновского, 2 - псевдопластического, 3 - дилатантного, 4 - бингамовского

Рисунок 54 - Кривые течения (а)



1 - ньютоновского, 2 - псевдопластического, 3 - дилатантного, 4 - бингамовского

Рисунок 54 - Кривые эффективной вязкости (б) для различных материалов

Существуют материалы, течение которых наступает только после того, как напряжение сдвига превысит некоторый предел, называемый предельным напряжением сдвига. В этом случае реологическое уравнение течения имеет вид

$$\tau = \tau_0 + \eta_{\text{пл}} \cdot \dot{\gamma}, \text{ Па} \quad (63)$$

где  $\eta_{\text{пл}}$  - коэффициент пластической вязкости (пластическая вязкость).

Пищевые материалы, реологическое поведение которых может быть описано уравнением (73), называются телами Бингама (кривая 4 на рисунке 54).

Для материалов, реологическое поведение которых отличается от ньютоновского, часто применяется понятие эффективной вязкости, величина которой определяется отношением

$$\eta_{\text{эф}} = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}, \text{ Па} \cdot \text{с} \quad (64)$$

Кривые течения различных материалов определяются экспериментально с помощью вискозиметров ротационного и капиллярного типа.

Принцип действия ротационных вискозиметров основан на сдвиге материала, находящегося в зазоре между двумя поверхностями, например, цилиндрическими, одна из которых движется, а другая - неподвижна. При этом напряжения сдвига определяются величиной момента, приложенного к вращающейся цилиндрической поверхности, а скорость сдвига - по угловой скорости вращения этой поверхности.

### 19.3 Описание экспериментальной установки

Схема ротационного вискозиметра РВ-4 представлена на рисунке 55. Измерительная часть вискозиметра выполнена в виде двух соосных цилиндров, из которых внутренний цилиндр 7 установлен неподвижно, а наружный цилиндр 3 укреплен на валу 8 с коническим хвостовиком. Вал 8 установлен в шариковых подшипниках в корпусе 2, который закреплен на опорной плите 1.

Внутренний цилиндр 7 в верхней части имеет центрирующий тройник 6, снабженный тремя вертикальными центрирующими стойками 5 с выступающими штифтами. На опорной плите 1 жестко установлены основания центрирующих стоек 4 с отверстиями, в которые входят соответствующие штифты центрирующих стоек 5. Пространство между цилиндрами заполняется исследуемой массой. Цилиндр 3 приводится во вращение посредством грузов (для удобства расчетов рекомендуется грузы брать одинаковыми), подвешенных на концах нити, перекинутой через блоки 11 и намотанной на барабан 10, расположенный на валу 8. Блоки 11 установлены на специальных держателях 12, прикрепленных к опорной плите 1.

Внутренний цилиндр имеет рифленую поверхность, что исключает возможность скольжения исследуемой среды по поверхности цилиндра и обеспечивает лучшее прилипание массы к внутреннему цилиндру. Поверхность внешнего цилиндра может оставаться гладкой, т.к. напряжение на поверхности внешнего цилиндра всегда значительно меньше, чем на поверхности внутреннего цилиндра и скольжение массы не наблюдается. Остановка прибора и пуск его в ход осуществляется с помощью тормозного приспособления 9.

Опорная плита вискозиметра должна быть установлена на специальном кронштейне на высоте 1,25 - 1,5 м от пола с тем, чтобы барабан успел сделать достаточное количество оборотов прежде, чем грузы, находящиеся на концах нити, коснутся пола. Для этого рекомендуется укрепить на кронштейне доску, вырезав ее центральную часть с таким расчетом, чтобы края плиты 1 опирались на доску, а ролики располагались ниже поверхности доски.

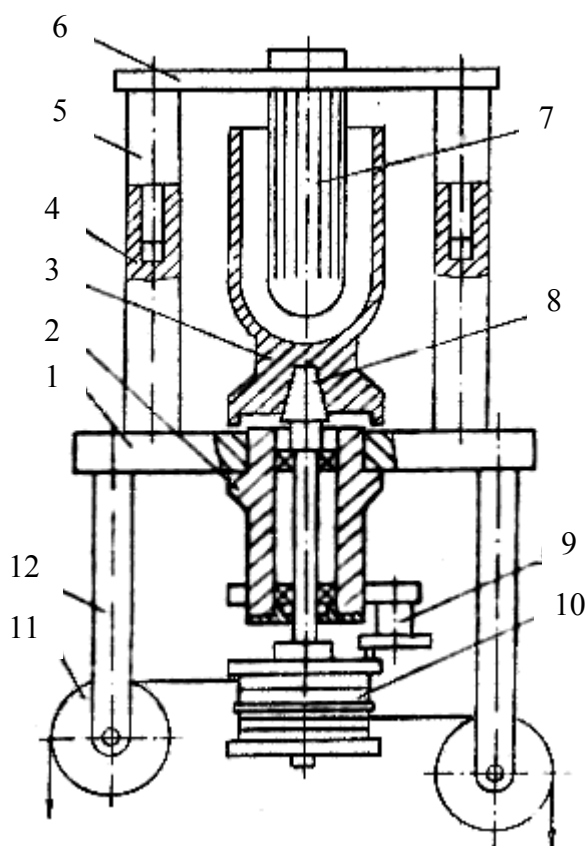


Рисунок 55 – Схема ротационного вискозиметра РВ-4

#### 19.4 Методика проведения исследования

Перед началом работы с прибором РВ-4 следует построить кривую трения подшипников. Эта кривая устанавливает зависимость между частотой вращения внешнего цилиндра вискозиметра и нагрузкой для случая, когда вискозиметр не заполнен массой. Чтобы построить кривую трения, на концы нитей помещают грузы вначале очень небольшие по величине (0,5-1 г), но которые всё же приводят систему во вращение, и находят частоту вращения цилиндра при данной нагрузке. Определение частоты вращения внешнего цилиндра производится при нескольких значениях грузов незначительно отличающихся друг от друга.

Затем определяют предельное напряжение сдвига  $\tau_0$ .

Наружный цилиндр заполняют исследуемой массой, укрепляют на оси вращения и в него вставляют внутренний цилиндр. При этом важно, чтобы его ось строго совпадала с осью вращения внешнего цилиндра. Это достигается предварительной настройкой прибора.

Часть массы, вытесненной при внедрении цилиндра, удаляется, и поверхность исследуемой массы выравнивается так, чтобы глубина погружения внутреннего цилиндра была везде одинакова.

Измерения начинают с постепенного нагружения системы. При этом вначале подвешивают на концы нитей очень малые грузы, немного превышающие трение подшипников, под действием которых система ещё не приходит в движение. Затем увеличивают массу грузов  $m_{\min}$  до величины, при которой наружный цилиндр начинает вращаться.

Для определения пластической вязкости внешний цилиндр приводят во вращение, применяя грузы, превышающие величину  $m_{\min}$ . Массу грузов увеличивают ступенями. При этом необходимо следить за поведением массы в зазоре между цилиндрами. Нагружение прекращают при отрыве массы от поверхности внутреннего цилиндра, в результате чего груз получает ускоренное. Особое внимание следует обратить на распространение сдвиговых деформаций в зазоре, т.к. расчётные формулы зависят от степени распространения деформаций сдвига.

## **20 Капиллярные вискозиметры. Изучение реологических свойств пищевых материалов на капиллярном вискозиметре АКВ-2**

### **20.1 Конструкции капиллярных вискозиметров**

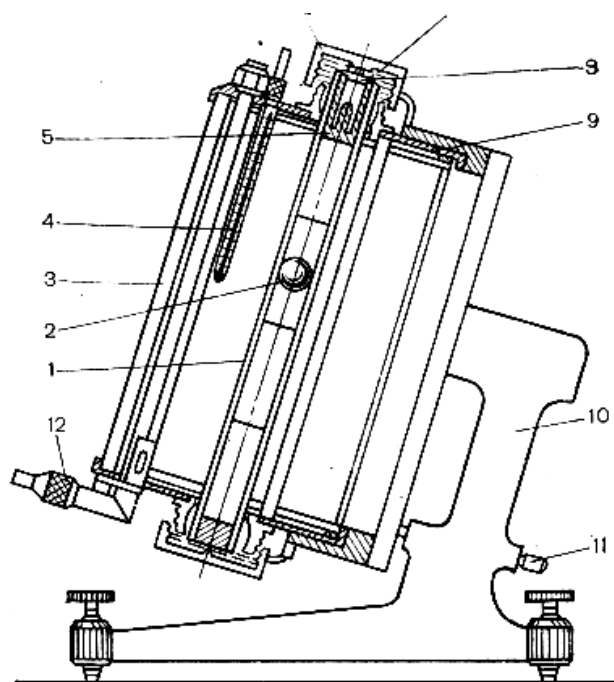
Капиллярные вискозиметры применяются для определения вязкости мясокостного бульона и топленого жира, крови, подсолнечных и соевых мисцелл, растворов мыла, миндального и арахисового масла, кондитерского жира, растительных масел. Как показывает перечень, капиллярные вискозиметры применяются в основном для измерения характеристик материалов, обладающих относительно небольшой вязкостью.

На рисунке 56 представлена схема вискозиметра Гепплера; в нем жидкость помещается в наклонную трубку, в которой перемещается шарик; между ними остается лишь небольшая щель. Исследуемые характеристики определяются по длительности прохождения шариком определенного пути. Недостатком данного прибора является невозможность воспроизведения результатов в двух последовательных опытах из-за разрушения структуры.

Методы капиллярной вискозиметрии нашли широкое применение и при исследовании реологических свойств высоковязких веществ (различные пластмассы, конфетные массы и т.п.). Теоретические основы капиллярной вискозиметрии для ньютоновских и неньютоновских жидкостей даны в работах Г. Барра, Б. Рабиновича, М. Муни, А. Метцнера и У. Рида.

Капиллярные вискозиметры не имеют недостатка, присущего ротационным вискозиметрам: в капилляре непрерывно подвергается сдвигу вновь поступающая жидкость, и тепловыделения уносятся с материалом, тогда как в ротационных вискозиметрах один и тот же испытуемый материал находится в зазоре вискозиметра в течение всего опыта. Теория капиллярных вискозиметров была разработана несколько позднее, чем теория ротационных вискозиметров.





1 - стеклянная трубка; 2 - шарик; 3 - цилиндр для термостатирующей жидкости; 4 - термометр; 5 - резиновый колпачок для отвода из трубки избытка жидкости; 6 - прижимная гайка; 7 - полость для сбора излишней жидкости; 8 - уплотнительное кольцо; 9 - крышка; 10 - подставка; 11 - установочный винт; 12 - штуцер для подвода жидкости

Рисунок 56 - Шариковый вискозиметр Гепплера

Одно время отрицали применимость капиллярных вискозиметров для определения реологических свойств материалов при сдвиге, ибо в капилляре происходит неоднородный или менее однородный, чем в ротационных вискозиметрах, сдвиг материала.

В капиллярных вискозиметрах задаются либо постоянным во всех опытах расходом исследуемой жидкости, либо постоянным перепадом давления в капиллярах. В вискозиметрах с постоянным расходом измеряется перепад давления между концами капилляра, в приборе с постоянным давлением - расход материала.

Каждый вискозиметр состоит из следующих частей: емкости для исследуемого материала, калиброванного капилляра, приспособлений для определения и регулирования давления, определения скорости течения (или истечения) материала, определения температуры.

Принцип действия капиллярных вискозиметров основан на непрерывном сдвиге в капилляре вновь поступающей жидкости и постоянном уносе с материалом выделяющейся теплоты.

В опытах на капиллярных вискозиметрах получают зависимость расхода массы  $Q$  от перепада давлений  $\Delta p$ . Если опыты проводят на одном капилляре, то напряжение сдвига на стенке капилляра  $\tau$ , Па рассчитывают по формуле:

$$\tau = \Delta p R [2(L + nR)] \quad (65)$$

где  $R$  - радиус капилляра, м;

$L$  - длина капилляра, м;

$n$  - поправка, учитывающая концевые эффекты.

Когда используются два капилляра одного радиуса, но разной длины, то  $t$  определяют по формуле:

$$\tau = R(p_1 - p_2)/[2(L_1 - L_2)] \quad (66)$$

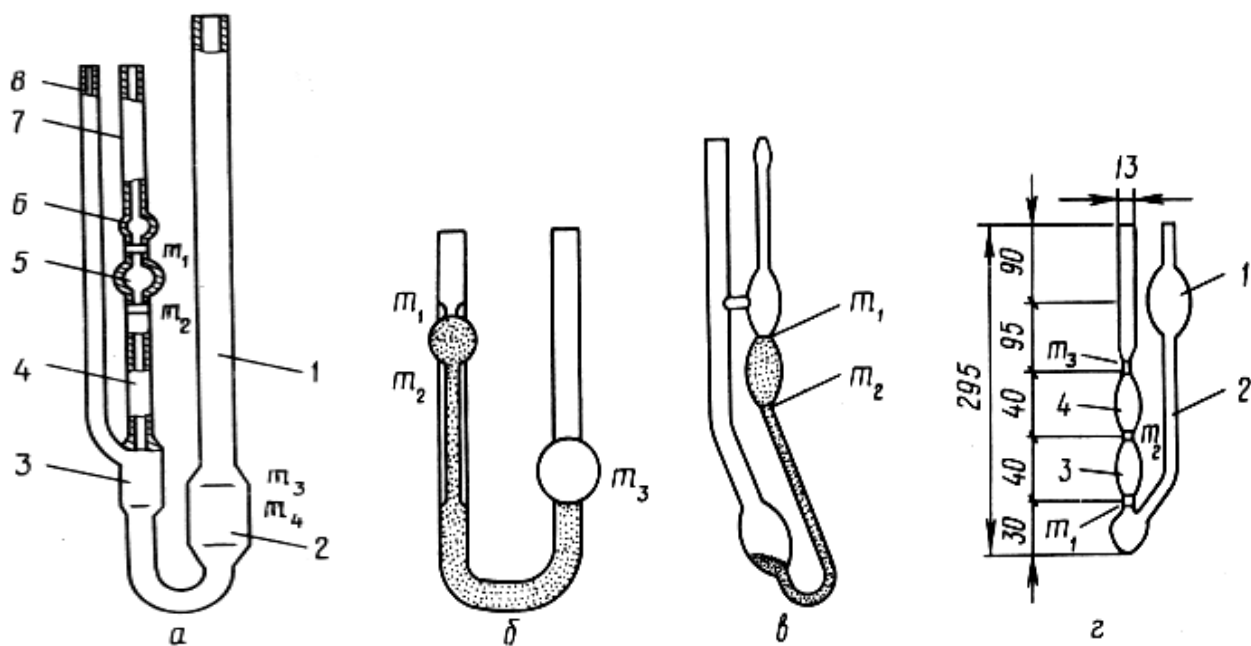
Скорость сдвига  $\dot{\gamma}$ ,  $s^{-1}$  на стенке капилляра рассчитывают по формуле:

$$\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_{cp}[3 + d \lg \dot{\gamma}_{cp}/(d \lg \tau)] \quad (67)$$

где  $\dot{\gamma}_{cp} = Q/(\pi R^3)$

Капиллярные вискозиметры можно условно разделить на три группы: стекло капиллярные, цилиндр - поршень и приборы истечения. К первой группе приборов относятся простейшие вискозиметры, представляющие собой U-образные трубки, в одно из колен которых помещен капилляр (рисунок 57).

В вискозиметре Уббелоде (рисунок 57а) для истечения жидкости необходимо в одном из колен принудительно создать давление или разрежение. Капилляр в приборе располагается вертикально, что представляет определенные трудности при работе с жидкостями, обладающими значительной вязкостью и поверхностным натяжением. Для таких случаев М.П. Воларович и Н.Н. Кулаков предложили вискозиметр с горизонтальным капилляром; в нем



а – Уббелоде; б – Оствальда; в – Оствальда-Фенске; г – Канон-Фенске

Рисунок 57 – Капиллярные стеклянные вискозиметры

исключается необходимость введения поправки на гидростатическое давление столба исследуемого материала.

Перед измерением вязкости жидкость заливают через трубку 1 в резервуар 2 до уровня между рисками  $m_3$  -  $m_4$ . Затем прибор в вертикальном положении погружают в жидкостный термостат до уровня немного выше резервуара б и выдерживают 30 мин при заданной температуре. После этого при закрытой трубке 5 жидкость засасывается резервуары 5 и 6 грушей, надетой на трубку 7. Далее трубки 7 и 8 соединяются с атмосферой, и определяется время истечения жидкости из резервуара б через капилляр 4 в резервуары 3 и 2. Время истечения отсчитывается при снижении уровня жидкости в трубке 7 с резервуарами 5 и 6 от риски  $m_1$  до риски  $m_2$ . Зная время истечения жидкости, находят измеряемую вязкость.

Капиллярные вискозиметры ВПЖ (типа Уббелоде) позволяют определять кинематическую вязкость жидкости в диапазоне от 0,6 до  $10^4$  мм<sup>2</sup>/с при температуре не выше 100 °С. Измерение вязкости сводится к определению времени истечения через капилляр заданного диаметра определенного количества жидкости из измерительного резервуара.

В вискозиметре Оствальда (рисунок 57б) перетекание жидкости из одного колена в другое происходит под воздействием гидростатического давления: из емкости с рисками ( $m_1$  -  $m_2$ ) исследуемый материал протекает через капилляр

в емкость с ризкой  $m_3$  под действием собственной массы. Определяя время истечения, находят вязкость по уравнению Пуазейля.

При работе на вискозиметре Оствальда подбирают такой объем испытуемой жидкости, чтобы после заполнения левого колена до верхней метки в нижней части правой емкости едва выступал мениск жидкости. Прибор помещают в термостат и укрепляют его вертикально. Жидкость термостатируют 20 - 25 мин, после чего с помощью резиновой трубочки ее засасывают в левое колено до такого положения, чтобы мениск был на 2 - 3 мм выше верхней метки, и дают жидкости свободно стекать через капилляр. Когда мениск будет на уровне метки, включают секундомер и измеряют время прохождения жидкости между метками.

Вязкость на приборах Уббелодде и Оствальда обычно определяют по отношению к известной вязкости стандартной жидкости (вода, касторовое масло, глицерин).

Вязкости двух жидкостей, измеренные при равных условиях в одном и том же капилляре, будут относиться как

$$\eta / \eta_0 = \tau\rho / (\tau_0\rho_0), \text{ или } \eta = \eta_0[\tau\rho / (\tau_0\rho_0)] \quad (68)$$

где  $\eta_0, \eta$  - вязкость соответственно стандартной и исследуемой жидкости, Па·с;

$\rho_0, \rho$  - плотности соответственно стандартной и исследуемой жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

$\tau_0, \tau$  - время истечения соответственно стандартной и исследуемой жидкости, с.

На вискозиметре Оствальда - Фенске (рисунок 57в) можно определять вязкость в пределах от 1 до 8000 мм<sup>2</sup>/с, находя время перемещения материала от уровня  $m_1$  до уровня  $m_2$ .

Вискозиметр Канон - Фенске (рисунок 57г) применяется для определения вязкости непрозрачных материалов. Он имеет набор из одиннадцати капилляров диаметром от 0,3 до 4 мм, что позволяет определять скорость сдвига в пределах от 1 до 20000 с<sup>-1</sup>, кинематическую вязкость - в пределах от 0,6 до 10000 мм<sup>2</sup>/с. Испытание заключается в определении времени перемещения материала из емкости 1 через капилляр 2 сначала до уровня  $m_1$ ; а затем до  $m_2$  и  $m_3$ . Постоянные капилляра разные для емкостей 3 и 4, что необходимо учитывать при расчете вязкости.

В лабораторной практике используются стеклянные вискозиметры многих авторов, причем во всех приборах перемещение материала происходит или под действием собственной массы, или под действием внешнего вакуума. Общим для всех приборов этого типа является наличие капилляра, устройства для измерения расхода или объема жидкости и системы, обеспечивающей создание гидростатического давления. В качестве капилляра может быть использована трубка диаметром от долей миллиметра до 2 - 3 мм для измерения вязкости ньютоновских и маловязких неньютоновских жидкостей. Получаемые резуль-

таты, как правило, инвариантны, т.е. не зависят от диаметра трубки. Для неньютоновских жидкостей с более высокой вязкостью и вязкопластичных систем диаметр может достигать 10 мм и более, а результаты измерений зачастую зависят от диаметра, т.е. неинвариантны.

Термостатирование исследуемой жидкости в приборах занимает 10 - 30 мин, что определяется ее объемом. За это время температура жидкости в приборе достигает температуры жидкости в термостате и восстанавливается структура, т.е. создаются условия, идентичные предыдущему измерению. При кратковременном термостатировании температурные ошибки дают существенные отклонения результатов измерения вязкости от истинных ее значений. Использование избыточного давления при течении жидкости по капилляру создает возможность турбулизации потока, поэтому необходимо проводить проверку на ламинарность по критерию Рейнольдса.

Температурные изменения объема и плотности жидкости в вискозиметре сказываются на результатах измерения. Поэтому вискозиметр заполняют всегда одинаковым объемом при одной и той же температуре жидкости. Поправку, на которую умножают измеренную величину вязкости, определяют по формуле:

$$1 - \frac{V_0}{Fh} \left( \frac{c - c_t}{c_t} \right) \quad (69)$$

где  $V_0$  - общий объем залитой жидкости,  $\text{м}^3$ ;

$F$  - площадь сечения нижнего резервуара на уровне жидкости,  $\text{м}^2$ ;

$h$  - средний напор, м;

$\rho$  и  $\rho_t$  - плотность при температуре соответственно заполнения и измерения,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Вискозиметр Оствальда используют как относительный прибор. Расчетная формула имеет вид:

$$\eta = K_t \rho \tau, \quad (70)$$

где  $K_t$  - константа прибора при температуре измерения;

$\tau$  - время истечения, с

Вискозиметр Уббелоде можно использовать как относительный и абсолютный прибор. В первом случае его тарируют по эталонной жидкости, во втором - определяют константы в соответствии с уравнением Пуазейля (их можно определить комплексно, исходя из данных предварительной тарировки и непосредственных геометрических измерений).

Горизонтальный вискозиметр ВК-4 в работе и тарировке подобен вискозиметру Уббелоде. Он предназначен для измерения вязкости крови и имеет две калиброванные трубки. Каждая трубка состоит из двух капилляров с миллиметровой шкалой, которые служат резервуаром для жидкости. Между ними помещен узкий измерительный капилляр. Для термостатирования исследуемой жидкости обе трубки помещают в широкую стеклянную трубу, закрытую с торцов

пробками, через которые выходят трубки. В трубу подается термостатирующая жидкость. Преимущества такой конструкции: малое количество жидкости - небольшое время термостатирования; отсутствие поправок на изменение гидростатического давления и объёма; устойчивый ламинарный режим в широком диапазоне давлений; сравнительно большое время истечения жидкости. Как и в вискозиметре Уббелоде, измерения можно проводить при прямом и обратном движении жидкости в капилляре. Это очень существенно для белковых структурированных жидкостей (кровь, молоко, бульон и др.), так как позволяет избежать разрушений структурных связей при холостом ходе.

На вискозиметре Уббелоде определяли вязкость крови убойных животных при различной температуре. Вязкость крови крупного рогатого скота уменьшается с повышением температуры: при 20 °С вязкость равна  $31,3 \cdot 10^{-3}$  Па·с, а при 45 °С -  $16,8 \cdot 10^{-3}$ ; вязкость крови мелкого рогатого скота соответственно равна  $24 \cdot 10^{-3}$  и  $12,2 \cdot 10^{-3}$ , Па·с.

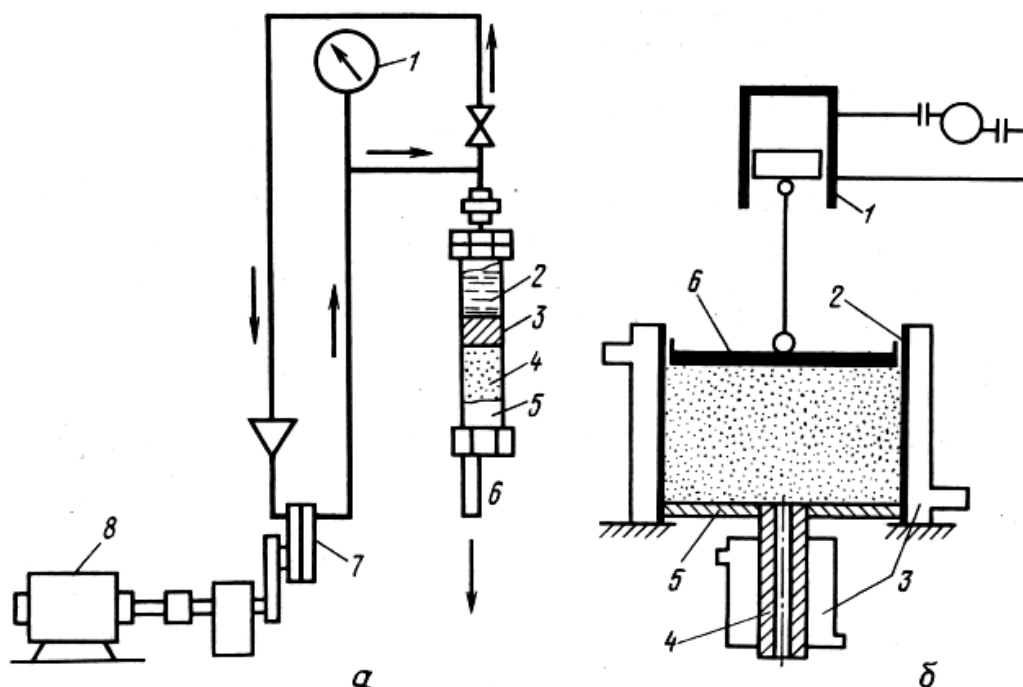
Вискозиметры ВПЖ-1, ВПЖ-2 и ВПЖ-4 рекомендуется использовать для оценки качества желатина по его вязкости. Измерения следует проводить при температуре 40 °С и концентрации 10 %. Прибор ВПЖ-1 позволяет определять вязкость мелассы и мелассных растворов при изменении температуры от 20 до 120 °С и концентрации сухих веществ от 7 до 79 %.

С помощью вискозиметра Оствальда изучалась зависимость вязкости от температуры для мясокостного бульона и технической дефибрированной крови, виноградного сока, а также вязкость водно-спиртовых и водно-спиртосахарных растворов. В области температур 40 - 95 °С зависимость вязкости мясокостного бульона от температуры описывается степенным уравнением. С увеличением температуры и уменьшением концентрации сухих веществ вязкость бульона снижается. Например, при концентрации 16 % вязкость равна  $6,67 \cdot 10^{-3}$  Па·с, а при 90 °С -  $2,69 \cdot 10^{-3}$  Па·с.

Вязкость топленого говяжьего жира при температуре 50 °С равна  $29 \cdot 10^{-3}$  Па·с, а при 90 °С -  $10 \cdot 10^{-3}$  Па·с, вязкость рыбьего жира соответственно равна  $11,5 \cdot 10^{-3}$  и  $3,7 \cdot 10^{-3}$  Па·с.

Ко второй группе капиллярных вискозиметров относятся приборы, в которых течение материала происходит за счет гидравлического, пневматического или механического перемещения поршня в цилиндре. Такие вискозиметры можно использовать для изучения как ньютоновских, так и неньютоновских материалов.

Вискозиметр типа Арвесон с гидравлическим приводом (рисунок 58а) состоит из цилиндра 5, поршня 3, перемещение которого происходит от нагне-



а – типа Арвесон; б - Азарова

Рисунок 58 – Вискозиметры с гидравлическим приводом

таемой жидкости 2. Привод шестеренного насоса 7 осуществляется от электродвигателя 8. Давление в гидравлической системе контролируется манометром 1. Изучаемая масса 4 при помощи поршня 3 продавливается через капилляр 6, при этом измеряются давление и скорость вытеснения.

Вискозиметр имеет 8 сменных капилляров из нержавеющей стали. При скорости сдвига  $10 \text{ с}^{-1}$  можно определить вязкость в пределах от 2,5 до  $10^4 \text{ Па}\cdot\text{с}$ , а при скорости  $1,5 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$  - от 0,1 до  $10 \text{ Па}\cdot\text{с}$ .

Вискозиметр Б.М. Азарова предназначен для изучения реологических свойств высоковязких тестовых и конфетных масс. Он состоит (рисунок 58б) из рамы, системы силового гидравлического привода 1, рабочего цилиндра 2 с рубашкой 3 для термостатирующей жидкости, блока электротензометрической аппаратуры. Гидропривод состоит из насоса высокого давления, масляного бака, силового гидравлического цилиндра, двух дроссельных кранов и манометра. Рабочий цилиндр 2 с дном 5 снабжен поршнем 6 и капилляром 4. Цилиндр, дно и капилляр имеют водяные рубашки 3, соединенные с термостатом. Электротензометрическая аппаратура состоит из датчика давления, встроенного в дно цилиндра, датчика температуры, установленного в канале капилляра, усилителя и осциллографа.

Расход материала определяется при помощи резательного механизма, который представляет собой два электромагнита-соленоида, на сердечниках которых закреплен специальный нож-струна, подвешенный под обрез капилляра.

Исследуемая масса загружается в цилиндр и закрывается сверху поршнем. Приложенная к массе посредством силового цилиндра нагрузка измеряется датчиком давления. Установка позволяет развивать нагрузку на массу до  $6 \cdot 10^4$  Н и поддерживать температуру массы постоянной в диапазоне от 20 до 70 °С.

Измерения на устройстве проводятся в следующем порядке. Загруженная в цилиндр масса выпрессовывается с различной скоростью через капилляр. Выходящий жгут массы фиксируется на пленку фото- или киноаппарата, в объектив которых одновременно попадают показания миллиамперметров давления и температуры, секундомера и счетчика кадров. При определенном установленном режиме исследователь включает одновременно резательный механизм, секундомер и аппарат, фотографирующий выходящий после среза из капилляра жгут и приборную панель. Следующий кадр исследователь делает при новом значении усилия на массу. Испытание ведется до тех пор, пока не получится достаточное для построения кривой течения количество кадров. Таким образом, определяется секундный расход массы и соответствующий перепад давления на определенной длине капилляра.

Для установления величины потерь давления используется метод двух капилляров: сначала эксперимент проводится с капилляром определенной длины, затем - с той же массой на другом капилляре с другой длиной, но того же диаметра. Опыты проводили с капиллярами длиной 10, 100 и 150 мм. В ходовые потери, как показали результаты опытов, не превышают 5 - 7 %.

Обработка результатов опытов с образцами хлебопекарного теста позволила получить следующее уравнение:

$$\eta_{\text{пл}} = a_1 \dot{\Gamma} (a_2 W - a_3) \quad (71)$$

где  $\eta_{\text{пл}}$  - пластичная вязкость, Па·с;

$\dot{\Gamma}$  - скорость сдвига,  $\text{с}^{-1}$ ;

W - влажность теста, %;

$a_1, a_2, a_3$  - эмпирические коэффициенты (таблица 4).

Таблица 4 – Значения эмпирических коэффициентов

Сорт муки, из которого получено тесто	$a_1$	$a_2$	$a_3$
Высший	8000	2,76	1,83
Первый	10500	2,9	1,78
Второй	5800	1,8	1,38

Получены также значения предельного напряжения сдвига, Па для хлебопекарного теста различной влажности (таблица 5).



Таблица 5 – Значения предельного напряжения сдвига теста различного качества

Влажность теста, %	Сорт муки, из которого получено тесто		
	Высший	Первый	Второй
40	948	458	213
42	568	324	139
44	347	233	92
46	217	170	63
48	139	126	43

Обработка кривых течения конфетных масс пралине методом консистентных переменных позволила определить константы уравнения вида

$$P = KV^n \quad (72)$$

- где P - аналог усилия, определенный по формуле  $P = \Delta p d / (4L)$ ;  
V - аналог скорости, определяемый по формуле  $V = 8v/d$ ;  
K и n - константы уравнения (таблица 6);  
 $\Delta p$  - перепад давлений на длине L капилляра, Па;  
d - диаметр капилляра, м;  
L - длина капилляра, м;  
v - средняя линейная скорость массы при выходе из капилляра, м/с.

Таблица 6 – Значения констант уравнения (72)

Конфетная масса	Температура, °C	Содержание жира, %	K	n
Арлекин	31	33,88	21500	0,07
Чародейка	29	29,46	24000	0,13
Таганай	30	28,71	9000	0,25
Метелица	26,5	32,23	3750	0,4
Кара-Кум	28	26,35	14700	0,225
Кофейные	32	31,57	2350	0,3
Спортивные	32	30,24	2900	0,43
Маска	30,5	30,69	15500	0,08
Диабетические	32	38,03	400	0,28
Батончики	32	33,71	1600	0,31

Вискозиметр с пневматическим приводом (рисунок 59) состоит из баллона с газом 1, цилиндра 3 с поршнем 4, капилляром 6 и термостатом 7. Изучаемая

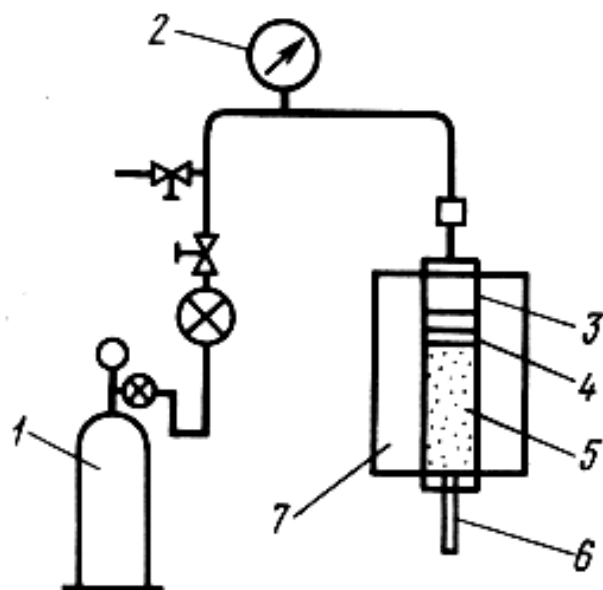


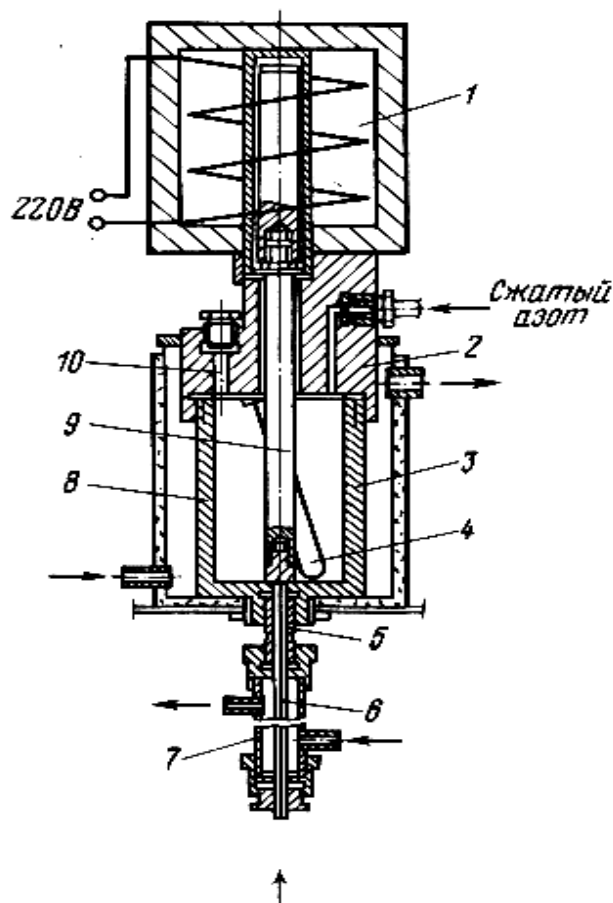
Рисунок 59 – Вискозиметр с пневматическим приводом

масса 5 из цилиндра выдавливается через капилляр, при этом по манометру 2 определяется давление в системе и каким-либо способом - скорость истечения материала. Например, в устройстве системы Бюрел - Северс имеется набор капилляров диаметром 0,306; 1,123 и 1,552 мм, максимальное напряжение сдвига равно  $10^5$  Па, вязкость -  $10^4$  Па·с.

Реометр РК-2 (авторы Кембловски и Килянски из Политехнического института химической инженерии города Лодзи) предназначен для измерения характеристик неньютоновских материалов как с небольшой, так и с очень большой вязкостью. Прибор (рисунок 60) может работать при давлении до 10 Па и температуре от -50 до + 150 °С. Длина капилляра составляет 500 мм, что обеспечивает большое отношение длины к диаметру. Вход в капилляр закрывает клапан, который управляется электрическим током. Электросекундомер включается вместе с электромагнитом и останавливается при его отключении.

Реометр Умштетера, созданный в том же институте, представляет собой вискозиметр с капилляром, находящимся в вискозиметрической емкости. Прибор (рисунок 61) может работать при высоких давлениях и температурах. После открытия игольчатого клапана 3, расположенного на выходе из трубки, материал с помощью сжатого азота заданного давления перемещается из капилляра 2 в бюретку 4, находящуюся над вискозиметрической емкостью 1, заключенной в термодирующий сосуд 5. Такое решение позволяет непосредственно определить объем материала, прошедшего капилляр. Прибор снабжен клапаном безопасности 6 и датчиком 7 для измерения температуры массы. Недостатком является ограниченная длина капилляра, что вызывает при обработке результатов наблюдений необходимость учета в ходовых эффектах.

Широкое распространение, особенно в последние годы, получили



1 – электромагнит; 2 – головка; 3 – вискозиметрическая емкость; 4 – гнездо термометра; 5 – держатель капилляра; 6 – капилляр; 7 – водяная рубашка; 8 – темпирирующая емкость; 9 – электромагнитный клапан; 10 – отверстие для заполнения емкости массой.

Рисунок 60 – Измерительная часть реометра РК-2

вискозиметры, рабочий поршень которых приводится при помощи механических сил возбуждателей: пружин, механических передач, от электродвигателей, грузов и т.п.

Вискозиметр АКВ-5 (рисунок 62) состоит из камеры 2, заполняемой исследуемой массой и заканчивающейся капилляром 1. В камеру входит шток 3, проталкивающий массу через капилляр; шток движется вниз под давлением пружины 5. Перед испытанием пружина сжимается с помощью винта 6, который, перемещается вертикально посредством вращения втулки 8 с ручкой 7. В шток 3 вставляется держатель карандаша 4, которым производится запись перемещения штока на барабане 9, приводимом в движение от синхронного электродвигателя 10. При записи получают кривые, по которым определяют вязкопластичные характеристики исследуемой массы.

На вискозиметре АКВ-2М определяли эффективную вязкость яблочного сока в зависимости от изменения концентрации взвесей в диапазоне

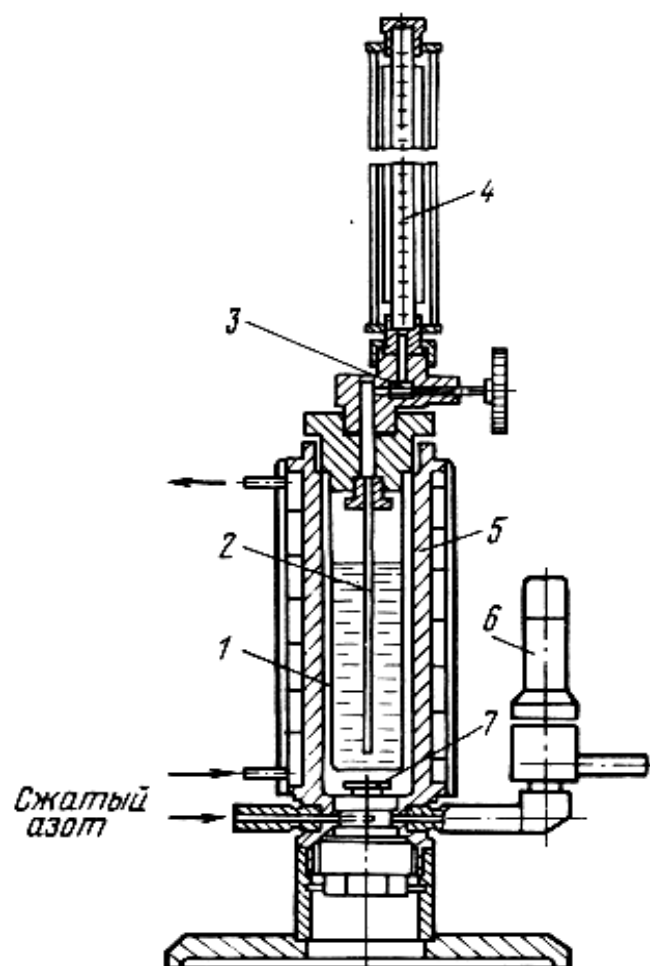


Рисунок 61 – Вискозиметр Умштетера

скоростей сдвига от 0 до  $4 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ ; течение сока описывается уравнением Оствальда. Выяснено, что осветленные соки при течении практически не проявляют аномалии вязкости и могут быть отнесены к ньютоновским жидкостям.

Консистометр (рисунок 63), предназначен для определения вязкости фруктовых и овощных пюре, а также для анализа их качества и консистенции. Испытание заключается в измерении времени истечения пищевой массы из цилиндра 3 через калиброванное отверстие 6 под давлением массы поршня 5 и грузов, устанавливаемых на стержень 1. Скорость поршня почти постоянна, так как ускорение движения компенсируется, трением между поршнем и стенкой цилиндра. Время опыта устанавливается по электросекундомеру, который включается и выключается кнопками 8 и пружинами 7 при прохождении диска 2 сверху вниз. Изотермические условия поддерживаются прокачкой воды от термостата по рубашке 4. Постоянство массы грузов и скорости поршня обеспечивает одинаковое напряжение сдвига во время опыта, следовательно, время истечения массы является реологическим фактором, как бы «кажущейся» вязкостью. Расчет ведется по формуле

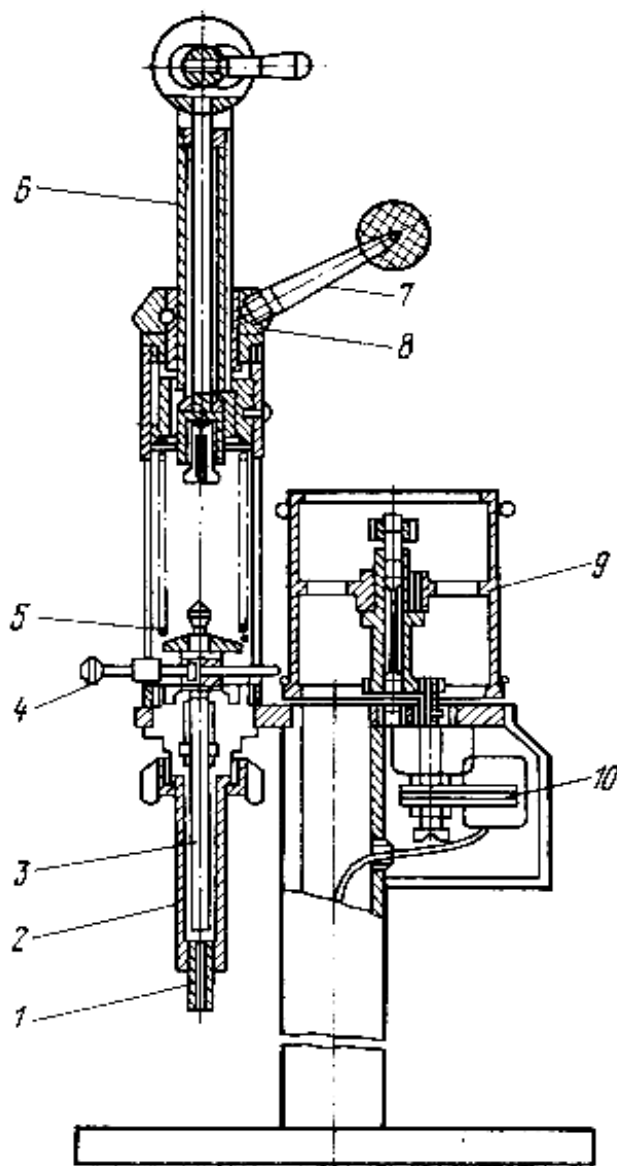


Рисунок 62 – Капиллярный вискозиметр АКВ-5

$$L_S = tV\rho_c \quad (73)$$

где  $L_S$  - реологический фактор, соответствующий «кажущейся» вязкости, Па·с;

$t$  - время истечения, с;

$V$  - геометрическая постоянная установки, определяемая по форму-

ле (74)

$$V = \frac{gD^4p}{128FS} \ln \frac{S+H_1}{S+H_2} \quad (74)$$

где  $g$  - ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

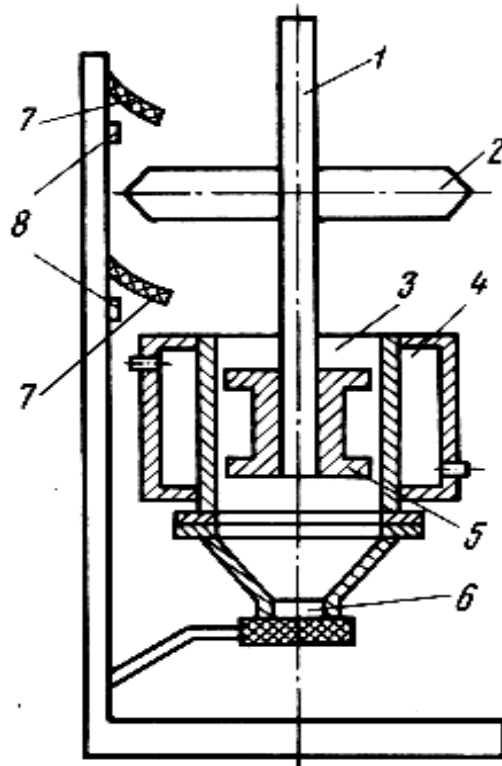


Рисунок 63 – Консистометр для фруктовых и овощных пюре

$D$  - диаметр отверстия, м;

$F$  - площадь поперечного сечения рабочего цилиндра, м<sup>2</sup>;

$S$  - длина калиброванного отверстия, м;

$H_1$  и  $H_2$  - расстояние от выходного отверстия до положения поршня соответственно в конце и начале опыта, м;

$\rho_c$  - суммарная «плотность» поршня, грузов и пищевой массы, кг/м<sup>3</sup>, определяемая по формуле (75)

$$c_c = \frac{4[M_{\text{п}} + M_{\text{г}} + F(H_2 - H_1)\rho_{\text{м}}]}{\rho D^2 (H_2 - H_1)} \quad (75)$$

где  $M_{\text{п}}$  и  $M_{\text{г}}$  - масса соответственно поршня и грузов, кг;

$\rho_{\text{м}}$  - плотность пищевой массы, кг/м<sup>3</sup>.

Расхождение результатов определения времени истечения концентрированных томатопродуктов и яблочного пюре не должно превышать 1 с, томатного сока - 0,1 с.

Важным преимуществом капиллярной вискозиметрии является возможность моделирования реальных технологических процессов, поэтому эти методы широко используются при исследовании формирования выдавливанием, транспортирования по каналам различной длины и формы, а также определения зависимости реологических характеристик продуктов от технологических факторов.

Известно, что большинство пищевых масс имеют значительную вязкость и не могут течь подобно жидкостям при сколь угодно малых напряжениях. Поэтому при постановке эксперимента необходимо создать условия для принудительного течения массы через капилляр. Опыт основан на учете расхода массы через сечение капилляра и соответствующих значений избыточного давления, за счет которого масса течет через капилляр. Для пищевых масс, обладающих малой текучестью, применяют капилляры с рифленой рабочей поверхностью, что гарантирует прилипание массы к стенке капилляра;

Вакуумный капиллярный вискозиметр (рисунок 64), созданный в Киевском НПО «Пищемаш», предназначен для определения вязкости мучного теста, отформованных тестовых заготовок без предварительного разрушения структуры. Основным рабочим органом прибора является сменный капилляр 10, изготовленный из органического стекла. Капилляр вставлен во втулку 12, к которой сверху прикреплен предметный стол. Втулка закреплена на корпусе, состоящем из двух соединенных между собой гильз 2 и 8. Гильза 2 крышкой 1 прижимается к основанию прибора. Внутри капилляра во втулках 4 и 16 свободно перемещается стержень 9, сверху заканчивающийся насадкой 11. Снизу к стержню прикреплен поплавок 3, который погружен в масло с низкой вязкостью, к средней части - сердечник 7. Масса поплавковой системы регулируется шайбами 19 так, чтобы верхняя плоскость насадки 11 в исходном положении находилась в плоскости стола. При этом усилие выталкивания плавающей системы должно быть минимальным.

Между торцами втулки 12 и гильзы 2 через шайбы 17 заземлена индуктивная катушка 6, которая подключена к прибору 18 – на нем записывается перемещение сердечника со стержнем.

Через патрубок 15 к прибору присоединен вакуумный насос, создающий разрежение, необходимое для течения теста в капилляре. Для предотвращения подсосывания воздуха между капилляром 10 и втулкой 12 установлено резиновое кольцо 13, прижимаемое гайкой 14. Трубка 5 служит для подачи жидкости в полость гильзы 2 и катушки 6.

Перед проведением опыта прибор устанавливают по отвесу. Через трубку 5 в полость гильзы 2 заливают масло до уровня верхнего обреза трубки. Определяют усилие, необходимое для начала погружения плавающей системы, нагружая для этого верхнюю расширенную часть стержня 9. Во втулку 12 вставляют капилляр и контролируют плотность обжатия его кольцом 13.

На предметный столик кладут кусок теста, включают прибор 18 и подключают вакуум к измерительной системе. Перемещение сердечника, контактирующего с протекающим по каналу тестом, записывается на ленте прибора, шкала которого градуирована в миллиметрах перемещения стержня 9.

Вискозиметры переменного уровня, или свободного истечения, - приборы, принцип действия которых основан на истечении материала под действием собственной массы /3/. Основным узлом в них является емкость с

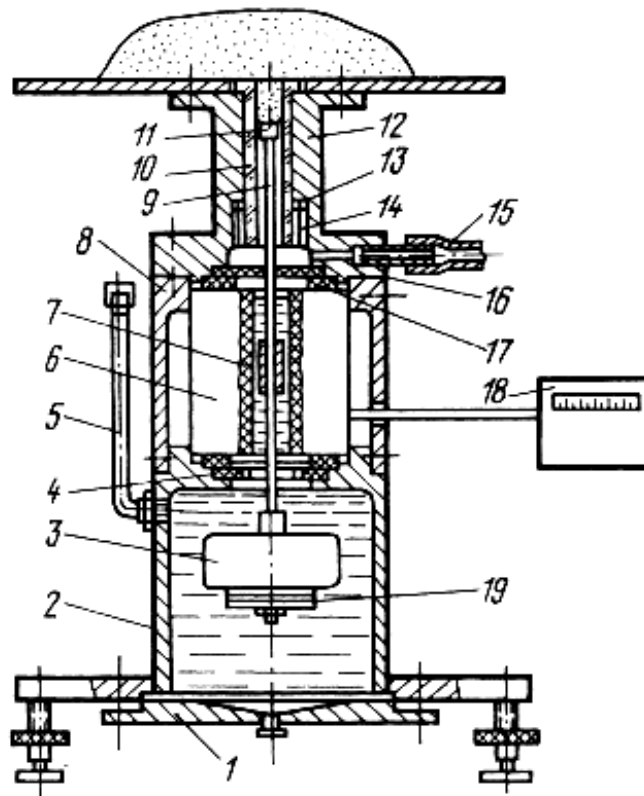


Рисунок 64 – Вакуумный вискозиметр

расположенной внизу калиброванной трубкой. Расход жидкости поддерживается постоянным, а уровень ее изменяется пропорционально вязкости. Измеряя высоту уровня, находят значение исследуемой вязкости.

Одним из приборов переменного уровня является вискозиметр Лейба, который состоит из двух сосудов, расположенных один под другим. Жидкость поступает в верхний сосуд и вытекает по капилляру в нижний с более длинным капилляром. Стационарное состояние устанавливается при определенном гидростатическом столбе жидкости в нижнем сосуде. По высоте этого столба судят о значении вязкости данной жидкости.

Вискозиметры постоянного уровня (рисунок 65) основаны на наблюдении за характером струи жидкости, вытекающей из капилляра, по которому судят о величине вязкости. На определенном расстоянии от сопла-капилляра 1 происходит дробление струи, причем, чем меньше вязкость жидкости, тем меньше расстояние до места дробления. Следящее устройство в виде каретки с фотоэлементом 3 перемещается вдоль трубки 2. При прохождении фотоэлементом точки дробления в цепи меняется фототок, который регистрируется вторичным прибором.

Капиллярный вискозиметр для определения вязкости жидкостей в



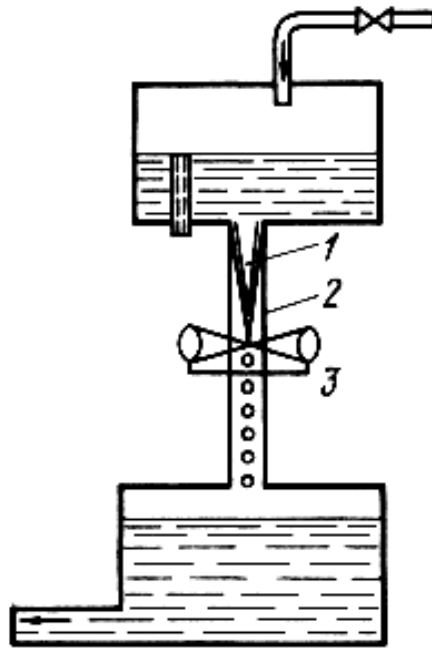


Рисунок 65 – Вискозиметр постоянного уровня

производственных условиях показан на рисунке 66. Его можно погружать в емкость с небольшим объемом жидкости, и нет необходимости отбора её пробы. Глубина погружения отмечается по смачиванию градуированной трубки 3. Жидкость входит в трубку 1 и заполняет сосуд 2, при этом воздух вытесняется и поступает в сосуд 6. Дебит воздуха в капилляре при установившемся движении будет равным скорости поступления жидкости в сосуд. При этом скорость воздуха, проходящего через капилляр 5, измеряется по поднятию воды в трубке 4, играющей роль манометра. Таким образом, чтобы получить определенное значение, отмеченное на трубке 4, в зависимости от вязкости жидкости погружение должно быть различным: чем больше вязкость, тем больше должна быть глубина погружения. После проведения опыта нажимают на стержень 8, который удерживается пружиной 7, и жидкость через клапан 9 вытекает из прибора. В зависимости от диаметра трубки 1 можно измерять и вязкость суспензий, содержащих взвешенные частицы определенного размера.

Вискозиметр для измерения вязкости суспензий, в которых твердую фазу необходимо поддерживать во взвешенном состоянии, снабжают перемешивающими устройствами. В корпус вискозиметра 6 (рисунок 67) вливают исследуемую жидкость через воронку 3 с краном 4. Перемешивание осуществляется лопастями 7, расположенными на валу 5, приводимом от электродвигателя 1. Вал укреплен в корпусе вискозиметра уплотнением 2. Скорость истечения жидкости через капилляр 8 можно менять и регулировать с помощью сжатого воздуха, поступающего через патрубок 9. Давление воздуха контролируют манометром, подсоединяемым к трубке 10. Так при разных давлениях замеряется

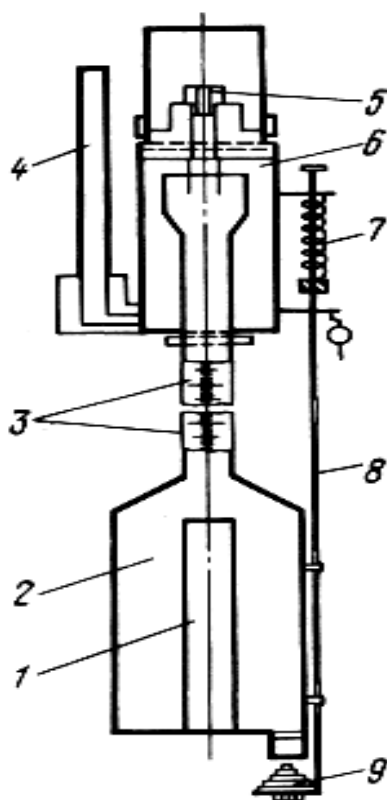


Рисунок 66 – Производственный капиллярный вискозиметр постоянного уровня

дебит суспензии капилляром. Полученные результаты обрабатываются известным способом; можно снять кривую течения. Чтобы уменьшить влияние гидростатического давления, объем резервуара должен превышать объем протекающей жидкости при одном замере в 10 - 12 раз. Размер капилляра определяют из теории капиллярной вискозиметрии.

В заключение рассмотрим три простейших капиллярных вискозиметра истечения - Энглера, Редвуда и Форда, которые хотя и не имеют теоретического обоснования, однако часто применяются в производственных технических лабораториях. К существенным недостаткам приборов относятся короткий рабочий капилляр, переменное гидростатическое давление, неточность распределения термостатирующей жидкости и др. Поэтому их не рекомендуют использовать при научных исследованиях.

Вискозиметр Энглера предназначен для определения относительного времени истечения жидкостей, т.е. для определения вязкости в градусах Энглера. На рисунке 68 дана схема такого вискозиметра марки ОВ-108 (ВНР). Резервуар 5 заполняется испытуемой жидкостью до указателя уровня 7 (около 200 см<sup>3</sup>). После удаления палочки 2 жидкость вытекает через трубку 9. При этом определяется время вытекания  $\tau_{ж}$ . Контрольный опыт проводится на таком же количестве дистиллированной воды с определением времени ее вытекания ( $\tau_{в}$ ). Вязкость в градусах Энглера определяется отношением

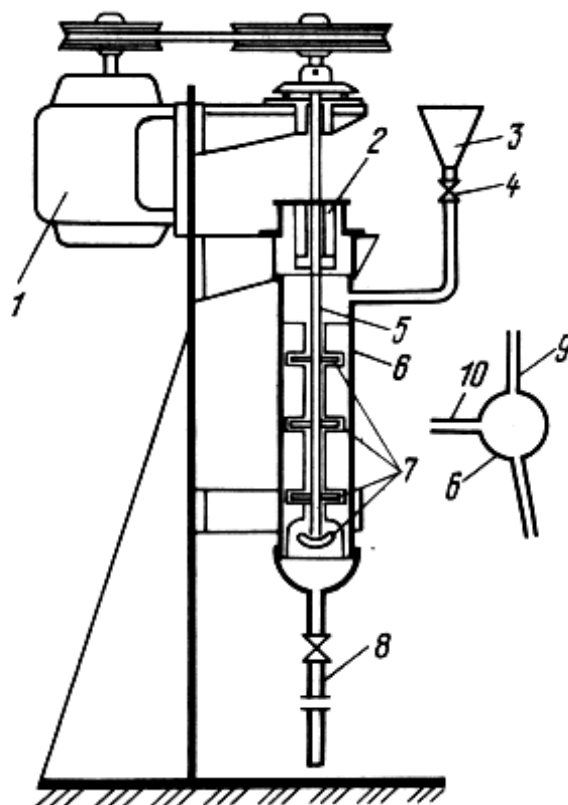


Рисунок 67 – Вискозиметр для суспензий

$$^{\circ}\text{E} = \tau_{\text{ж}}/\tau_{\text{в}} \quad (76)$$

Температура термостатирующей жидкости в сосуде 6 поддерживается нагревателем 5, встроенным в дно водяной бани, и регулируется тиристорным регулятором. Для выравнивания температуры имеется мешалка 10 с ручкой 1. Температура измеряется термометрами 3 и 4. Сточная трубка имеет длину 20 мм, верхний диаметр 2,9 мм и нижний - 2,8 мм. Мощность нагревателя 400 Вт. Прибор довольно широко используется для измерения вязкости различных жидкостей в производственных условиях.

Для пересчета вязкости в градусах Энглера в единицы динамической вязкости в литературе имеются различные эмпирические формулы, например

$$\eta = (7,24 ^{\circ}\text{E} - 6,25/^{\circ}\text{E})\rho/10^6 \quad (77)$$

где  $\eta$  - динамическая вязкость, Па·с;  
 $^{\circ}\text{E}$  - вязкость в градусах Энглера;  
 $\rho$  - плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>.

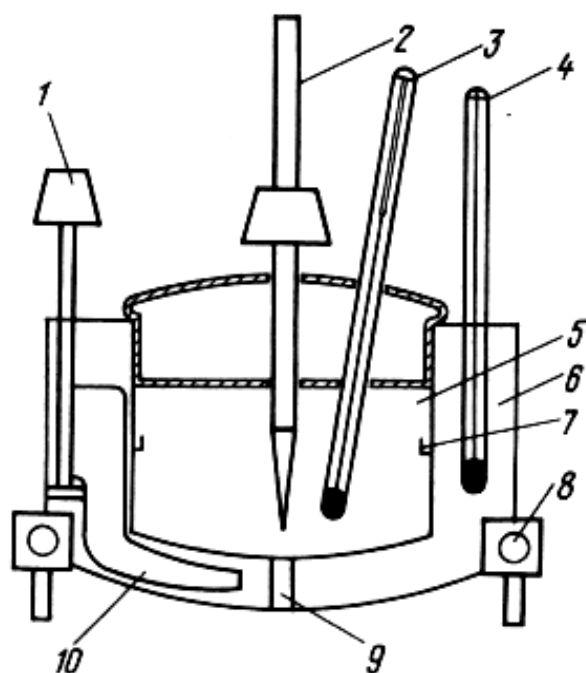


Рисунок 68 – Вискозиметр Энглера

Вискозиметр Энглера применяли для маловязких пищевых продуктов: мясокостных бульонов, растворов желатина, молочных изделий и т.п. По данным А.А. Соколова, вязкость стандартного раствора клея (17,75 % сухого вещества) при 30 °С находится в пределах от 1,8 до 6 °Е (от 0,01 до 0,045 Па·с). Вязкость мясокостного бульона при этих же условиях равна 2,1 °Е (около 0,013 Па·с). Растворы желатина той же концентрации при 40 °С имеют вязкость от 15 до 40 °Е (от 0,11 до 0,3 Па·с).

Вискозиметр Редвуда (рисунок 69) имеет небольшую емкость 2 для исследуемой жидкости, которая вытекает из нее при открывании короткого капилляра 6. Отверстие для истечения жидкости закрывается шариком на палочке 3. Жидкость вытекает в мензурку, расположенную под прибором. Температура термостатирующей жидкости в емкости 4 с мешалкой 5 находится по термометру 1. Вязкость жидкости в градусах Редвуда определяется по времени истечения жидкости объемом 25-75 см<sup>3</sup>.

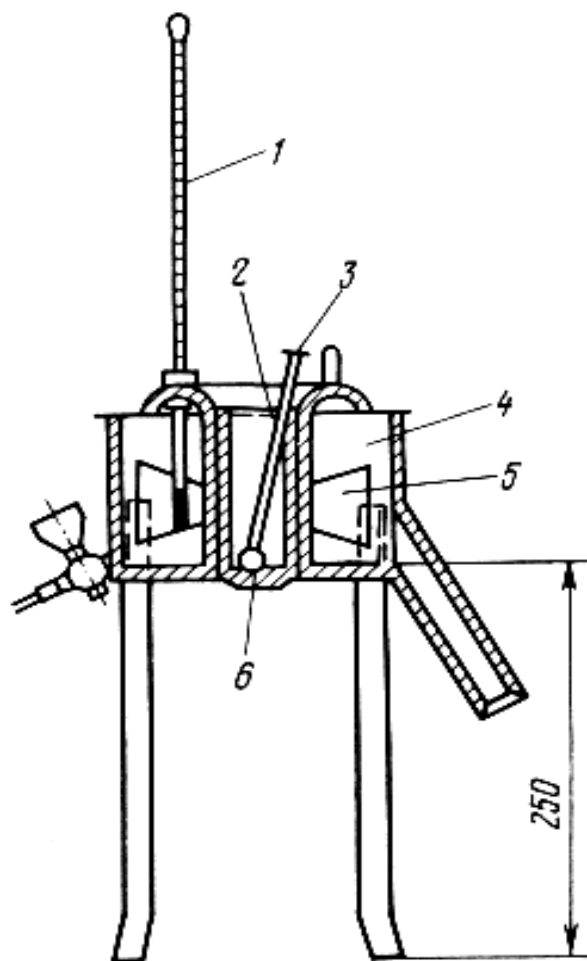


Рисунок 69 – Вискозиметр Редвуда

## 20.2 Теория эксперимента и задачи исследования

Кривые течения пищевой массы, т.е. зависимости скорости сдвига от напряжения сдвига, могут быть получены не только на ротационном, но и капиллярном вискозиметре. Принцип действия капиллярного вискозиметра основан на продавливании массы через трубку (капилляр) определённых размеров. При этом фиксируют расход массы (скорость течения) и перепад давления на длине капилляра.

В автоматическом капиллярном вискозиметре АКВ-2 с целью получения за один опыт зависимости вязкости от скорости сдвига и перепада давления применена тарированная пружина, создающая в процессе испытаний давление на массу и тем самым обеспечивающая переменную скорость истечения её из капилляра. По характеристике пружины, зная величину сжатия пружины, можно в любой момент времени определить давление, под действием которого исследуемая масса вытекает из капилляра.

Напряжение сдвига согласно теории Капиллярной вискозиметрии пропорционально давлению на испытываемую среду. Скорость истечения массы из капилляра определяется скоростью деформации сдвига. Причём скорость истечения массы однозначно зависит от скорости перемещения штока вискозиметра, приводимого в движение тарированной пружины и выполняющего роль поршня.

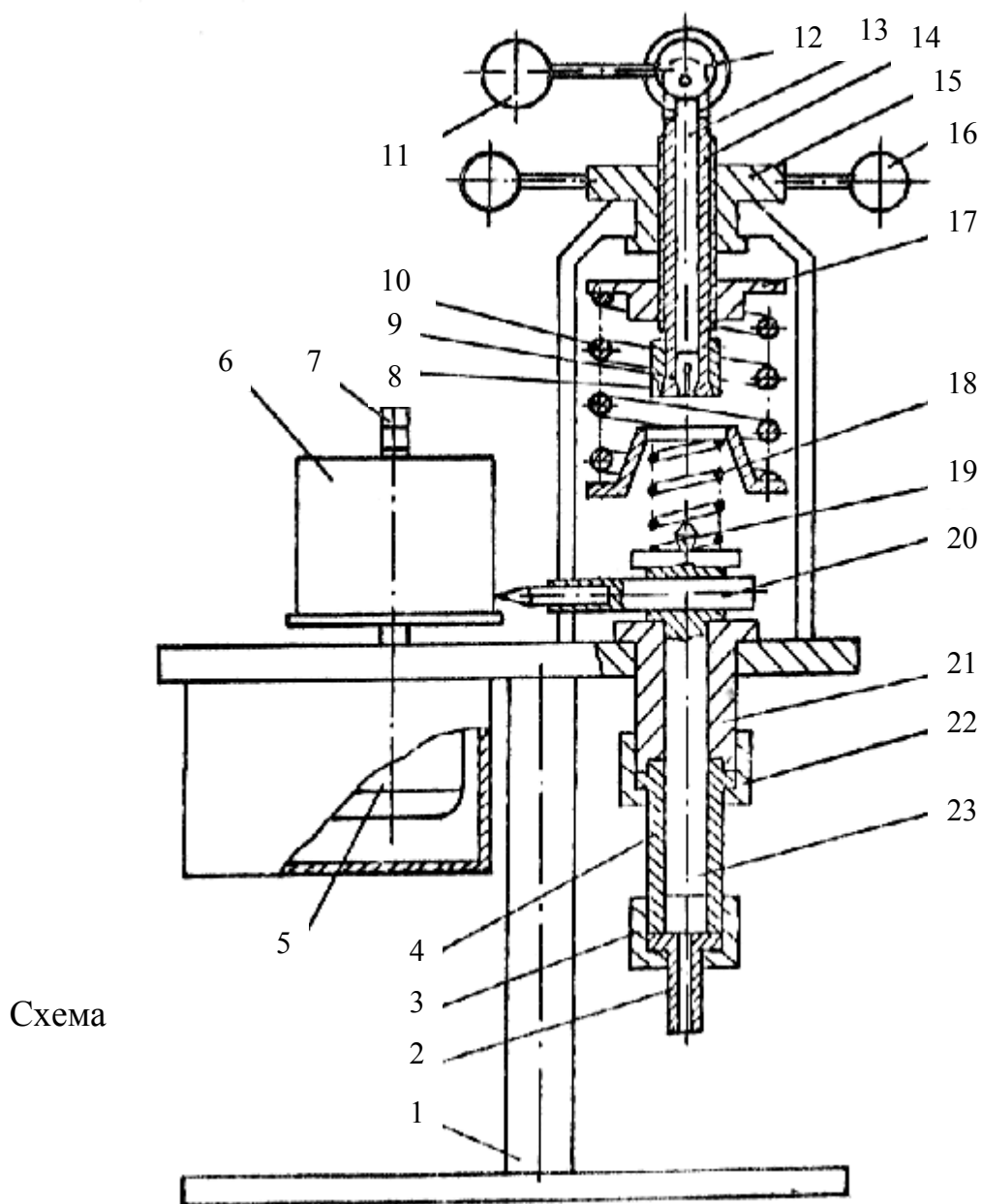
Целью данной работы является построение графиков зависимостей скорости сдвига от напряжения сдвига и эффективной вязкости от скорости сдвига для тестообразной массы путём продавливания её через три капилляра, отличающихся размерами. По графикам оценивают характер реологического поведения исследуемой массы и влияние размеров капилляра на полученные результаты.

### **20.3 Описание экспериментальной установки**

Схема прибора АКВ-2 представлена на рисунок 70. Прибор состоит из рабочего узла, барабана с приводом и штатива.

Прибор установлен на штативе 1. Рабочий узел содержит измерительную камеру 4, к которой прикреплен капилляр 2 с помощью накидной гайки 3. Измерительная камера 4 соединяется с помощью накидной гайки 22 с направляющей втулкой 21, в которой с возможностью осевого перемещения установлен шток 23. В верхней части штока имеется горизонтальное отверстие, в котором находится держатель 20 с карандашом. Шток 23 плотно входит в измерительную камеру 4. Между верхним торцом штока 23 и стаканом 17 находятся две цилиндрические пружины 10 и 18. Перемещение штока 23 осуществляется винтом 14 при вращении гайки 15 с рукояткой 16. Для этого винт 14 на нижнем конце имеет канту 9, которая при контакте со штоком 23 охватывает фигурный выступ 19 в верхней части штока. Зажим и ослабление канту 9 осуществляется осевым перемещением подвижного стержня 13, связанного с втулкой 8, охватывающей канту 9. Перемещение подвижного стержня 13 происходит под действием эксцентрика 12 при повороте рукоятки 11 на  $180^\circ$  вокруг своей оси.

Карандаш, установленный в держателе 20, остриём упирается в барабан 6, который приводится во вращение синхронным электродвигателем 5. Переключение скоростей вращения барабана 6 осуществляется без остановки электродвигателя с помощью четырёхступенчатого редуктора при нажатии на ось 7 барабана 6.



Схема

Рисунок 70 –

капиллярного вискозиметра АВК-2

#### 20.4 Методика проведения исследований

Перед началом измерений прибор необходимо подготовить к работе. Для этого вращением рукоятки 16, опуская винт 14, сжимают пружины 10 и 18 настолько, чтобы цанга 9 захватила фигурный выступ 19 штока 23. Момент захвата сопровождается лёгким щелчком.

Перевернув рукоятку 11 на  $180^\circ$ , опускают вниз эксцентрик 12, вследствие чего втулка 8 зажимает цангу 9. После этого вращением рукоятки 16 в обратную сторону поднимают шток 23 в крайнее верхнее положение - выше нуля по шкале прибора. Измерительную камеру 4 снимают, протирают чистой тряпкой и заполняют подготовленной массой. Капилляр 2 вставляют в измеритель-

ную камеру 4 и закрепляют накидной гайкой 3. Затем камеру 4 с капилляром соединяют с направляющей втулкой 21 и фиксируют накидной гайкой 22.

Барабан 6 самописца обёртывают листом бумаги, предназначенной для записи, так, чтобы нижний обрез его соприкасался с нижним буртиком барабана, и прилипают бумагу резиновыми кольцами, накатав их на бумагу. Под капилляр подставляют сосуд для сбора выдавливаемой массы. Барабан устанавливают на нужную скорость нажатием левой руки на ось 7 вниз, а правой рукой резким вращением барабана против часовой стрелки до появления отметки, соответствующей требуемой скорости.

Измерения проводят следующим образом. Вискозиметр включают в сеть. При этом карандаш должен чертить на бумаге горизонтальную линию на уровне, соответствующем максимальному сжатию пружины. Вращением рукоятки 16 стрелку прибора устанавливают на нуль. Затем быстро, но без толчков, переставляют рукоятку 11 в другую сторону и освобождают цангу 9. При этом сжатые пружины 10 и 18 выталкивают фигурный выступ 19 из цанги 9, нагружают шток 23 и создают в измерительной камере 4 давление, под действием которого исследуемая масса начинает вытекать из камеры через капилляр 2. При этом карандаш вычерчивает кривую зависимости перемещения штока от времени.

Во время работы прибора нужно следить за движением карандаша по бумаге и в тот момент, когда кривая, вычерчиваемая карандашом, станет приближаться к горизонтали, барабан необходимо переключить на меньшую скорость. При переключении скорости резко меняется крутизна кривой. То же самое при необходимости повторяется до конца эксперимента.

Когда шток достигает крайнего нижнего положения, или когда кривая, записываемая при наименьшей скорости вращения барабана, приблизится к горизонтали, следует остановить двигатель самописца.

По окончании опыта записывают на диаграмме, закрепленной на барабане самописца, название испытуемой массы, номер капилляра и отмечают на кривой участки, соответствующие различным скоростям вращения барабана.

Одним и тем же листом бумаги можно пользоваться для нескольких опытов.

После испытания снимают с прибора рабочий узел и подготавливают прибор для проведения следующего опыта.



## Список использованных источников

1. Байгильдин Р.Х. Совершенствование процесса механической обработки творога жирного и творожно-сырковых продуктов по структурно-механическим характеристикам: Автореф. канд. дис. - М.: МТИММП, 1983. - 24 с.
2. Белкин И.М., Виноградов Г.В., Леонов А.И. Ротационные приборы. - М.: Машиностроение, 1968. - 272 с.
3. Гольцын А.А. Определение величины скорости сдвига на ротационных приборах по различным формулам. // Мясная индустрия СССР. - 1974. - № 7 - С. 39 - 42.
4. Горбань М.В., Груздев И.Э., Корнильев И.Б. Определение вязкостных характеристик колбасного фарша. // Мясная индустрия СССР. - 1978. - № 6 - С. 38 - 40.
5. Горбатов А.В. Реология мясных и молочных продуктов. - М.: Пищевая промышленность, 1979. - 384 с.
6. Горбатов А.В., Щукин В.М. К теории ротационной вискозиметрии. Известия вузов СССР. // Пищевая технология. - 1980. - № 6 - С. 108 - 113.
7. Исследование реологических свойств яичного меланжа / Полякова Г.А., Гаврилин А.В., Булгаков Н.И., Космодемьянский Ю.В. // Мясная индустрия СССР. - 1979. - № 11 - С. 32 - 34.
8. Крутоголов В.Д., Кулаков М.И. Ротационные вискозиметры. - М.: Машиностроение, 1984. - 112 с.
9. Крючков И.В. Основные закономерности непрерывного извлечения плодовых соков и разработка оборудования для поточных линий. - Автореф. докт. дис. - М.: МТИПП, 1978.- 37 с.
10. Маслов А.М. Аппараты для термообработки высоковязких жидкостей. - Л.: Машиностроение, 1980. - 208 с.
11. Маслова Г.В., Маслов А.М. Температурно-инвариантная характеристика вязкости рыбных фаршей. // Известия вузов. Пищевая технология. - 1973. - № 5 - С. 61 - 63.
12. Мачихин Ю.А., Мачихин С.А. Инженерная реология пищевых материалов. - М.: Лёгкая и пищевая промышленность, 1981. - 216 с.
13. Николаев Л.К. Обобщенные реологические характеристики плавленых сыров. // Известия вузов. Пищевая технология. - 1978. - № 6 - С. 97 - 106.
14. Проселков В.Г., Самусенко Ю.В. О практическом использовании ротационной вискозиметрии при исследовании реологических характеристик рыбных фаршей. - М.: ЦНИИТЭИРХ, 1983. - 5 с.
15. Реометрия пищевого сырья и продуктов: Справочник. - М.: Агропромиздат, 1990. - 271 с.
16. Савченко И.В. Сравнение реологических уравнений состояния, найденных при помощи капиллярного и ротационного вискозиметров. // Коллоидный журнал. - 1967. - Т. 29. - № 6 - С. 887 - 890.

17. Сорокин С.В. Исследование реологических свойств и процесса транспортирования заквасок в хлебопекарном производстве: - Автореф. канд. дис. - М.: МТИПП. - 1979. - 25 с.

18. Структурно-механические характеристики пищевых продуктов. – М.: Лёгкая и пищевая промышленность, 1982. – 296 с.

19. Шульман З.П., Носов В.М. Вращение непроводящих тел в электро-реологических суспензиях. - Минск: Наука и техника. - 1985. - 112 с.