

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Оренбургский государственный университет»
Кафедра технологии пищевых производств

Е.В. Волошин

ИНЖЕНЕРНАЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ

Методические указания

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Оренбургский государственный университет» для обучающихся по образовательной программе высшего образования по направлению подготовки 19.03.02 Продукты питания из растительного сырья

Оренбург
2019

УДК 664.72 (075.8)
ББК 36.821 я 73
В 68

Рецензент – кандидат технических наук, доцент С.В. Антимонов

Волошин, Е.В.
В 68 Инженерная физико-химическая механика дисперсных систем: методические указания / Е.В. Волошин; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2019 – 59 с.

Методические указания предназначены для проведения лабораторных работ по дисциплине «Инженерная физико-химическая механика дисперсных систем» очной и заочной форм обучения по направлению подготовки 19.03.02 Продукты питания из растительного сырья по общему профилю подготовки.

УДК 664.72 (075.8)
ББК 36.821 я 73

© Волошин Е.В., 2019
© ОГУ, 2019

Содержание

Введение.....	4
1 Лабораторная работа №1 Математическая интерпретация структурно-механических моделей тел.....	5
1.1 Теоретические положения.....	5
1.2 Механические модели, отражающие элементарные структурно-механические свойства.....	8
1.3 Уточнение структурно-механических моделей, позволяющих лучше описывать поведение реальных материалов.....	10
1.4 Структурно-механическая модель тела Кельвина.....	13
1.5 Структурно-механическая модель тела Максвелла.....	16
1.6 Структурно-механическая модель тела Бингама.....	18
1.7 Правила построения математической модели по имеющейся структурно-механической.....	20
1.8 Пример составления математической модели по имеющейся структурно-механической.....	22
2 Лабораторная работа №2 Изучение структурно-механических характеристик дисперсных систем.....	23
2.1 Классификация структур дисперсных систем.....	1
2.2 Классификация дисперсных систем.....	25
2.3 Порядок выполнения работы.....	26
3 Лабораторная работа №3 Методы и приборы для измерения сдвиговых характеристик.....	26
3.1 Классификация методов и приборов для измерения структурно-механических характеристик.....	26
3.2 Методы и приборы для измерения сдвиговых характеристик.....	27
3.3 Описание лабораторной установки.....	47
3.4 Порядок выполнения работы.....	47
4 Лабораторная работа №4 Методы и приборы для относительных и условных измерений структурно-механических характеристик.....	49
4.1 Оборудование, приборы и реактивы.....	49
4.2 Приборы для определения относительных и условных измерений.....	49
4.3 Порядок выполнения работы.....	58
Список использованных источников.....	59

Введение

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

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

б) исследование, обоснование и оптимизацию путей получения структур с заранее заданными технологическими (в самом широком понимании этого слова) свойствами.[1,2]

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

Инженерная физико-химическая механика решает перечисленные выше задачи и, кроме того, разрабатывает способы приложения установленных закономерностей для расчета машин и аппаратов и оперативного контроля основных показателей качества по значениям величин структурно-механических характеристик. [1]

Для продуктов пищевой промышленности к настоящему времени накоплен обширный фактический материал, относящийся к инженерной физико-химической механике. Однако не все исследования выполнены на должном научно-теоретическом и методическом уровне, что резко снижает их ценность, а иногда делает непригодными для практического использования, за исключением ограниченного количества частных задач.

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

1 Лабораторная работа №1 Математическая интерпретация структурно-механических моделей тел

Цель работы: Изучить методы математического описания поведения материалов под нагрузкой по их структурно-механическим моделям.

1.1 Теоретические положения

Пищевые продукты сложны по химическому составу [1] и обладают комплексом различных свойств, которые составляют в совокупности качество продукции и должны быть учтены при расчете процессов и аппаратов и их совершенствовании. Существующие в настоящее время методы оценки качества продукции часто субъективны и далеки от совершенства. При проектировании машин и аппаратов не всегда верно учитываются важнейшие физические свойства пищевых продуктов. Для научно обоснованного учета этих свойств в различных областях техники и технологии пищевых производств необходима систематизация данных о структурно-механических характеристиках продуктов.

Наиболее полное представление о некоторых существенных аспектах качества продукта может дать группа физических свойств, которая проявляет зависимость от биологического и химического состава (рецептуры) и внутреннего строения (структуры продукта). Небольшие изменения этих определяющих характеристик должны вызывать значительные изменения величин свойств, которые регистрируются приборами. При этом характеристики сырья определяют основные показатели готовых продуктов. К одной из групп таких свойств относятся структурно-механические.

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

Для получения уравнений, применяемых в технических расчетах, в большинстве исследований и выводов из них основываются на гипотезах, рассматривающих материал с макроскопической точки зрения в качестве сплошной деформируемой среды, мерами подвижности частиц которой

являются амплитуда и скорость смещения, с непрерывным распределением основных физических свойств и деформаций.

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.

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 1.1.

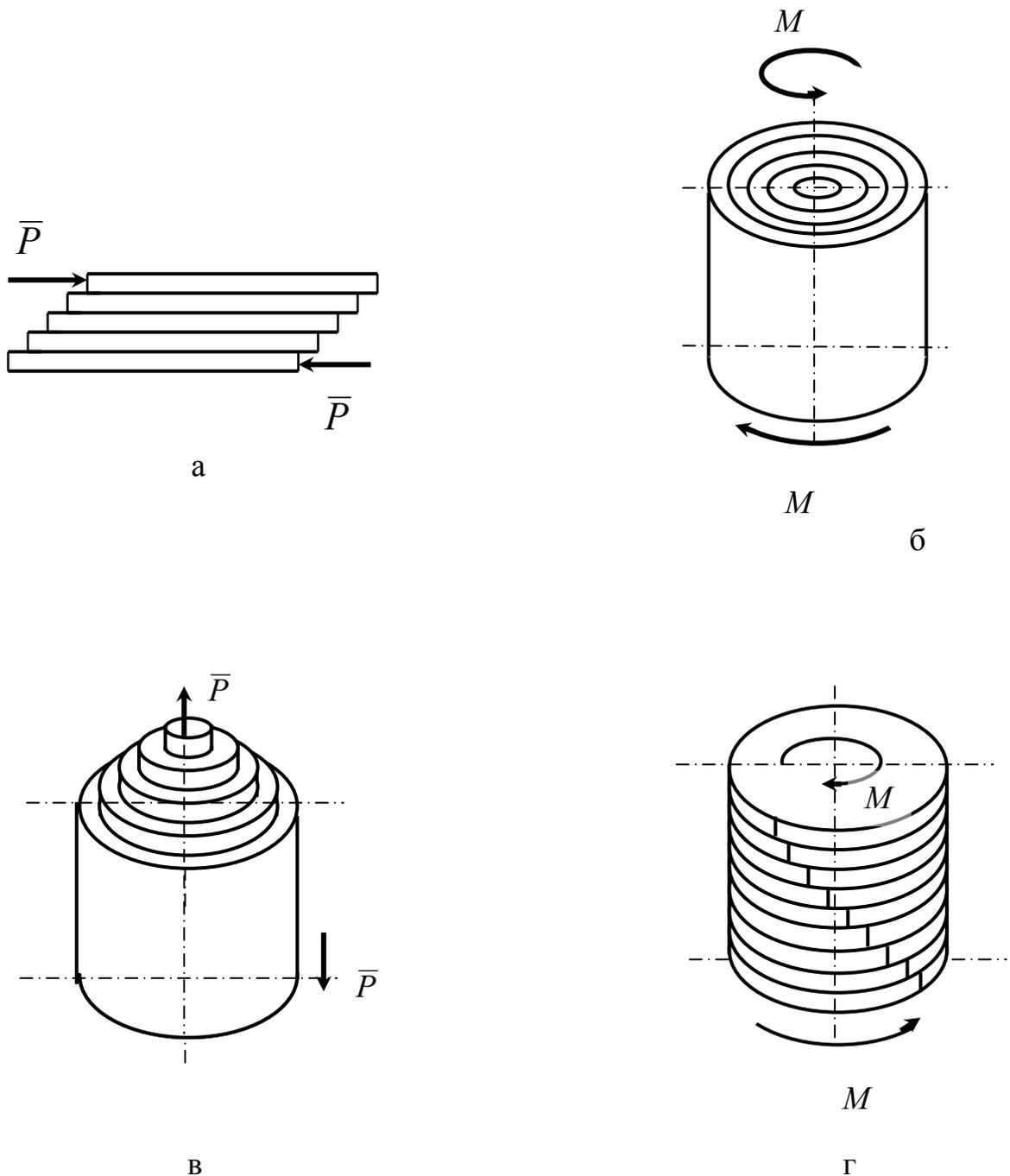
Напряжение является мерой интенсивности внутренних сил упругости. Величина и характер деформации зависят от свойств и материала тела, его формы и способа приложения внешних сил. Деформация сопровождается возникновением внутренних сил взаимодействия между частицами тела. Различают полное, нормальное и 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 понимают сопротивление тела действию касательной составляющей приложенной силы. Если при всестороннем 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.

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.[1]



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

Рисунок 1.1 – Виды ламинарного смещения

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.

Различные материалы представляются структурно-механическими моделями, составленными из простых идеализированных тел. Структурно-

механические модели позволяют представить, как ведет себя тот, или иной, материал под нагрузкой. По этим моделям составляют математические уравнения зависимостей различных параметров: касательных τ и нормальных σ напряжений, угловых γ и линейных ε деформаций, скоростей изменения этих деформаций ($\dot{\gamma}$ и $\dot{\varepsilon}$), времени t . Зависимости параметров между собой часто изображают на графиках.

1.2 Механические модели, отражающие элементарные структурно-механические свойства

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

Моделью упругого твердого тела является пружина, или тело Гука, в соответствии с рисунком 1.2.



Рисунок 1.2 - Механическая модель тела Гука

Соответствующей математической моделью является уравнение гуковского твердого тела для простого сдвига

$$\tau = G\gamma, \quad (1.1)$$

где G - модуль сдвига.

Для растяжения-сжатия

$$\sigma = E\varepsilon, \quad (1.2)$$

где E - модуль упругости.

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

Структурно-механической моделью вязкой жидкости является демпфер, в соответствии с рисунком 1.3, или тело Ньютона.

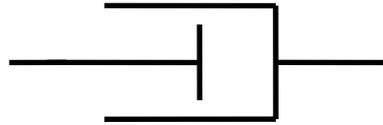


Рисунок 1.3 - Структурно-механическая модель тела Ньютона

Соответствующей математической моделью является уравнение состояния ньютоновского тела для простого сдвига

$$\tau = \eta \dot{\gamma}, \quad (1.3)$$

где η - вязкость.

Константой является вязкость η . Напряжение, возникающее в этом теле, прямопропорционально скорости сдвига.

Модель идеальнопластичного тела изображается в виде пары трения, в соответствии с рисунком 1.4, и определяется как тело Сен-Венана.



Рисунок 1.4 - Структурно-механическая модель тела 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 τ является константой элемента пластичности.

Модель твердого тела, или тело Ренкина, изображается как пара сцепленных пластин, в соответствии с рисунком 1.5. Константа данного элемента - предел прочности τ_B или σ_B . Если при осевом нагружении достичь предела прочности ($\sigma = \sigma_B$), сцепленные пластины необратимо разъединяются ($\varepsilon \rightarrow \infty; \dot{\varepsilon} \rightarrow \infty$). При нагружении менее предела прочности ($\sigma < \sigma_B$) тело неподатливо ($\varepsilon = 0; \dot{\varepsilon} = 0$).



Рисунок 1.5 - Структурно-механическая модель тела Ренкина

Модель твердого тела, в соответствии с рисунком 1.6, учитывающая необратимую мгновенную деформацию, была введена Пелегом.

При нагружении тело Пелега сначала деформируется в пределах $0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_k$, а после достижения контакта ведет себя как жесткое тело.[2]



Рисунок 1.6 - Структурно-механическая модель тела Пелега

1.3 Уточнение структурно-механических моделей, позволяющих лучше описывать поведение реальных материалов

Поведение реальных материалов, перерабатываемых пищевыми материалами, плохо описывается уравнениями идеальных тел, то есть реальные материалы, как правило, не являются ни чисто упругими, ни чисто вязкими, ни пластичными.

Существует два пути составления новых уравнений, которые лучше описывают поведение реальных материалов, перерабатываемых в пищевой промышленности.

Первый путь - это установление тех или иных отклонений от «идеального» поведения, описываемого одним из трех названных выше уравнений. Например, есть идеальная вязкая ньютоновская жидкостью. В уравнение этой модели входит коэффициент вязкости μ , 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 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,

пратине - 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 $\mu_{эф}$.

$$\mu_{эф} = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} . \quad (1.4)$$

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

В инженерной практике в качестве уравнения жидкостей, не являющихся ньютоновскими и называемыми «неньютоновскими», используется часто уравнение степенного вида

$$\tau = k \cdot \dot{\gamma}^n , \quad (1.5)$$

где k и n - константы, характеризующие неньютоновскую жидкость.

В частном случае, когда $n = 1$, уравнение превращается в уравнение Ньютона. Для практического большинства реальных пищевых масс, ведущих подобно жидкостям, той или иной вязкости, константа $n < 1$.

Оствальд в 30-е годы ввел понятие структурированной системы, для которой можно наблюдать закон изменения эффективной вязкости, в соответствии с рисунком 1.7.

У реальных пищевых масс, структурированных систем, можно наблюдать три участка: участок 1 - малые сдвиговые напряжения, практически неразрушенная структура и соответствующая ей небольшая, носящая ньютоновский 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.

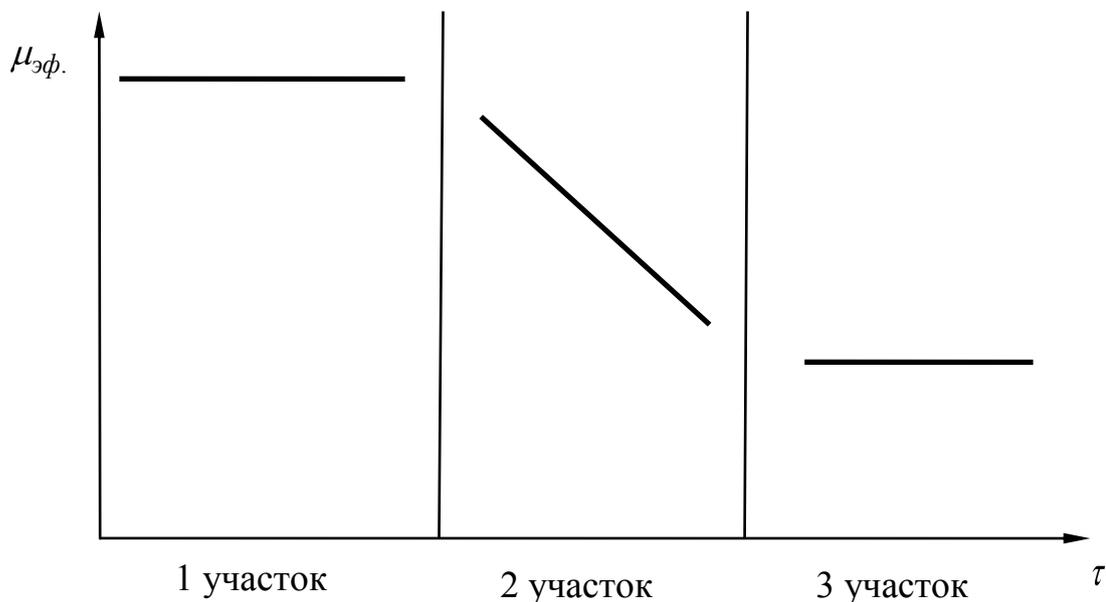


Рисунок 1.7 - Зависимость эффективной вязкости от напряжения для структурированных систем

Написанное выше уравнение (1.5), в случае, когда входящая в него константа $n < 1$, называется часто уравнением псевдопластики. Это уравнение является весьма распространенной в инженерной практике моделью, описывающей anomalously вязкое течение пищевых масс. Хотя, если быть более строгим, то можно сказать, что это «аномальное» поведение как раз и есть наиболее встречающееся. И лишь очень немногие реальные жидкости подчиняются «нормальному» ньютоновскому закону.

Второй путь уточнения описания 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 τ_0 начинается вязкое течение с каким-то значением вязкости, называемое в данном случае пластической вязкостью $\mu_{пл.}$ Модель такого поведения, называемая телом Шведова-Бингама (рисунок 1.8), имеет уравнение зависимости

$$\tau = \tau_0 + \mu_{пл.} \cdot \dot{\gamma}. \quad (1.6)$$

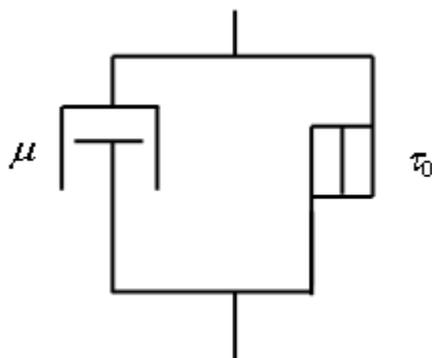


Рисунок 1.8 – Структурно-механическая модель тела Шведова-Бингама

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 1.9, 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 τ_0 пластическое течение.



Рисунок 1.9 – Структурно-механическая модель упруго-пластического тела

1.4 Структурно-механическая модель тела Кельвина

В 1890 году Уильям Томпсон (он же лорд Кельвин) ввел понятие вязкости твердого тела. Структурно-механическая модель тела Кельвина представляет собой параллельно соединенные элементы Гука и Ньютона, в соответствии с рисунком 1.10, с характеристиками G и μ . Наличие структурно-

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 γ_k равна деформации каждого элемента, а напряжение суммарного элемента τ_k равно сумме напряжений в отдельных элементах τ_Γ и τ_H . Эти соображения позволяют записать систему уравнений

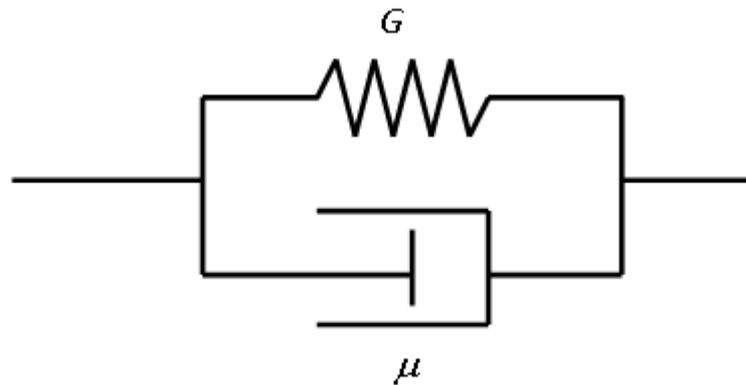


Рисунок 1.10 - Структурно-механическая модель тела Кельвина

$$\begin{cases} \gamma_K = \gamma_\Gamma = \gamma_H \\ \tau_K = \tau_\Gamma + \tau_H \end{cases} \quad (1.7)$$

Воспользуемся уравнениями элементов Гука и Ньютона

$$\begin{aligned} \tau_\Gamma &= G \cdot \gamma_\Gamma, \\ \tau_H &= \mu \cdot \dot{\gamma}_H. \end{aligned} \quad (1.8)$$

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

$$\tau = G \cdot \gamma + \mu \cdot \dot{\gamma}. \quad (1.9)$$

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 γ уравнение тела Кельвина, при $\tau = \tau_c = const$, получим уравнение кривой ползучести $\gamma = \gamma(t)$, именуемое часто кривой кинетики деформации

$$\gamma = \frac{\tau_c}{G} + c \cdot e^{-\frac{G}{\mu} \cdot t}, \quad (1.10)$$

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

Окончательно график уравнения кинетики деформации выглядит в соответствии с рисунком 1.11, где приведены кривые для трех различных пар значений констант μ и G , входящих в уравнение Кельвина.

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

При стремлении $t \rightarrow \infty$ деформация γ асимптотически приближается к значению $\frac{\tau_c}{G}$. Вспомнив, что для тела Гука, упругие деформации которого определяются соотношением $\gamma = \frac{\tau_c}{G}$ при приложении напряжения $\tau = \tau_0$, имела бы место мгновенно возникающая деформация, равная $\gamma = \frac{\tau_c}{G}$, то есть деформация, как раз равная тому значению, которого достигнет в конце концов деформация в теле Кельвина, при действии на него напряжения τ_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.

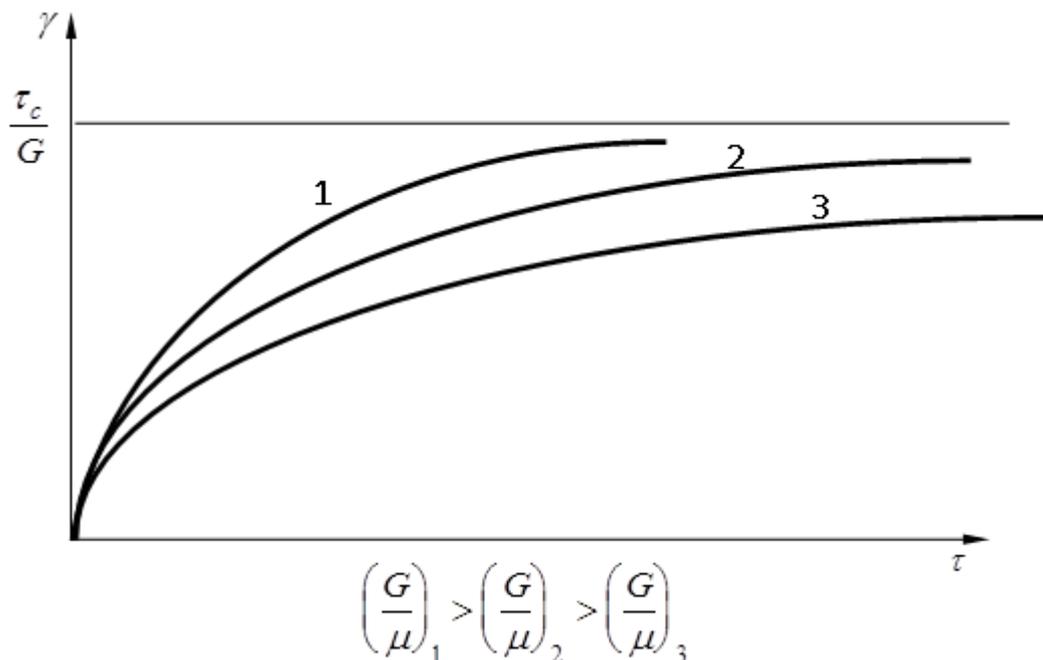


Рисунок 1.11 - Кривая кинетики деформации тела Кельвина

1.5 Структурно-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 с всё 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 модель - тело Максвелла. Структурно-механический вариант тела Максвелла представляет собой последовательно соединенные элементы Гука и Ньютона, в соответствии с рисунком 1.12.

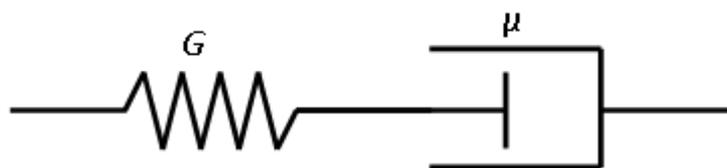


Рисунок 1.12 - Структурно-механическая модель тела Максвелла

В самом деле, рассматривая структурно-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 структурно-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 1.13, 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 структурно-механическую модель тела Максвелла, получить уравнение тела Максвелла.

$$\tau + \frac{\mu}{G} \cdot \dot{\tau} = \mu \cdot \dot{\epsilon}. \quad (1.11)$$

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

$$\tau + n \cdot \frac{d\tau}{dt} = 0, \quad (1.12)$$

где $n = \frac{\mu}{G}$.

Решив это уравнение, найдем уравнение релаксации вида

$$\tau = c \cdot e^{-\frac{t}{n}}. \quad (1.13)$$

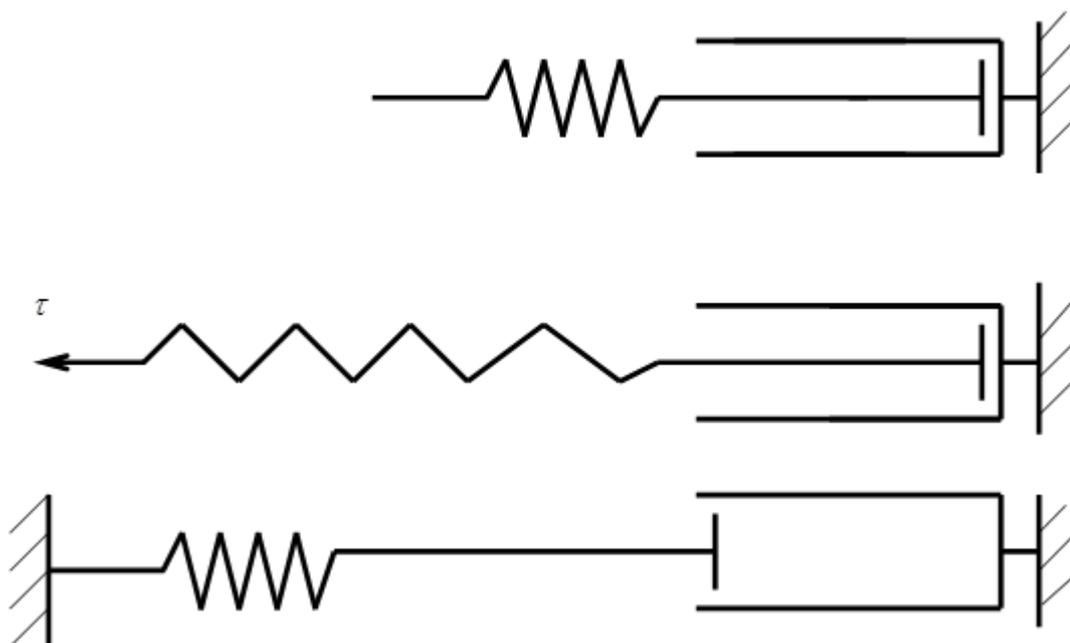


Рисунок 1.13 - Структурно-механическая интерпретация явления релаксации напряжений в теле Максвелла

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

$$\tau = \tau_0 \cdot e^{-\frac{t}{n}} = \frac{\tau_0}{e^{\frac{t}{n}}} \quad (1.14)$$

Случаи 2 и 3, в соответствии с рисунком 1.14, графически показывают релаксацию (самопроизвольное уменьшение по экспоненте) напряжений во времени.

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

$$[n] = \frac{[u]}{[G]} = \frac{H \cdot c \cdot m^2}{m^2 \cdot H} = c. \quad (1.15)$$

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

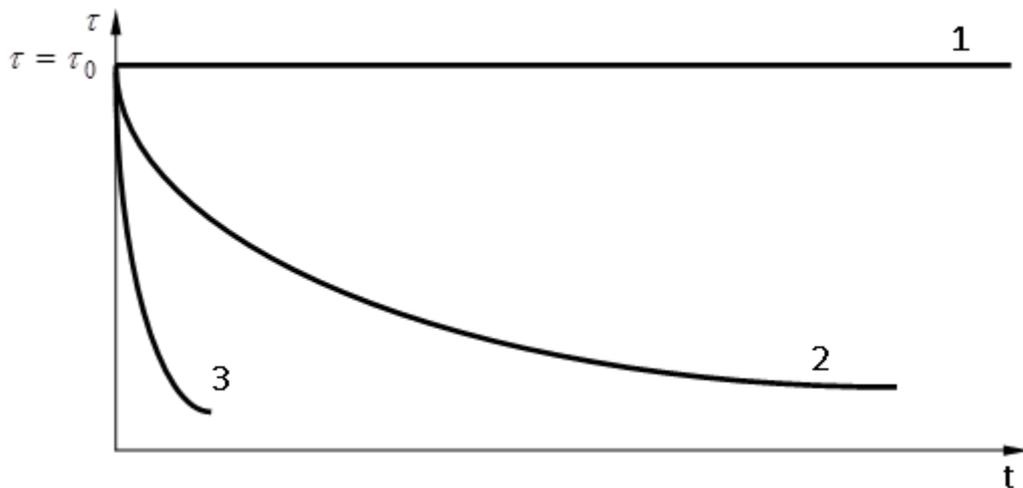


Рисунок 1.14 - График релаксации напряжений в теле Максвелла при разных значениях n

1.6 Структурно-механическая модель тела Бингама

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.

Структурно-механическая модель Бингама, в соответствии с рисунком 1.15, состоит из элементов Гука с модулем упругости G , Ньютона с вязкостью μ и Сен-Венана с пределом текучести τ_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. Уравнение этой модели при $\tau > \tau_0$

$$\dot{\gamma} = \dot{\tau} / G + (\tau - \tau_0) / \mu. \quad (1.16)$$

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.

Структурно-механическая модель Шведова, в соответствии с рисунком 1.15, состоит из элемента Гука с модулем упругости G_H , Сен-Венана с пределом текучести τ_0 и Максвелла с модулем упругости G_M и вязкостью μ . При деформации модели Шведова происходит только благодаря элементу Гука. При $\tau \geq \tau_0$ деформируются все элементы модели.

Уравнение модели Шведова в дифференциальной форме имеет вид

$$\dot{\gamma} = \dot{\tau} \left(\frac{1}{G_H} + \frac{1}{G_M} \right) + \frac{\tau - \tau_0}{\mu}. \quad (1.17)$$

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 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.

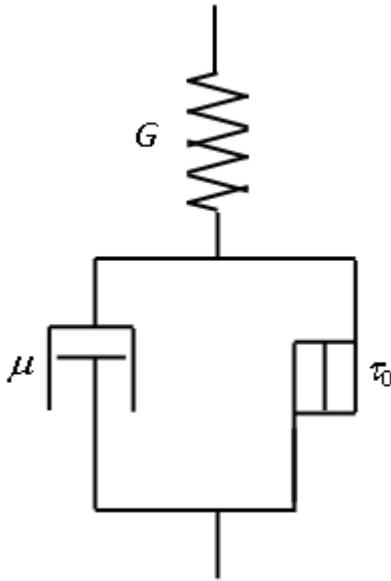


Рисунок 1.15 – Механическая модель тела Бингама

1.7 Правила построения математической модели по имеющейся структурно-механической

Рассмотренные модели тел Кельвина и Максвелла, учитывающие наличие определенного сочетания упруго-вязких свойств, не удовлетворяют практику, ибо описывают свойства (например, релаксацию напряжений или запаздывающую упругость), имеющие место лишь в частных случаях поведения отдельных реальных тел при деформировании. Следующим шагом на пути приближения свойств идеального тела к проявляемым реальными материалами является трехпараметрическая (составленная из трех элементов и имеющая, таким образом, три константы) модель, один из вариантов которой представляет собой последовательно соединенные элементы Кельвина и Гука и называется обобщенным линейным телом (иногда его же называют телом Максвелла-Томсона), в соответствии с рисунком 1.16.

Уравнение обобщенного линейного вязко-упругого тела записывается в следующем виде:

$$\tau + n \cdot \dot{\tau} = E \cdot \gamma + n \cdot H \cdot \dot{\gamma}, \quad (1.18)$$

где n - коэффициент времени релаксации;
 H - условно-мгновенный модуль;
 E - длительный модуль.

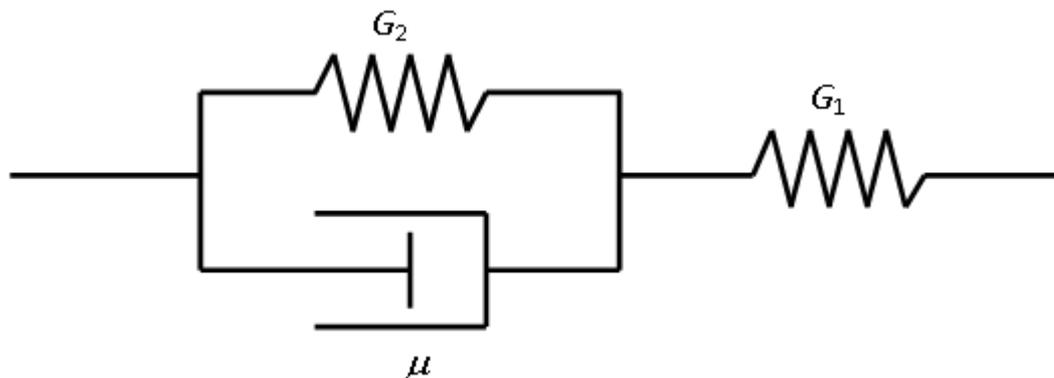


Рисунок 1.16 - Структурно-механическая модель обобщенного линейного тела (ОЛТ)

Получить уравнение ОЛТ, рассуждая аналогично как для тел Кельвина и Максвелла, технически довольно трудно. В этих случаях пользуются символическим методом построения математической модели по имеющейся структурно-механической.

Вводится символ ∂ , означающий операцию дифференцирования, распространяющуюся на элемент, с которым соседствует символ ∂ . Все операции при построении модели производятся по законам алгебры. И упругие и вязкие элементы считаются упругими, но «модуль упругости вязкого элемента» формально получают умножением символа ∂ на коэффициент вязкости μ . Вводится понятие жесткости модели, обозначаемой G , под которой понимают то, что в законе Гука является модулем $\partial\tau$ и $\partial\gamma$ после дифференцирования по времени записываются в виде $\dot{\tau}$ и $\dot{\gamma}$. Произведение символов $\partial\partial$ интерпретируется как взятие второй производной.

Жесткость элементов структурно-механической модели суммируют следующим образом. Суммарная жесткость параллельно соединенных гуконских элементов считают равной сумме этих жесткостей

$$G_{\Sigma} = G_1 + G_2. \quad (1.19)$$

Суммарная жесткость последовательно соединенных элементов получают по следующему выражению

$$\frac{1}{G_{\Sigma}} = \frac{1}{G_1} + \frac{1}{G_2}. \quad (1.20)$$

Полученное выражение преобразуют так, что в левой части уравнения располагаются напряжение τ и скорость изменения напряжения $\dot{\tau}$, а в правой - деформация γ и скорость изменения деформации $\dot{\gamma}$. При этом множитель у напряжения τ делают равным единице.

1.8 Пример составления математической модели по имеющейся структурно-механической

Для структурно-механической модели, в соответствии с рисунком 1.16, составим математическую модель. Модель разбивается на однообразно расположенные группы, к которым можно применить правила суммирования элементов. Сложив параллельно расположенные элементы G_2 и μ получим жесткость G'

$$G' = G_2 + \partial\mu. \quad (1.21)$$

Суммарная жесткость последовательно соединенных элементов G' и G_1 даст жесткость всей модели G_Σ

$$\frac{1}{G_\Sigma} = \frac{1}{G'} + \frac{1}{G_2}. \quad (1.22)$$

Окончательно

$$\frac{1}{G_\Sigma} = \frac{1}{G_1 + \partial\mu} + \frac{1}{G_2}. \quad (1.23)$$

Отсюда

$$\frac{1}{G_\Sigma} = \frac{G_2 + G_1 + \partial\mu}{G_2(G_1 + \partial\mu)}. \quad (1.24)$$

Учитывая, что

$$\frac{1}{G_\Sigma} = \frac{\gamma}{\tau}. \quad (1.25)$$

получим

$$\frac{\gamma}{\tau} = \frac{G_2 + G_1 + \partial\mu}{G_2(G_1 + \partial\mu)}. \quad (1.26)$$

$$G_2\tau + G_1\tau + \partial\mu\tau = G_1G_2\gamma + \partial\mu G_1\gamma. \quad (1.27)$$

$$\tau + \frac{\mu}{G_1 + G_2} \partial\tau = \frac{G_1 G_2}{G_1 + G_2} \gamma + \frac{G_1 \mu}{G_1 + G_2} \partial\gamma. \quad (1.28)$$

Окончательно запишем

$$\tau + \frac{\mu}{G_1 + G_2} \dot{\tau} = \frac{G_1 G_2}{G_1 + G_2} \gamma + \frac{G_1 \mu}{G_1 + G_2} \dot{\gamma}. \quad (1.29)$$

2 Лабораторная работа №2 Изучение структурно-механических характеристик дисперсных систем

Цель работы: Изучить поведение дисперсных систем (пищевых масс) и научиться классифицировать их.

2.1 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.[3]

2.2 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 однородных 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 2.1.

При определении 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. Жидкообразные продукты принято называть золи, а твердообразные - гели.

Продукты в таблице 2.1 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.

Таблица 2.1 – 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	Флодоовощные 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

2.3 Порядок выполнения работы

Для анализа предлагается несколько пищевых продуктов. Каждый образец анализируется группой из двух человек. По предложенной классификации дисперсных систем делается вывод.

3 Лабораторная работа №3 Методы и приборы для измерения сдвиговых характеристик

Цель работы: Усвоить методику определения ньютоновской вязкости жидкостей. Закрепить теорию капиллярной вискозиметрии.

3.1 Классификация методов и приборов для измерения структурно-механических характеристик

Приборы для измерения значений каждой группы свойств (сдвиговых, компрессионных и поверхностных) имеют свою специфику. Однако общими будут следующие, не считая температуры и технологических характеристик, четыре переменные: сила, момент или напряжение; расстояние, деформация, площадь или объем; время, скорость деформации или линейная скорость; энергия. В соответствии с этим механические измерительные приборы содержат устройства для регистрации усилий, деформаций, времени; энергия вычисляется по этим показателям либо измеряется специальными приборами. [4]

По виду измеряемой величины приборы делят на четыре группы (таблица 3.1). Эта классификация в определенной мере условна, так как некоторые приборы позволяют варьировать две величины при постоянной третьей.

Первые два метода получили наибольшее распространение, особенно в вискозиметрии. Первый метод - постоянной скорости сдвига - реализуется обычно путем применения электромеханического или гидравлического привода, сила измеряется различными динамометрами.

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

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

Таблица 3.1 - Классификация методов измерения реологических, характеристик

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

Четвертый метод позволяет по площади диаграммы определить энергию деформирования, а ордината на диаграмме показывает усилие. Кроме того, в приборах этой группы энергия может быть вычислена по мощности, если прибор снабжен самопишущим или показывающим ваттметром или счетчиком.

В некоторых случаях измерение структурно-механических характеристик одного продукта различными способами дает неодинаковые результаты. Способ измерения характеризуется определенными геометрическими, кинематическими и динамическими параметрами прибора и условиями проведения опыта при постоянных исходных технологических показателях продукта. Указанные параметры и условия обусловлены теоретическими положениями, которые не всегда могут быть достаточно корректно учтены. При тщательной научно разработанной методике эксперимента измеряемые величины должны иметь одинаковые значения независимо от способов измерения.

Классификация вискозиметров представлена на рисунке 3.1. Наибольшее распространение в исследованиях пищевых продуктов получили следующие вискозиметры: ротационные, капиллярные, с падающим шариком.

3.2 Методы и приборы для измерения сдвиговых характеристик

Сдвиговые свойства проявляются при касательном смещении слоев продукта. Приборы для измерения указанных свойств по принципу действия делят на следующие группы: ротационные, капиллярные, пенетрометры, приборы с плоскопараллельным смещением пластин и др.

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

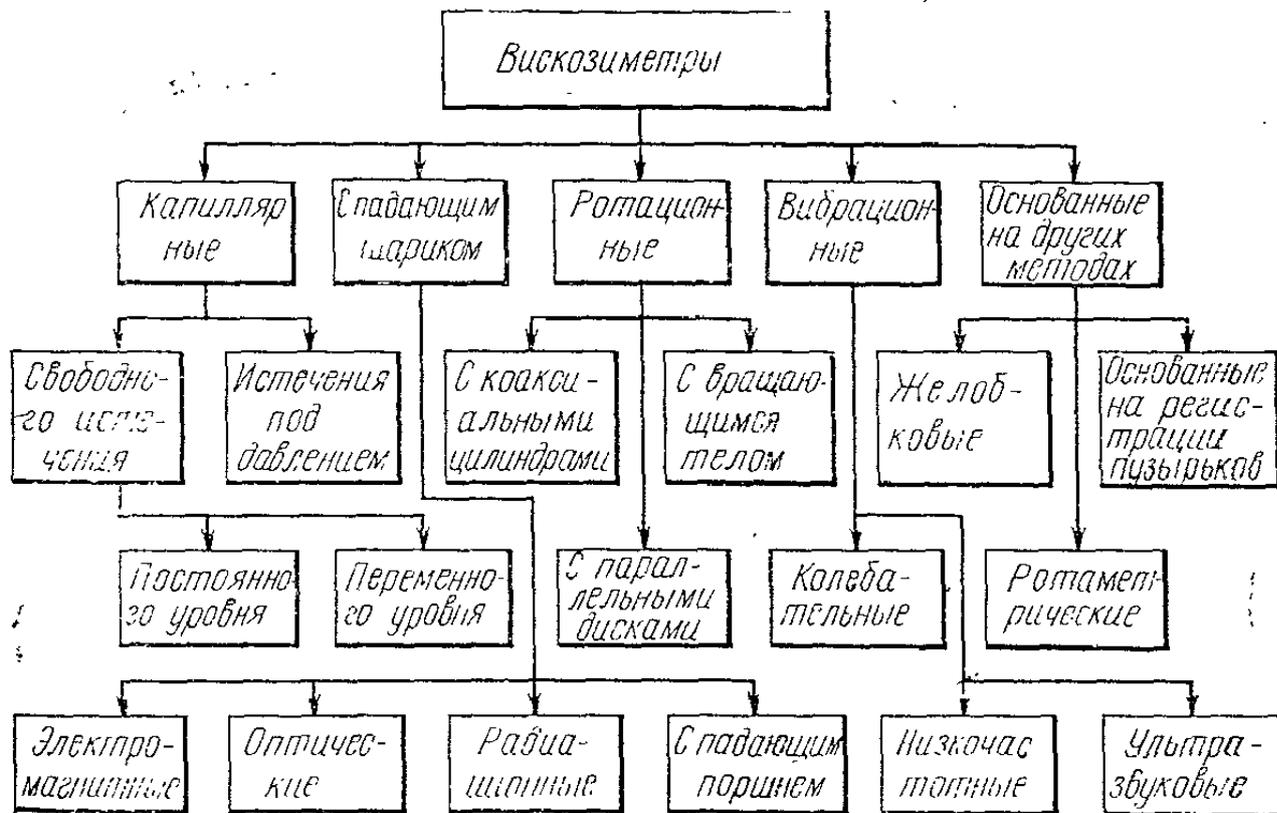


Рисунок 3.1 – Классификация вискозиметров

3.2.1 Ротационные вискозиметры

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

Принципиальные схемы ротационных вискозиметров показаны на рисунке 3.2. Они могут иметь одну геометрическую форму: коаксиальные цилиндры (рисунок 3.2а), сферы или полусферы (рисунок 3.2б), два конуса (рисунок 3.2а), две плоскопараллельные пластины (рисунок 3.2г), два плоских кольца (рисунок 3.2д) или два конических кольца (рисунок 3.2к). Рабочий зазор или рабочий орган может быть комбинированным, т.е. состоять из двух различных поверхностей: цилиндр - диск (рисунок 3.2е), цилиндр - полусфера (рисунок 3.2ж), конус - диск (рисунок 3.2л), цилиндр - конус (рисунок 3.2и),

цилиндр-конус - диск (рисунок 3.2л) и др. Между рабочими поверхностями находится исследуемый продукт, сила сопротивления внутри которого при вращении одной из поверхностей измеряется. Момент сопротивления можно измерять двумя способами: на вращающейся поверхности, тогда вторая поверхность закрепляется жестко, и вращая одну поверхность, тогда другая соединяется с динамометром.

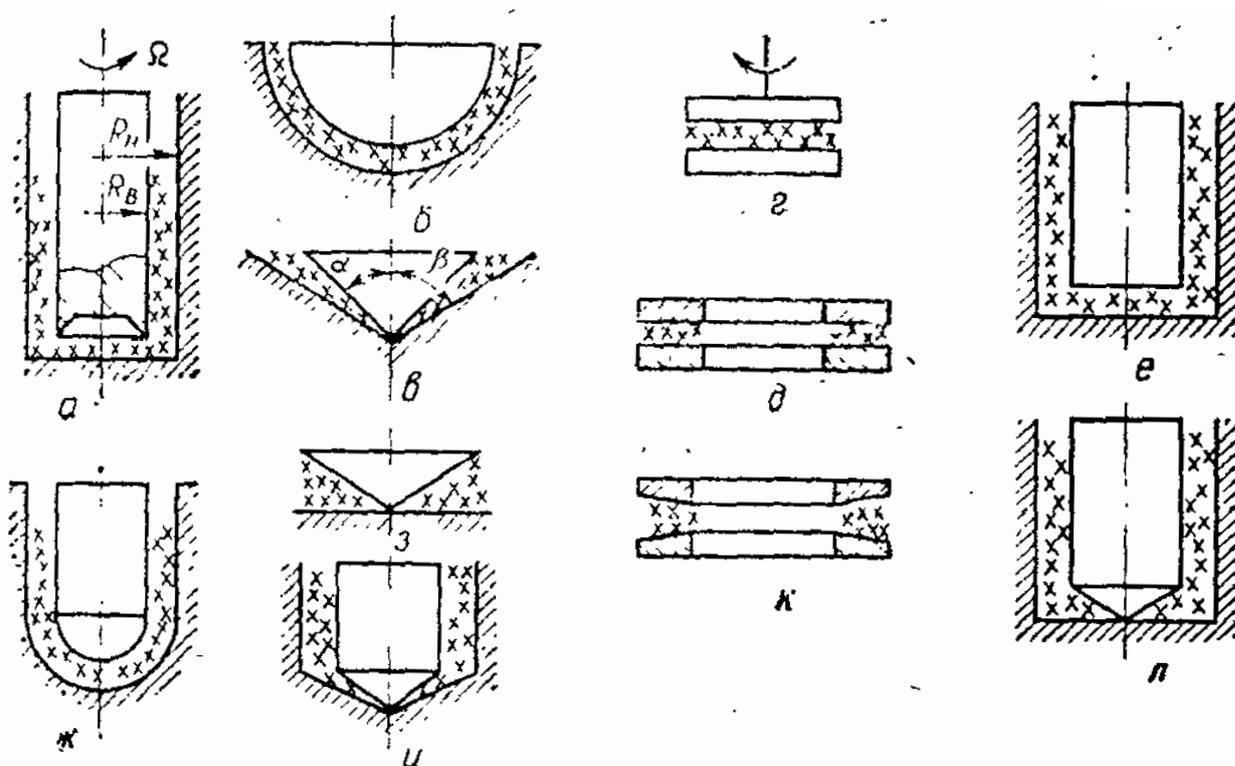


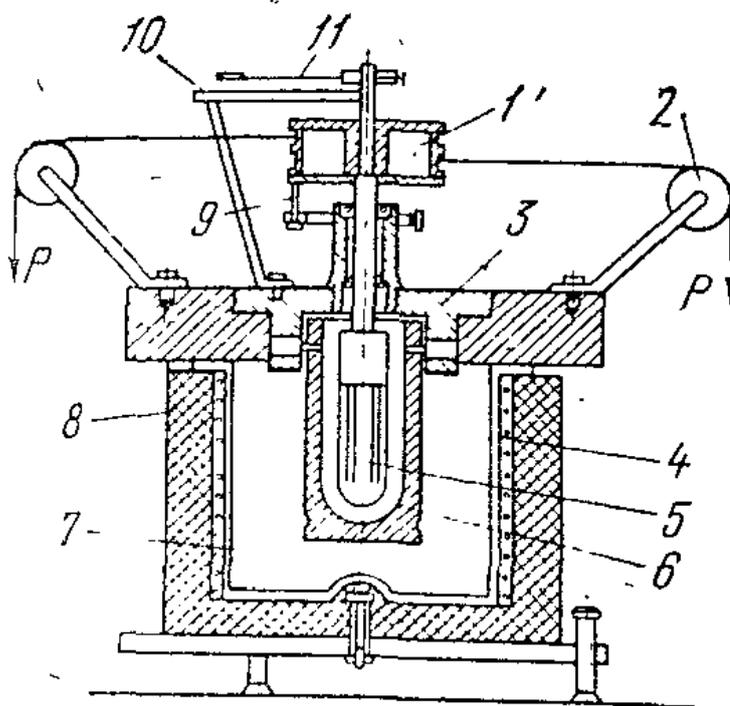
Рисунок 3.2 - Принципиальные схемы ротационных вискозиметров

Наибольшее распространение в пищевой промышленности получили коаксиально-цилиндрические комбинированные поверхности для измерения характеристик вязких и пластично-вязких продуктов (рисунок 3.2а, ж, л).

Известны два основных варианта прибора с коаксиальными цилиндрами. В первом испытуемое вещество помещается в цилиндр, приводимый в равномерное вращательное движение. Подвешенный на упругой нити второй цилиндр находится коаксиально с первым. Вязкость вычисляется по величине скорости вращения первого цилиндра и по углу поворота второго цилиндра от его первоначального положения. Этот метод применяется для исследования жидкостей и газов.

Второй вариант: внешний цилиндр неподвижен, внутренний крепится на оси, вмонтированной для уменьшения трения в шариковых подшипниках, и приводится во вращение с помощью подающего груза. На ротационных приборах экспериментально получают зависимости крутящих моментов от угловой скорости вращения измерительной поверхности.

При исследовании пищевых масс часто применяют ротационные вискозиметры РВ-4, РВ-7, РВ-8, разработанные М.П. Воларовичем (рисунок 3.3).

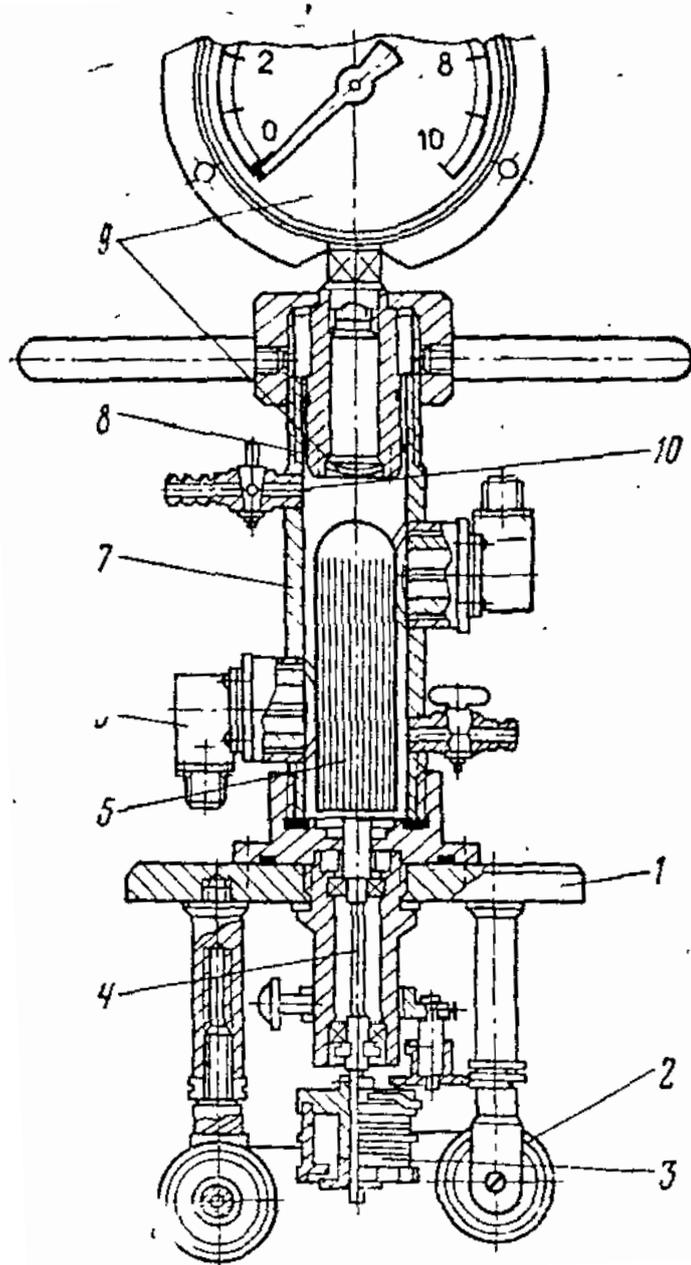


1 - шкив; 2 - блоки; 3 - установочная гайка; 4 - стакан для термостатирующей жидкости; 5 - ротор; 6 - стакан; 7 - спираль электронагрева; 8 - изоляция; 9 - стопор; 10 - шкала; 11 - стрелка.

Рисунок 3.3 - Вискозиметр РВ-8 системы М.П. Воларовича

При соотношении радиусов 0,7 и более общая ошибка при определении константы по приближенному значению эквивалентной длины не превышает 0,5 % [1].

Для исследования структурно-механических свойств при повышенных давлениях на базе вискозиметра РВ-4 (рисунок 3.4, позиции 1, 2, 3) сконструирован новый измерительный узел (позиции 4-10). Размеры вискозиметра: диаметр ротора 32 мм, внутренний диаметр стакана 38 мм. Новый измерительный узел отличается от РВ-4 следующим. Стакан (статор) неподвижен, вращается рифленый ротор, который выточен вместе с хвостовиком из одной «заготовки».



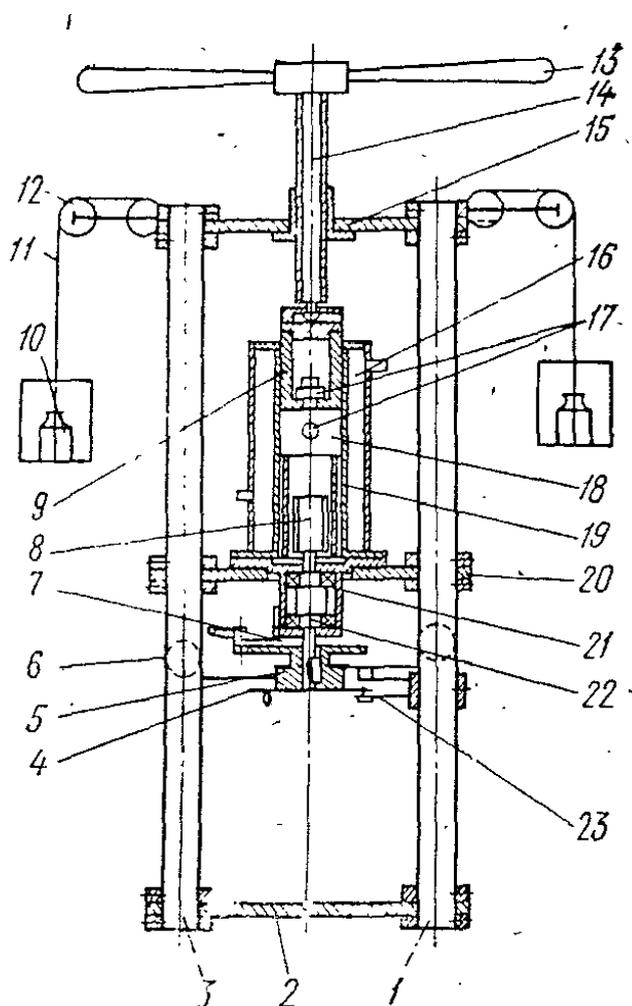
1 - станина; 2 - шкивы; 3 - барабан; 4 - хвостовик ротора; 5 - ротор; 6 - тензодатчики давления; 7 - неподвижный стакан; 8 - поршень; 9-мембрана с манометром; 10 - контрольный краник.

Рисунок 3.4 - Ротационный вискозиметр для измерения свойств при повышенном давлении

Давление в стакане создается за счет ввинчивания поршня. В рабочем зазоре давление измеряется тензометрическими датчиками. Для измерения при высокой частоте вращения прибор может подключаться к гидроприводу.

В ротационном вискозиметре РМ-1 (рисунок 3.5) на основании установлены рабочая камера и опорный узел. Внутри камеры запрессована рифленая втулка 19, наличие которой устраняет возможность проскальзывания продукта. Сменный ротор 8 установлен на приводном валике. Давление в

исследуемой массе создается посредством поршня с уплотнительными кольцами. Регистрация избыточного давления осуществляется тензометрическими датчиками. Угол поворота ротора измеряется при помощи фотоэлектрического датчика.



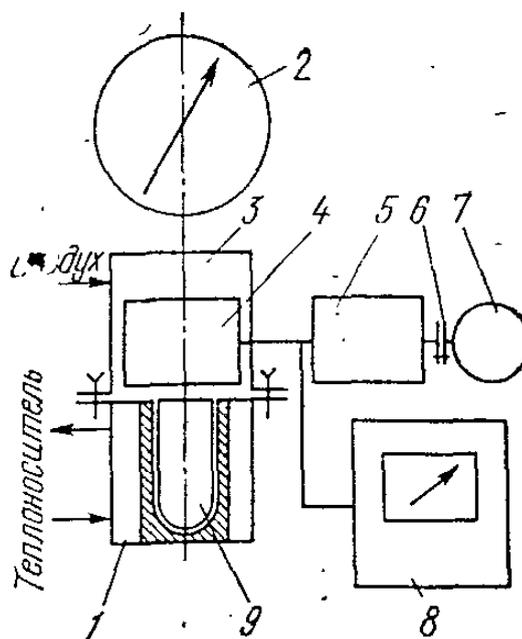
1 - стойка; 2 - плита; 3 - стойка; 4 - перфорированный диск; 5 - шкив; 6 - блок; 7 - фиксатор; 8 - ротор; 9 - поршень; 10 - груз; 11 - нить; 12 - блок; 13 - рукоятка; 14 - винт; 15 - плита; 16 - термостатирующая рубашка; 17 - тензометрические датчики давления; 18 - рабочая камера; 19 - рифленая втулка; 20 - основание; 21 - опорный узел; 22 - приводной валик; 23 - кронштейн.

Рисунок 3.5 - Вискозиметр РМ-1

Угловая скорость ротора регистрируется самопишущим прибором. Обработка экспериментальных данных проводится по описанной выше методике (поправка вводится на дисковый торец).

Для исследования свойств маловязких пищевых материалов под давлением или вакуумом создан ротационный вискозиметр РМ-2 (рисунок 3.6), который состоит из 3 наружного неподвижного цилиндра с рубашкой для поддержания необходимой температуры и внутреннего цилиндра (ротора),

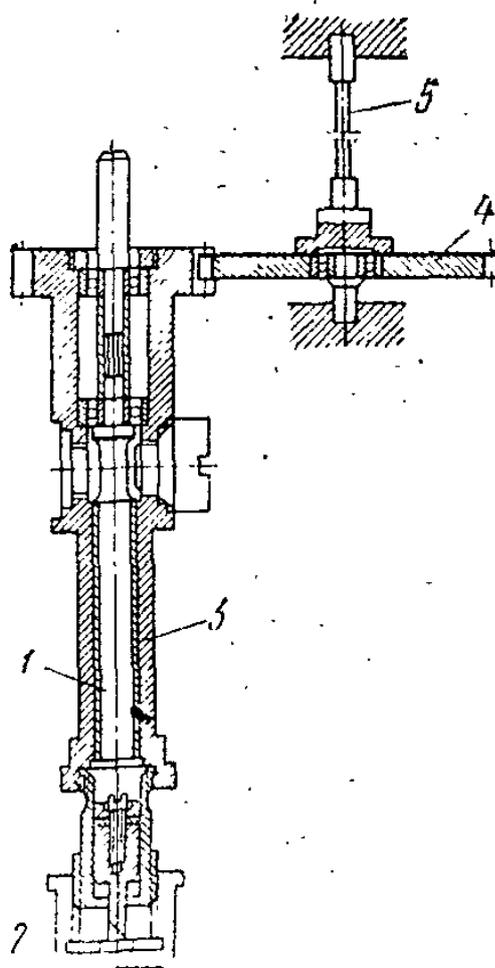
связанного с валом измерительного сельсина. Вращение измерительного сельсина происходит благодаря электромагнитной связи с силовым сельсином, жестко через муфту связанным с двигателем. Напряжение, возникающее при торможении измерительного сельсина, пропорционально углу рассогласования сельсинов, т.е. пропорционально моменту сопротивления, приложенному к внутреннему цилиндру от исследуемого материала, находящегося в зазоре между цилиндрами 1 и 9. Сигнал рассогласования поступает в измерительный блок 8. Измерительный сельсин крепится в кожухе, который герметично соединен с наружным цилиндром. В герметическую камеру поступает сжатый воздух или газ под давлением, которое контролируется манометром. Если подключить камеру к вакуум-насосу, то можно создавать в ней разрежение.



1 - наружный цилиндр; 2 - манометр; 3 - герметичный кожух; 4 - измерительный сельсин; 5 - силовой сельсин; 6 - муфта; 7 - двигатель; 8 - измерительный блок; 9 - внутренний цилиндр.

Рисунок 3.6 - Вискозиметр РМ-2

На рисунке 3.7 представлена схема вискозиметра системы В.П. Павлова. Вискозиметр имеет постоянную скорость вращения, ступенчато изменяемую 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. Цилиндр 3 посредством шестерни 4 связан с торсионным проволочным подвесом 5; напряжение, создаваемое крутящим моментом, уравнивает напряжение, возникающее в деформируемом материале. Скорость сдвига может изменяться от 0,4 до 3000 с^{-1} .



1 - внутренний ротор; 2 - ручной пресс; 3 - внешний цилиндр; 4 - шестерня; 5 - торсионный подвес.

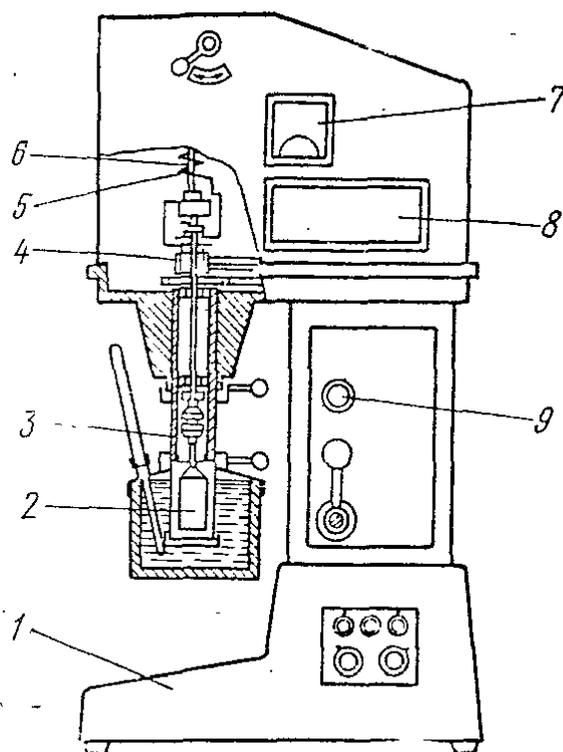
Рисунок 3.7 - Рабочая головка вискозиметра В.П. Павлова

Кроме отечественных приборов в пищевой промышленности для исследовательских целей все более широко применяют ротационные вискозиметры зарубежного производства. Одной из моделей является «Реотест RV». Схема этого ротационного прибора представлена на рисунке 3.8.

Внутри станины прибора установлен синхронный электродвигатель, соединенный с двенадцатиступенчатой коробкой передач, которая позволяет изменять частоту вращения внутреннего цилиндра от 0 до 1500 об/мин. Крутящий момент от коробки передач передается ведущему валу 6 и далее через спиральную пружину - ведомому валу 4, соединенному с внутренним цилиндром 2 муфтой. Отсчет величины крутящего момента производится по шкале прибора 8, скорости вращения - по указателю 9.

Показания прибора 8 прямо пропорциональны измеряемому моменту, а также напряжению сдвига и вязкости исследуемого материала. Частота вращения синхронного электродвигателя зависит от напряжения тока в сети и ее нагрузки. Отклонения от номинальной частоты 50 Гц фиксируются

прибором 7.



1 - станина; 2 - внутренний цилиндр; 3 - наружный цилиндр; 4 - ведомый вал; 5 - спиральная пружина; 6 - ведущий вал; 7 - измеритель частоты; 8 - измеритель крутящего момента; 9 - указатель скорости вращения

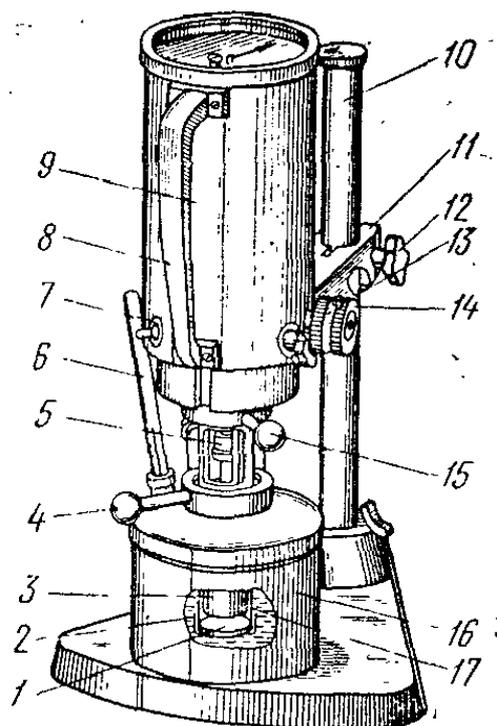
Рисунок 3.8 - Вискозиметр «Ротест RV»

Для использования принятой в отечественной литературе методики обобщения данных ротационной вискозиметрии прибор следует градуировать по крутящему моменту, который легко может быть приложен к ротору с помощью падающих грузов.

Ротационный вискозиметр типа RN (рисунок 3.9) состоит из измерительного прибора, измерительной головки с вращающимся ротором и термостатирующего сосуда. Рукоятка 14 служит для установки требуемой частоты вращения ротора. Изменение скорости может производиться как при остановке, так и во время работы вискозиметра. Температура контролируется по термометру.

Для расширения диапазона измерения вязкости для вискозиметра RN поставляется три измерительные системы, состоящие из двух измерительных цилиндров, отличающихся размерами радиусов и длин цилиндров. Кроме измерения со взятием пробы вискозиметр RN может применяться без термостатирующего сосуда, крышки и запорной гайки, т.е. для измерения вязкости погружением. Описанный вискозиметр может применяться и при свободном погружении ротора непосредственно в сосуд с измеряемым веществом без неподвижного цилиндра.

Вычисление результатов измерений производится по методике, аналогичной описанной выше для вискозиметра «Реотест».



1 - крышка; 2 - запорная гайка; 3 - вращающийся ротор; 4- рычаг; 5 - муфта; 6 - термометр; 7 - выключатель; 5 - рукоятка; 9 - измерительный прибор; 10 - штатив; 11 - кронштейн; 12 - зажимной винт; 13 - упор; 14 - рукоятка изменения скорости вращения; 15 - зажимной рычаг; 16 - термостатирующий сосуд; 17 - неподвижный цилиндр.

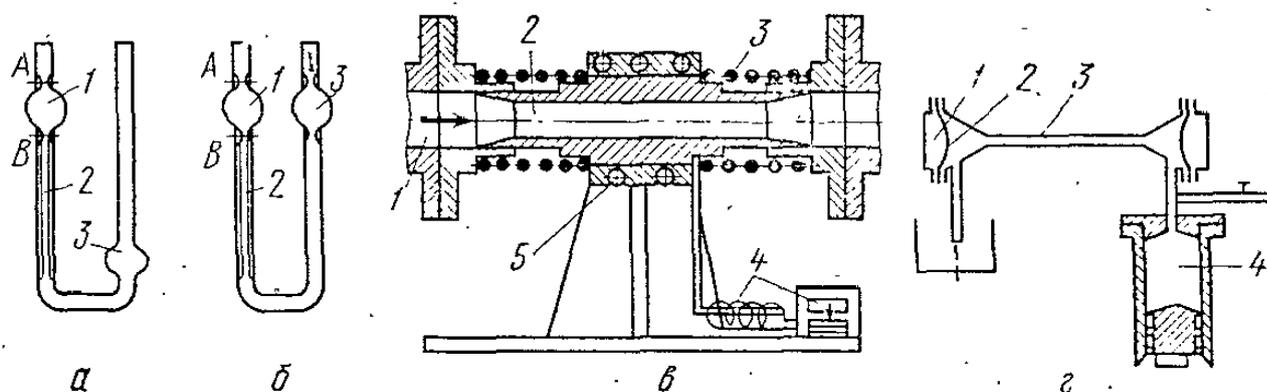
Рисунок 3.9 - Вискозиметр типа RN

3.2.2 Вискозиметры капиллярные и с падающим шариком

Принципиальные схемы капиллярных вискозиметров для ньютоновских и неньютоновских продуктов показаны на рисунок 3.10. 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 результаты, как правило, инвариантны, т.е. не зависят от диаметра трубки. Для неньютоновских жидкостей с более высокой вязкостью и пластично-вязких систем диаметр капилляра может достигать нескольких десятков миллиметров, а результаты измерений часто зависят от диаметра, т.е. неинвариантны. Диаметр капилляра входит в теоретически полученные формулы для соответствующих моделей тел.

Наиболее простые, традиционные и вместе с тем универсальные

капиллярные вискозиметры Оствальда (рисунок 3.10а) и Уббелодде (рисунок 3.10б) имеют капилляр и два полых шарика для жидкости. Движущая сила процесса истечения - перепад давлений - в вискозиметре Оствальда обусловлена разностью высот жидкости, в вискозиметре Уббелодде - вакуумом или давлением в одном колене трубки. При измерениях приборы помещают в водяную баню.



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

Рисунок 3.10 - Принципиальная схема капиллярных вискозиметров для вязких жидкообразных продуктов

Вискозиметр А.В. Горбатова, С.И. Сухановой и др. (рисунок 3.10в) встраивается в технологический трубопровод для пластично-вязких продуктов. При прохождении продукта через капилляр под действием сил внутреннего трения - напряжения на стенке трубы - происходит его осевое смещение, которое регистрируется датчиком перемещений и записывается прибором. Внутренняя сила, вызывающая перемещение, компенсируется пружинами или сильфонами, которые могут иметь разную жесткость.

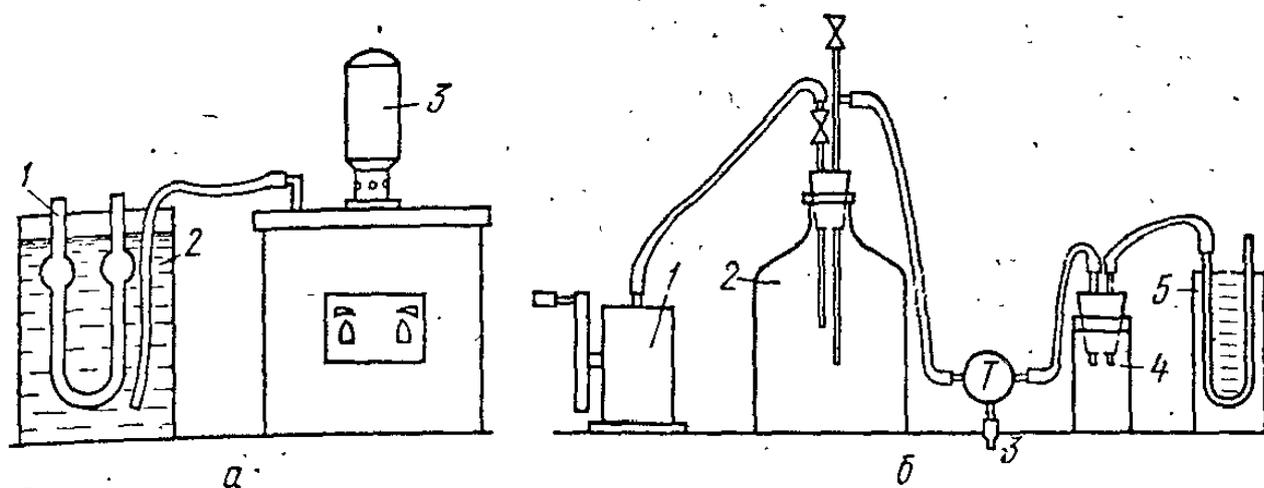
Вискозиметр постоянного давления Г.В. Виноградова и др. (рисунок 3.10г) обеспечивает протекание жидкости по капилляру при постоянном давлении, которое обеспечивает буферная жидкость, отделенная от исследуемого продукта упругой мембраной. Продукт в капилляр подается из цилиндра с поршнем.

Методы капиллярной вискозиметрии нашли широкое применение и при

исследовании свойств высоковязких веществ (различные пластмассы, конфетные массы и т.п.).

Методики измерения и расчета сдвиговых свойств для большинства приборов этого типа подобны.

Измерительный стенд (рисунок 3.11а) состоит из вискозиметра, помещенного в открытый или герметический сосуд, и ультратермостата. Термостатирование исследуемой жидкости в приборе занимает 10-30 мин, что определяется её объемом. За это время её температура достигает температуры жидкости из термостата и восстанавливается структура. При кратковременном термостатировании температурные ошибки дают существенные отклонения вязкости от истинных ее значений.



а - при различных температурах; 1 - вискозиметр; 2 - сосуд для термостатирующей жидкости; 3 - ультратермостат; б - при различных напряжениях сдвига: 1 - воздушный насос; 2 - бутыль-моностат; 3 - трубка к вискозиметру; 4 - ловушка для жидкости; 5 - жидкостный манометр.

Рисунок 3.11 - Стенды для измерения вязкости

При измерениях вискозиметрами Уббелодде необходимо с одной стороны капилляра создавать давление или вакуум. Для этого используют установку (рисунок 3.11б), состоящую из воздушного насоса, который может работать как компрессор или вакуум-насос; бутыли-моностата объемом 8-10 л с пробкой; U-образного жидкостного манометра или микроманометра; сосуда, который является ловушкой жидкости, выбрасываемой из манометра, и трехходового крана для регулирования подачи воздуха. Перед началом измерения давление во всех емкостях должно быть выравнено. Использование избыточного давления при течении жидкости по капилляру создает возможность турбулизации потока, поэтому необходимо проводить проверку на ламинарность по критерию Рейнольдса.

Для определения полной относительной ошибки измерения вязкости

жидкообразных продуктов в связи с размерами капилляра используют диаграмму Г. Барра. Она построена для оптимальной длины капилляра 0,1 м и среднего напора, т.е. разности высот жидкости в двух резервуарах 0,05 м.

Температурные изменения объема и плотности жидкости в вискозиметре сказываются на результатах измерения. Поэтому вискозиметр заполняют всегда одинаковым объемом жидкости при одной и той же температуре.

Вискозиметр Оствальда используют как относительный прибор.

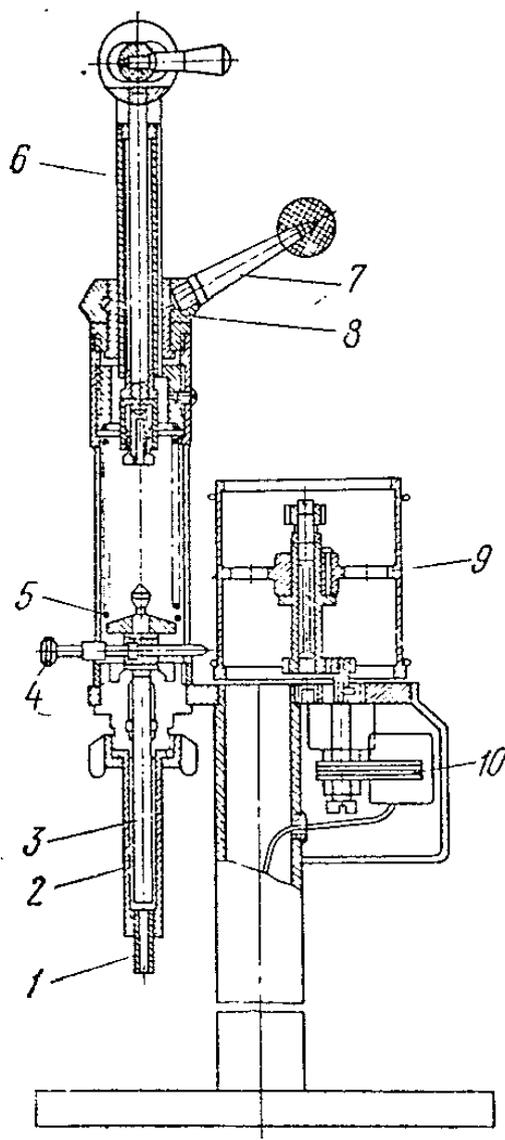
Вискозиметр Уббелоде можно использовать как относительный и абсолютный. В первом случае его градуируют по эталонной жидкости; во втором - в соответствии с уравнением Пуазейля определяют константы; их можно определить комплексно, исходя из данных предварительной, градуировки и непосредственных геометрических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

Меняя давление истечения можно построить градуировочные реограммы, которые позволяют, вычислить константы для рабочих измерений. Аналогичные графики строят для результатов измерений исследуемой жидкости. Если жидкость обладает аномалией вязкости, то прямые могут иметь частичное искривление или не выходить из начала координат, отсекая на оси абсцисс отрезок, пропорциональный предельному напряжению сдвига.

Горизонтальный вискозиметр ВК-4 в работе и градуировке подобен вискозиметру Уббелоде. Он предназначен для измерения вязкости крови и имеет две калиброванные трубки. Каждая трубка состоит из двух широких капилляров с миллиметровой шкалой, которые служат резервуарами 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. Преимущество такой конструкции: малое количество жидкости и поэтому небольшое время термостатирования; отсутствие поправок на изменение гидростатического давления и объема; устойчивый ламинарный режим в широком диапазоне давлений; сравнительно большое время истечения жидкости. Так же как у вискозиметра 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.

Для измерения предельного напряжения сдвига может быть использован прибор А.А. Симоняна, у которого вдвигание поршня в трубу с одной стороны вызывает свободное истечение продукта с другой стороны, а усилие, необходимое для истечения, воспринимается мембраной и определяется по ее деформации. Пластическое течение начинается, когда усилие на поршень равно сопротивлению цилиндрического слоя вдоль стенки трубы. Устойчивость показаний прибора обеспечена достаточной площадью поверхности сдвига (около 170 см²).

Широкое распространение получили *автоматические вискозиметры АКВ-3 и АКВ-5*. Прибор (рисунок 3.12) состоит из камеры заполняемой исследуемой массой и заканчивающейся капилляром. В камеру входит шток, проталкивающий массу через капилляр; шток движется вниз под давлением пружины. В шток вставляется держатель карандаша, последний производит запись перемещения штока на барабане 9, который приводится в движение от синхронного двигателя. При записи получают кривые, по которым определяют пластично-вязкие характеристики исследуемой массы.



1 - капилляр; 2 - камера; 3 - шток; 4 - держатель карандаша; 5 - пружина; 6 - винт; 7 - ручка; 8 - втулка; 9 - барабан; 10 - синхронный электродвигатель.

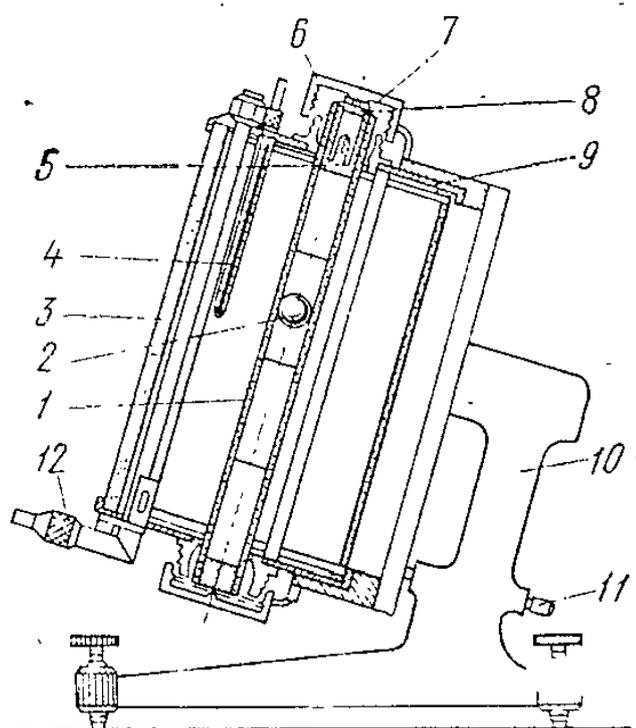
Рисунок 3.12 - Вискозиметр АКВ-5

Способ измерения вязкости с помощью падающего шарика в широкой трубке, реализующий закон Стокса, успешно используется для ньютоновских

или слабоструктурированных жидкостей. Однако он неприменим для изучения свойств пластично-вязких, структурированных систем. Реализуя двухмерный метод, за один опыт можно измерить температурную зависимость вязкости. Для этого жидкость в цилиндре нагревают сверху, охлаждают снизу, по вертикали пускают шарик. Зная скорость его движения в каждом слое и распределение температур по слоям, можно построить график изменения вязкости в зависимости от температуры.

При измерении шариковыми вискозиметрами отсчеты производят в зоне равномерного движения шарика.

Из шариковых вискозиметров, выпускаемых промышленностью, наиболее распространены *вискозиметры Гепплера* (рисунок 3.13). Хотя закон Стокса, которым описывается движение шарика, здесь соблюдается частично, они позволяют довольно точно измерять вязкость. Шарик движется в наклонной трубке, образуя узкую щель со стенкой. У структурированной жидкости при проходе через щель структурные связи разрушаются, поэтому точного воспроизведения результатов в двух последовательных замерах может и не быть. Прибор проградуирован для измерения вязкости ньютоновских или слабоструктурированных жидкостей. Паспортная ошибка измерения не превышает 0,5 % для лабораторной модели. Прибор неприменим для систем, имеющих предельное напряжение сдвига.



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

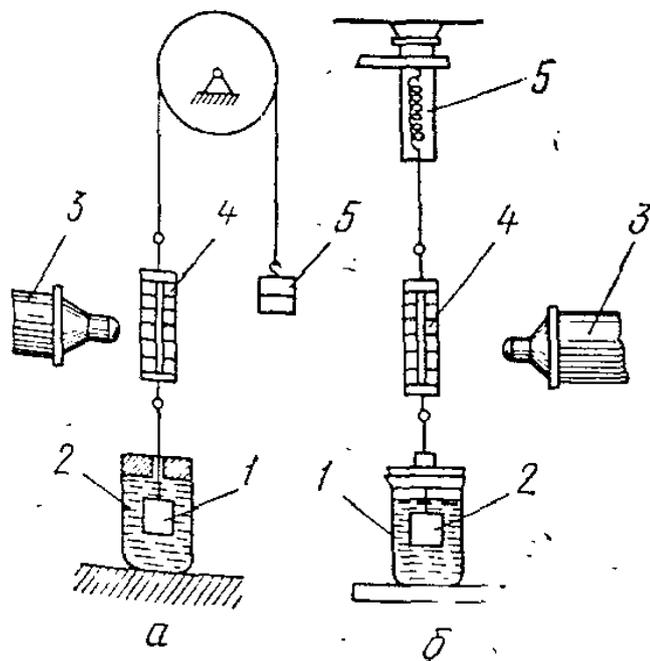
Рисунок 3.13 - Шариковый вискозиметр Гепплера

Размеры шариков выбраны так, чтобы каждая область измерения перекрывалась соседней примерно на 30 %. Время падения шарика должно составлять 30-300 с.

3.2.3 Приборы с плоскопараллельным зазором

Они служат для измерения сдвиговых характеристик в области практически неразрушенных структур при малых величинах деформации. Приборы такого типа для исследования различных свойств: вязкости, упругости, периода релаксации и т.д.

В приборах плоскопараллельный зазор может быть расположен вертикально, горизонтально и наклонно. Прибор с вертикальным расположением С.Я. Вейлера и П.А. Ребиндера бывает двух видов; в первом (рисунок 3.14а) кювета с исследуемым материалом устанавливается неподвижно, в нее помещается пластинка, приводимая в движение грузом. Между пластиной и нитью установлена микрошкала, по которой с помощью микроскопа измеряют деформацию. Время отсчитывают по секундомеру. В модификации прибора (рисунок 3.14б) пластина через микрошкалу прикрепляется к заранее тарированной пружине. При опускании кюветы пружина удлиняется, что измеряется микроскопом.



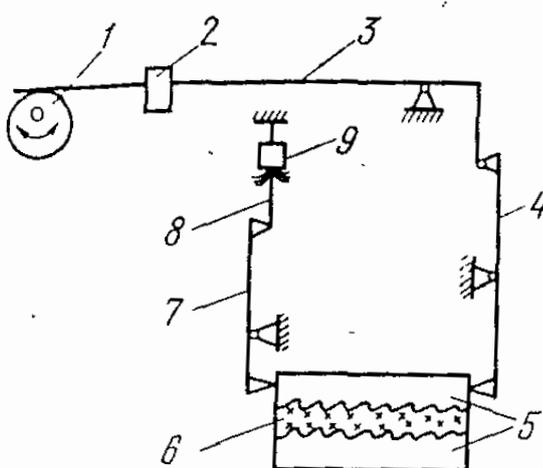
1 - пластина; 2 – кювета; 3 - микроскоп; 4 - микрошкала; 5 - груз (а) или пружина (б).

Рисунок 3.14 - Прибор С.Я. Вейлера и П.А. Ребиндера (а) и его модификация (б)

Метод тангенциального смещения пластины позволяет находить не только предельное напряжение сдвига, но и модули упругости, эффективную вязкость, изучать процесс релаксации, а также снимать полные деформационные кривые при разных скоростях деформации. Приборы, основанные на этом методе, обладают большой чувствительностью и применимы для исследования свойств в большом диапазоне - от слабоструктурированных зелей и суспензий до твердообразных систем с высокопрочной структурой.

Пластометр Д.М. Толстого с горизонтально смещающейся пластиной служит для нахождения констант упруго-пластично-вязких свойств масс с практически неразрушенными структурами. Определяют модуль быстрой эластической деформации сдвига модуль медленной эластической деформации, наибольшую пластическую вязкость и условный статический предел текучести.

Основными деталями пластометра (рисунок 3.15) являются пластины, между которыми помещается образец продукта. Размеры пластин: длина 0,05 м, ширина 0,02 м, толщина 0,006 м. Плоскости пластин, примыкающие к продукту, имеют рифление, направленное в сторону, противоположную направлению усилий, деформирующих продукт.



1 - эксцентрик; 2 - гиря; 3 - неравноплечий рычаг; 4 - равноплечий рычаг; 5 - пластины; 6 - испытуемый образец; 7 - рычаг; 8 - балочка; 9 - тензорезисторы.

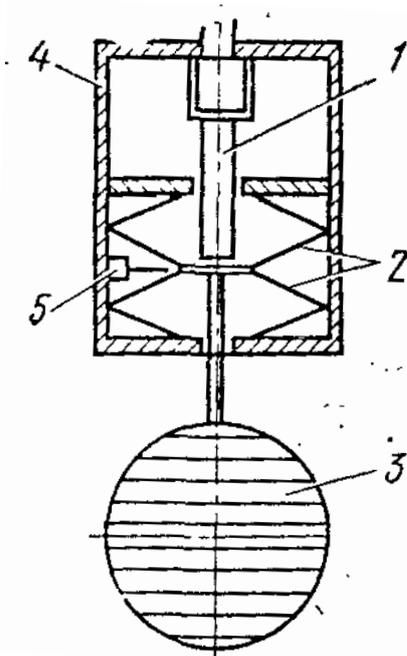
Рисунок 3.15 - Прибор Д.М. Толстого

Деформацию образцов продукта измеряют при помощи упругой балочки с наклеенными на нее тензорезисторами. Сдвигающее усилие на образец создают поворотом эксцентрика, гирями, которые устанавливают на неравноплечем рычаге прибора. От этого рычага усилие на продукт передается через равноплечий рычаг и верхнюю пластину 5.

На основании метода, предложенного Д.М. Толстым, Б.Д. Николаев [1]

разработал прибор для исследования дисперсных коллоидных систем в плоскопараллельном зазоре на наклонной плоскости при постоянном статическом напряжении.

Автоматический пластометр, разработанный Б.Д. Николаевым предназначен для контроля процесса созревания кисломолочных продуктов. Принцип действия прибора основан на определении напряжений тангенциального сдвига, возникающих при смещении пластины в контролируемой среде. Контроль осуществляется без отбора проб при погружении герметичного измерительного преобразователя (рисунок 3.16) непосредственно в резервуар со средой.



1 - электромагнитная катушка привода пластины; 2 - система подвеса; 3 - пластина; 4 - корпус измерительного преобразователя; 5 - регистрирующий датчик.

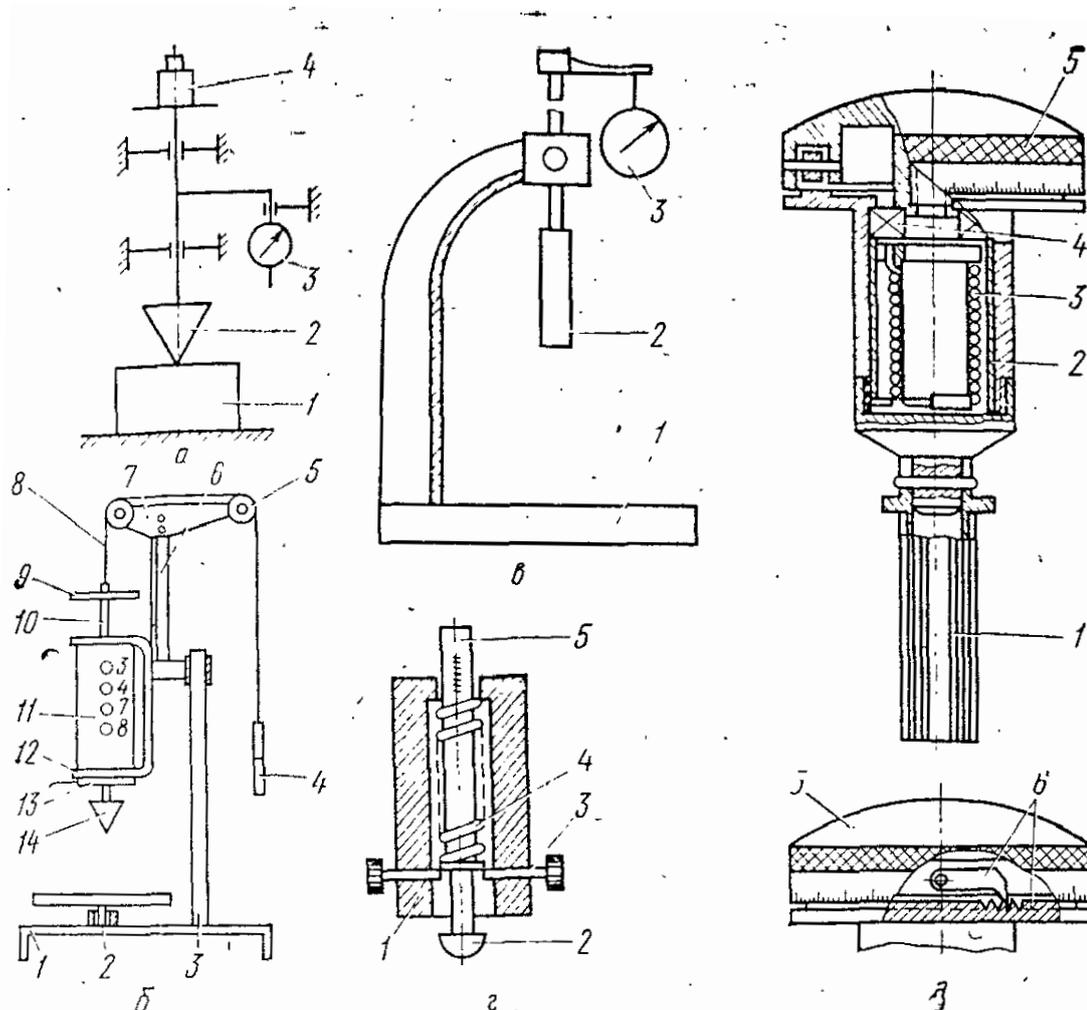
Рисунок 3.16 - Конструкция измерительного преобразователя автоматического пластометра

3.2.4 Пенетromетры и консистометры

Схема конического пластометра предложена П.А. Ребиндером и Н.А. Семененко.

На коническом пластометре КП-3 (рисунок 3.17а) исследуемый продукт помещается в сосуде на подъемный столик, вершина конуса приводится в соприкосновение с поверхностью продукта. Конус нагружается гирями и с помощью индикатора определяется величина погружения конуса до его остановки. Пластометр КП-3 выпускается серийно.

Был разработан еще один малогабаритный пенетрометр (рисунок 3.17б), который состоит из основания, на котором закреплены подвижный столик и вертикальная стойка. На последнюю устанавливается скоба с датчиком дифференциально-трансформаторной системы передач. К одному концу нити прикреплен подвижный шток датчика. На штоке расположены тарелка, служащая для установки дополнительных грузов, и сменная насадка. На другом конце нити закреплен груз для уравнивания массы штока с тарелкой и насадкой.



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

Рисунок 3.17 - Схемы пенетрометров

В комплект входят конусы с углами при вершине 30, 45, 60, 90, 120°, а также диски.

Пластометр с пластиной (рисунок 3.17в) применен С.С. Жуковским и А.М. Гуткиным для измерения предельного напряжения сдвига. [4]

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

Авторы установили, что значения предельного напряжения сдвига, измеренного на этом приборе и ротационном вискозиметре РВ-4, различаются не более чем на 5 %.[4]

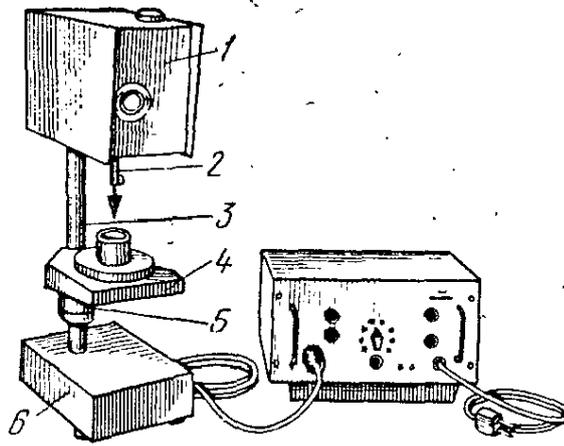
Полусферический консистометр Е. и В. Шарнер (рисунок 3.17г) для оценки консистенции мяса и колбас имеет полый корпус с подпружиненным полусферическим индентором. Когда индентор прижимают к продукту, сжимается пружина и хвостовик штока с нанесенными на него делениями выходит из корпуса. Измерения заканчивают при соприкосновении корпуса прибора с продуктом, т.е. изменяются две величины: перемещение штока относительно корпуса и усилие вдавливания, которое определяется степенью сжатия пружины.

Консистометр В.П. Табачникова и Е.Я. Баркова предназначен для отбора пробы и одновременного определения предельного напряжения сдвига сыра и подобных ему продуктов (рисунок 3.17д).

Прибор состоит из трубчатого корпуса-пробоотборника с заостренной нижней кромкой и головки, представляющей собой динамометр вращательного движения.

Корпус пробоотборника устанавливают в строго вертикальном положении на сыре и погружают его в сыр на определенную глубину, о которой судят по отметкам на внешней поверхности пробоотборника. Затем поворачивают головку динамометра по часовой стрелке. При этом собачка входит в зацепление с зубьями храпового венца не дает головке возвращаться под действием силы закручиваемой пружины. Когда эта сила станет равной силам сопротивления продукта (точнее, немного превысит их), произойдет поворачивание пробоотборника, сопровождаемое сдвигом продукта, а собачка зафиксирует максимальное отклонение шкалы прибора от нулевой отметки. Величина этого отклонения зависит от силы упругости пружины и предельного напряжения сдвига продукта.

Автоматический пенетрометр АР4/2 (рисунок 3.18) состоит из испытательного прибора и электромеханического датчика времени. На вертикальной стойке, соединяющей измерительную головку с основной плитой, находится измерительный столик, переставляемый в вертикальном направлении с помощью гайки. В измерительной головке находится падающая система, состоящая из гильзы, масштабной линейки и сменной зажимной детали. В измерительной головке находится, кроме того, система для оптической проекции масштабной линейки на матовое стекло с индексом. Там же располагается электромагнитная зажимная система падающей гильзы.



1 - измерительная головка; 2 - падающая система; 3 - стойка; 4 - измерительный столик; 5 - гайка; 6 – плита.

Рисунок 3.18 - Автоматический пенетрометр AP4/2

3.3 Описание лабораторной установки

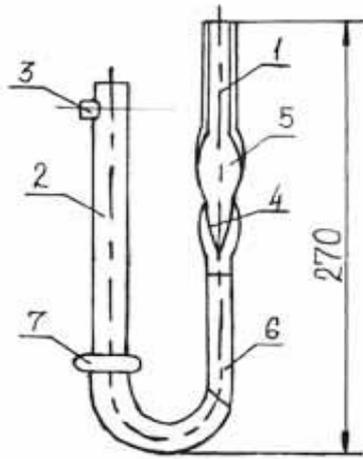
Вискозиметр капиллярный стеклянный типа БПЖ-4, показанный на рисунке 3.14, представляет собой U – образную трубку, в колено 1 которого впаян капилляр 6. Измерение вязкости основано на определении времени истечения через капилляр фиксированного объема жидкости, заключенного между отметками M1 и M2.

Перед определением вязкости жидкости вискозиметр должен быть тщательно промыт и высушен. Промывают их спиртом – ректификатом или ацетоном. Затем вискозиметр просушивают.

3.4 Порядок выполнения работы

Для заполнения вискозиметра на отводной патрубке надевают резиновый шланг. Далее, зажав пальцем колено 2 и перевернув вискозиметр, опускают колено 1 в сосуд с жидкостью и засасывают ее с помощью груши до отметки M2 следя за тем, чтобы в жидкости не образовывались пузырьки воздуха. Затем вискозиметр поворачивают в нормальное положение. Снимают с внешнего конца колена 1 избыток жидкости.

После этого устанавливают вискозиметр на штативе.



1 – рабочее место; 2 – вспомогательное колено; 3 – отводный патрубок; 4, 5 – расширение рабочего колена; 6 – капилляр; 7 – расширение вспомогательного колена.

Рисунок 3.14 – Капиллярный вискозиметр БПЖ – 4

Если в этом есть необходимость, засасывают жидкость в колено 1 примерно до одной трети высоты расширения 5, затем сообщают колено 1 с атмосферой и определяют время истечения опускания менисков жидкости от отметки М2 до отметки М1.

Вязкости вычисляется по формуле (3.14) по среднему из трех измерений времени истечения жидкости при значениях параметров $K = 0,2703 \cdot (10)^{-6}$; $g = 9,807 \text{ м/(с)}^2$

$$Q = \frac{\pi P d^4}{128 \eta (\ell + md)} \cdot \quad (3.14)$$

Результаты измерений заносят в таблицу 3.4

Таблица 3.4 – Результаты эксперимента

№ опыта	Наименование жидкости	Время истечения, с	Среднее время истечения, с	Кинематическая вязкость

Расчеты вязкости представляют в таблице 3.5

Таблица 3.5 – Расчет Ньютоновской вязкости

Плотность жидкости	Ньютоновская вязкость

4 Лабораторная работа №4 Методы и приборы для относительных и условных измерений структурно-механических характеристик

Цель работы: Ознакомиться с методами и приборами для определения относительных и условных измерений структурно-механических характеристик.

4.1 Оборудование, приборы и реактивы

Амилограф; весы технические первого класса точности; термометр со шкалой от 0 °С до 50 °С; NaCl; масло растительное.

4.2 Приборы для определения относительных и условных измерений

4.2.1 Метод измерения структурно-механических характеристик на амилографе

В некоторых приборах, применяемых в пищевой промышленности, не производится непосредственное измерение вязкости продукта, но получаемая на них диаграмма, ее форма и размеры зависят от этой величины. Таким прибором, в частности, является амилограф фирмы «Брабендер» (рисунок 4.1).

Этот прибор позволяет косвенным путем определять изменение вязкости при замесе теста. Работает он следующим образом. Смеситель 9 заполняется суспензией муки в воде, в него погружается деталь, которая связана с чувствительной измерительной системой 6. С помощью электродвигателя 1 смесителю 9 придается равномерное вращение, при этом наличие вязкого материала заставляет деталь 10 поворачиваться на некоторый угол. Возникающий таким образом момент через измерительную систему регистрируется записывающим приспособлением 5. При необходимости может производиться подогревание суспензии электрическим обогревателем 2, температура контролируется контактным термометром 8, установка необходимой температуры производится вращением рукоятки 7. Исследование можно проводить как при постоянной, так и при непрерывно и равномерно повышающейся температуре. В последнем случае для автоматического управления присоединяется устройство 3 с синхронным двигателем 4. Таким образом, на непрерывно движущейся бумаге вычерчивается диаграмма, причем перемещение пишущего устройства пропорционально вязкости суспензии.[5]

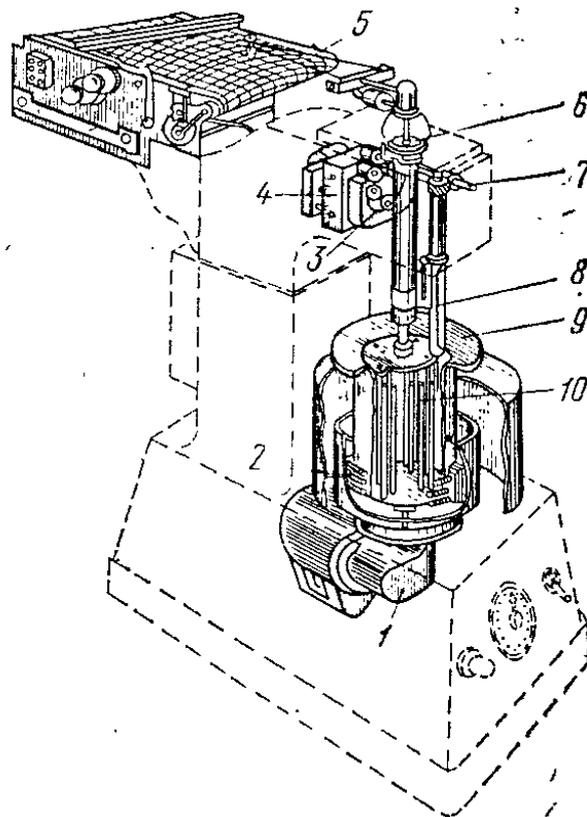
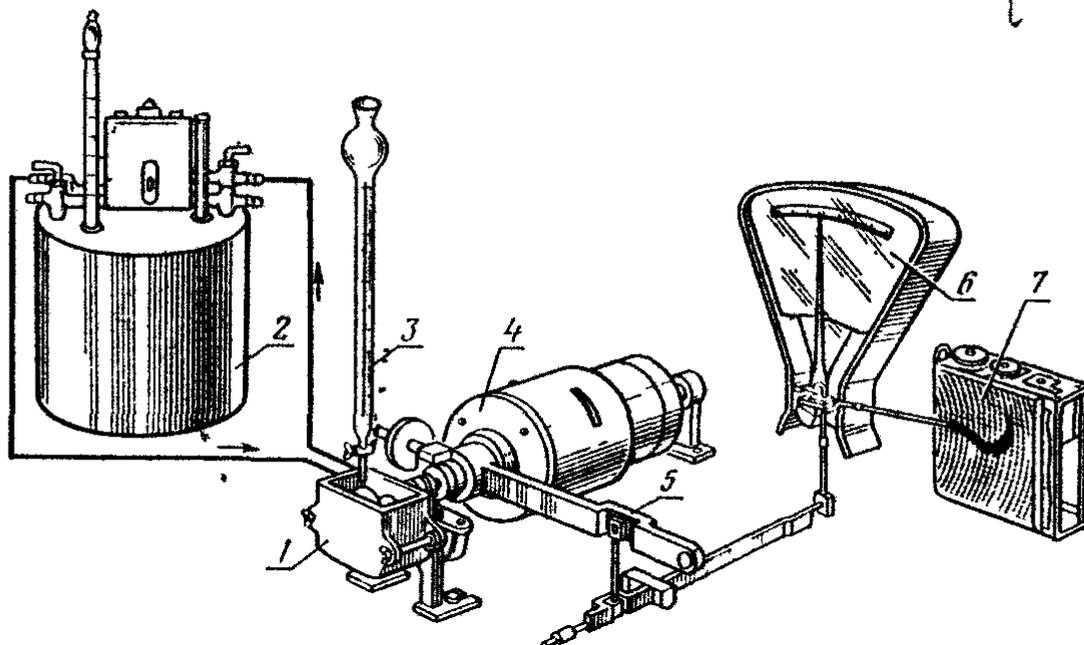


Рисунок 4.1 - Амилограф

4.2.2 Метод измерения структурно-механических характеристик на фаринографе

Фаринограф - прибор для изучения свойств теста в процессе замеса. Схема фаринографа показана на рисунке 4.2. Он состоит из тестомесилки, рассчитанной на 300 и 50 г муки, электродвигателя, масляного амортизатора (демпфера), водяного термостата, системы передаточных рычагов, самопишущего прибора со шкалой и бюретки для воды.

Фаринограмма – записанная на масштабной бумаге кривая усилий, затрачиваемых на замес теста. При анализе ее определяют следующие показатели оценки качества муки: водопоглотительную способность (ВПС) муки в процентах при образовании теста с консистенцией 500 единиц фаринографа (ед. ф.); время образования теста в минутах, то есть время от начала замеса теста до достижения максимальной консистенции; устойчивость теста в минутах, определяемую временем, в течение которого максимальное значение консистенции теста остается неизменным; время сопротивляемости теста в минутах как сумму времен образования и устойчивости теста; разжижение теста, измеренное в ед. ф. (его определяют как разность между консистенцией теста в конце периода устойчивости и консистенцией теста через 12 мин после начала снижения кривой, беря эти точки по середине ширины фаринограммы).



1 – тестомесилка; 2 – ультратермостат; 3 – бюретка для воды; 4 – привод с демпфирующим устройством; 5 – система передачи усилий на запись; 6 – показывающее устройство; 7 – записывающее устройство.

Рисунок 4.2 – Фаринограф

По этим исходным данным судят о качестве исследуемого образца муки. Кроме того, ширина кривой характеризует эластичность теста: чем шире фаринограмма, тем эластичнее тесто. Пример фаринограмм представлен на рисунке 4.3.

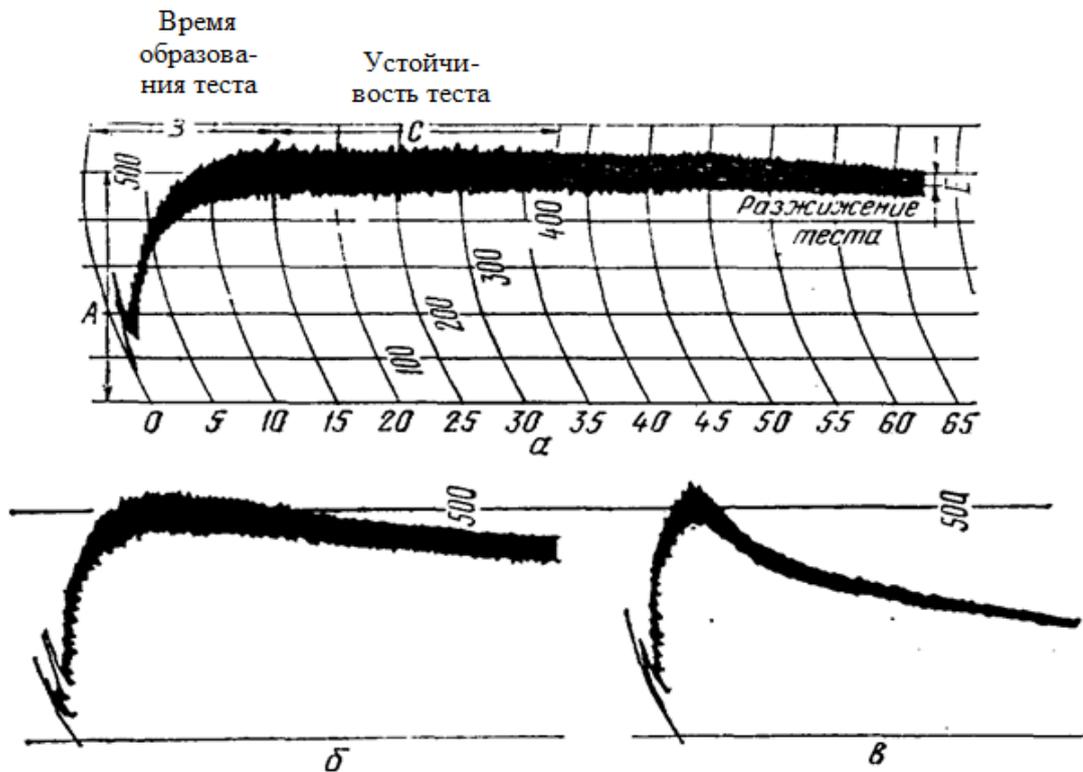
До начала работы необходимо проверить прибор и подготовить образцы муки. Винт, ограничивающий колебания нижнего весового рычага, нужно установить так, чтобы стрелка не уходила за пределы значения шкалы 1000. При освобождении рычага стрелка должна вновь возвратиться на нулевое деление. Время, в течение которого стрелка движется от 1000-го до 100-го деления, должно быть равно 1 с,

Перо самопишущего аппарата должно соприкасаться с бумажной лентой и описывать кривую такого же радиуса, как и у кривых на ленте фаринографа. Перо перед работой заполняют чернилами для самописцев.

Температура помещения, в котором установлен фаринограф, должна быть около 20 °С, а температура воды в термостате и, следовательно, во всех системах фаринографа 30 °С.

Во избежание возможных образований окислов на стенках тестомесилки и для очистки ее до начала работы в течение 15 мин замешивают тесто, которое затем выбрасывают.

Образцы муки, предназначенные для анализа, хорошо перемешивают и просеивают.



а - сильной; б - средней; в - слабой.

Рисунок 4.3 - Фаринограммы для пшеницы

Испытание образца муки начинают с определения ВПС, т.е. того количества воды, которое нужно добавить, чтобы получить тесто с консистенцией 500 ед. ф. Для этого в тестомесилку, нагретую до температуры 30 °С, в зависимости от ее размеров насыпают 300 или 50 г муки 14 %-ной влажности (при иной влажности навеску муки берут в соответствии с данными таблицы 4.1), включают электродвигатель и за возможно короткое время из бюретки наливают столько воды, сколько нужно для образования теста с консистенцией 500 ед. ф.

Количество воды выражают в процентах к массе муки и записывают. Этой величиной определяется ВПС исследуемой муки.

После определения ВПС необходимо тесто удалить, а тестомесилку тщательно вымыть. В чистую тестомесилку вновь насыпают навеску муки, включают прибор, добавляют количество воды, установленное предыдущим опытом, и проводят запись фаринограммы.

Фаринограф регистрирует образование теста и поведение его в условиях непрерывной механической нагрузки в камере тестомесилки. После того как перо самописца достигнет максимальной точки, пройдет горизонтальный участок фаринограммы (устойчивость теста) и пойдет на понижение (разжижение теста), запись продолжают еще в течение 12 мин, затем прибор выключают.

Таблица 4.1 - Величина навески пшеничной муки в зависимости от ее влажности для испытания на фаринографе

ω , %	m, г	ω , %	m, г	ω , %	m, г
9,0	47,28	11,4	48,53	13,7	49,82
9,1	47,53	11,5	48,59	13,8	49,88
9,2	47,38	11,6	48,64	13,9	49,94
9,3	47,43	11,7	48,70	14,0	50,00
9,4	47,48	11,8	48,75	14,1	50,06
9,5	47,53	11,9	48,81	14,2	50,11
9,6	47,58	12,0	48,86	14,3	50,17
9,7	47,63	12,1	48,92	14,4	50,23
9,8	47,68	12,2	48,97	14,5	50,29
9,9	47,73	12,3	49,03	14,6	50,35
10,0	47,78	12,4	49,08	14,7	50,41
10,1	47,83	12,5	49,14	14,8	50,47
10,2	47,88	12,6	49,20	14,9	50,53
10,3	47,94	12,7	49,26	15,0	50,59
10,4	47,99	12,8	49,31	15,1	50,65
10,5	48,04	12,9	49,37	15,2	50,71
10,6	48,10	13,0	49,42	15,3	50,77
10,7	48,15	13,1	49,48	15,4	50,82
10,8	48,20	13,2	49,54	15,5	50,89
10,9	48,29	13,3	49,59	15,6	50,95
11,0	48,31	13,4	49,65	15,7	51,01
11,1	48,37	13,5	49,71	15,8	51,07
11,2	48,42	13,6	49,77	15,9	51,13
11,3	48,48	-	-	16,0	51,19

Обработка фаринограммы на валориметре Брбендера, прилагаемом к фаринографу, позволяет суммарно оценить силу муки исследуемого образца, выражаемую определенным числом. Теоретически пшеница с низкими хлебопекарными достоинствами получает оценку «0», а с высокими - «100».

По имеющимся опытным данным, ВПС (в пересчете на влажность муки $\omega = 14$ %) составляет 50,4-75,6. Нижний предел характерен для слабой пшеницы, верхний - для сильной. Время образования теста равно 1,5-7,0 мин. Устойчивость теста изменяется от 0 до 10,5 мин. Разжижение теста колеблется в пределах от 10 до 250 ед. ф.

4.2.3 Метод измерения структурно-механических характеристик на экстенсографе

Экстенсограф Брабендера (рисунок 4.4) определяет физические свойства теста по оказываемому им сопротивлению растягивающим усилиям. Применяют его в сочетании с фаринографом, на котором замешивают тесто.

При проведении исследований на экстенсографе обязательно строгое соблюдение инструкции по его обслуживанию и эксплуатации. Для надежной работы прибора необходимо соблюдать следующие условия: температура в помещении, где установлен прибор, должна быть не ниже 22 °С, мука для замеса должна иметь температуру помещения, быть тщательно перемешанной и просеянной; температуру в камерах для отлежки теста поддерживают на уровне 30 °С; шаровой гомогенизатор и вальцы для формовки теста нагревают до такой же температуры посредством подогретой воды, циркулирующей в системе; формочки для теста погружают в воду с температурой 30 °С, затем перед началом опыта металлические поверхности, соприкасающиеся с тестом, смазывают тонким слоем масла; для удаления окислов металла с поверхности камеры и лопастей месилки фаринографа перед испытанием теста на экстенсографе замешивают тесто на воде без соли и тщательно моют месилку.

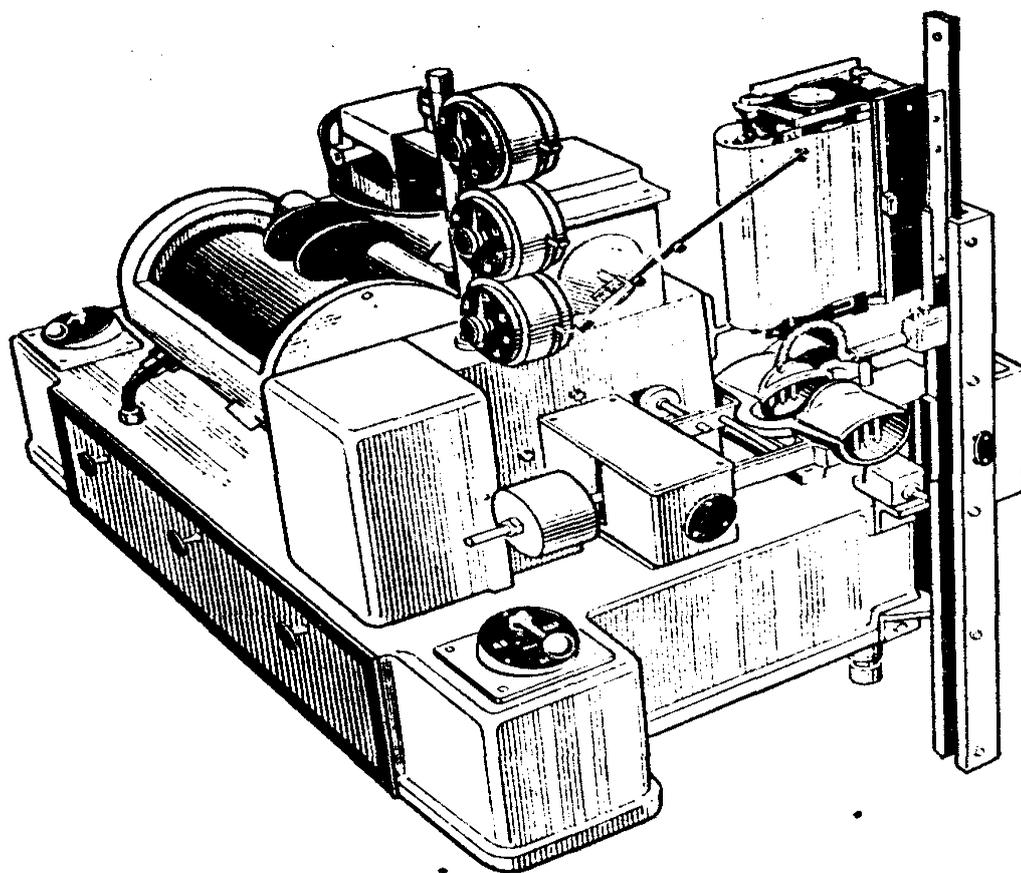


Рисунок 4.4 - Экстенсограф

Для приготовления теста 300 г муки, необходимых для замеса, помещают в тестомесилку фаринографа. Солевой раствор (6 г чистой NaCl на 135 мл воды) заливают в бюретку фаринографа. Затем включают тестомесилку и добавляют столько солевого раствора, чтобы в течение 1 мин замеса консистенция теста достигла значения 500 ед.ф., после чего электродвигатель фаринографа выключают и оставляют тесто на 5 мин в покое в закрытой тестомесилке. Затем снова включают тестомесилку и ведут замес в течение 2 мин, добавляя раствор NaCl с таким расчетом, чтобы в течение этих 3 мин общего времени замеса была достигнута конечная консистенция теста 500 ед. ф.

Если после 5 мин отлежки пришлось добавить больше 0,5 % раствора от массы муки, то тесто необходимо выбросить и опыт повторить.

В случае точных анализов следует сначала установить, сколько раствора нужно добавить, чтобы через 3 мин замеса консистенция теста была равна 500 ед. ф. Затем берут новую порцию муки и сразу выливают установленное количество раствора.

По окончании замеса тесто вынимают из месилки. Если оно липкое, то его можно немного припудрить рисовой мукой или крахмалом.

Полученное тесто делят ножницами на две части. Порцию теста массой 150 г формуют в шар в шаровом гомогенизаторе. Для этого снимают крышку и кладут тесто в специальный резервуар. Крышку закрывают, включают электродвигатель шарового гомогенизатора. После 20 оборотов диска выключают электродвигатель, поднимают крышку и резервуар для теста откидывают. Снимают образовавшийся шар из теста со штифта. Устанавливают резервуар гомогенизатора и крышку на место и снова включают электродвигатель, так как вальцовка работает от того же электродвигателя. Шар из теста кладут на середину распределительной щели, и он начинает вращаться. После обработки тесто приобретает форму цилиндра.

Из камеры для отлежки вынимают вкладыш с чашками для теста. Резервуар вкладыша должен быть наполнен водой, а полированные части хорошо смазаны. С чашек снимают зажимы, и цилиндры из теста укладывают точно на середину чашки. Затем вставляют зажимы, причем их зубцы должны крепко держать тесто.

Вкладыш с тестом, укрепленным на чашках, ставят в камеру для отлежки на 45 мин (время фиксируют на сигнальных часах прибора: стрелку устанавливают на деление 45, а рычаг опускают). Камеру закрывают.

Сразу же приступают к формовке второго куска теста массой 150 г, и по окончании всех операций его тоже помещают в камеру для отлежки.

По истечении 45 мин отлежки вынимают первую чашку с куском теста, укрепленным в ней, и устанавливают ее на держателе измерительной системы экстенсографа таким образом, чтобы металлическая дуга чашки указывала не на рычаг растяжения, а в противоположную сторону. Оба направляющих штифта, находящихся на нижней стороне чашки, проникают в отверстия держателя так, что чашки при каждом измерении фиксируются в одинаковом положении.

Перо самописца заполняют специальными чернилами и устанавливают его на диаграммную бумагу.

Затем включают электродвигатель растягивающего рычага. Последний, опускаясь с постоянной скоростью, растягивает цилиндр теста до разрыва. Усилия регистрируются в виде кривой экстенсограммы. Записывающее устройство автоматически включается и выключается. Вторым цилиндром растягивают таким же образом, а кривую растяжения наносят на первую.

Тесто после испытания снова формуют и еще выдерживают в течение 45 мин. Затем процесс растяжения повторяют. Аналогично получают экстенсограммы, используемые для оценки образца, и после 135 мин отлежки.

Для характеристики физических свойств теста определяют следующие показатели экстенсограммы:

1) энергию A , выражаемую через площадь, измеряемую планиметром в квадратных сантиметрах; по этому показателю судят о силе теста и смесительной ценности муки;

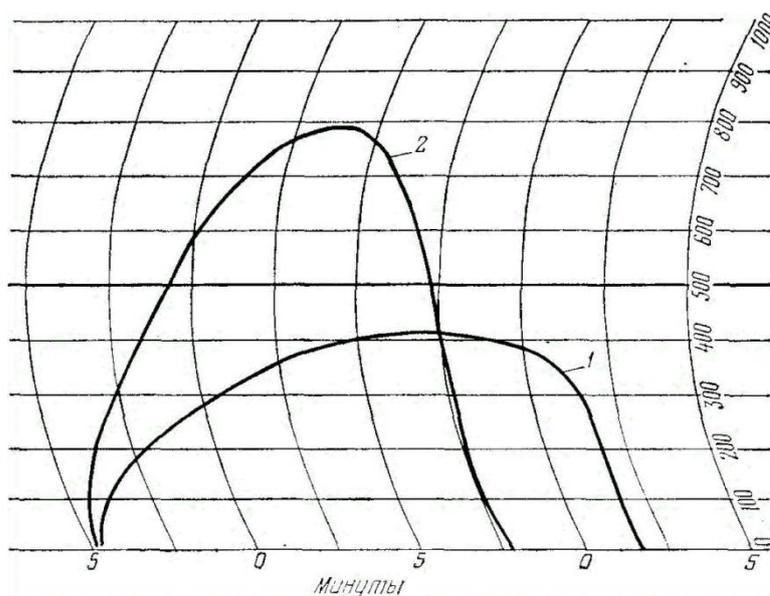
2) упругость B , выражаемую в единицах экстенсографа (ед. э.) и определяемую по высоте экстенсограммы, измеренной на расстоянии 50 мм от начала кривой;

3) растяжимость C , выражаемую длиной кривой в миллиметрах на горизонтальном отрезке от начала кривой;

4) пропорциональное число D - отношение упругости к растяжимости (B/C).

Чем больше энергия A , тем больше сила теста из данной муки. Пропорциональное число D имеет решающее значение для оценки поведения теста: чем оно меньше, тем больше склонно тесто к расплываемости; чем число D больше, тем тесто крепче.

Пример экстенсограммы приведен на рисунке 4.5.

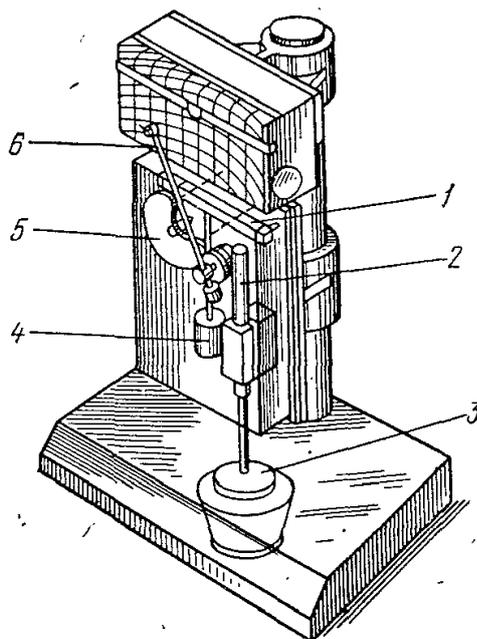


1 - слабой; 2 - сильной.

Рисунок 4.6 - Экстенсограммы для пшеницы

4.2.4 Метод измерения структурно-механических характеристик на матурографе

Одним из недостатков некоторых существующих методов исследования хлебопекарных свойств муки является то, что в исследуемом образце теста нет такого важного компонента, как дрожжи. Это устраняется использованием прибора фирмы «Брабендер» - матурографа (рисунок 4.7): тесто готовят по той же рецептуре, что и в производственных условиях.



1 - рычаг; 2 - вал; 3 - тарелка; 4 - груз; 5 - кулачок; 6 - регистрирующее перо.

Рисунок 4.7 - Матурограф

Прибор состоит из корпуса, микроэлектродвигателя, регистрирующего устройства, системы автоматической настройки и камеры, в которую помещается чашка с тестом.

Рычаг на одном конце шарнирно закреплен, на другом имеет ролик, находящийся в контакте с кулачковой шайбой. Усилие замыкания кинематической пары создается грузом, асимметрично установленным на рычаге. Вал с жестко закрепленной на нем тарелкой механически связан с регистрирующим пером.

Порция теста (0,15 кг) закладывается в чашку и помещается в камеру, где поддерживаются температура 30 °С и относительная влажность 80-85 %. В начале испытания расстояние между дном чашки и тарелкой минимальное (0,036 м). Прибор регулируется так, чтобы давление тарелки на тесто достигало 200 ед., в которых протарирован матурограф. Каждые 2 мин происходит механическое сжатие теста, помещенного в чашку, после чего тарелка как

постоянный груз давит на бродящее тесто. В зависимости от количества газа, выделенного при брожении, газового удержания и упругости теста тарелка поднимается до различных уровней, но через 2 мин опять вдавливается в тесто. Перемещения тарелки фиксируются на диаграмме регистрирующего механизма.

Для оценки хлебопекарных свойств муки используются три величины: продолжительность окончательной расстойки сопротивление теста и стабильность теста в конце расстойки.[6]

4.3 Порядок выполнения работы

Студенты получают подготовленный образец муки известной влажности. По указанию преподавателя проводят измерения структурно-механических характеристик теста на одном из приборов.

В заключение оценивают силу муки.

Список использованных источников

1. Структурно-механические характеристики пищевых продуктов / А.В. Горбатов [и др.]; под ред. А.В. Горбатова. - Москва: Легкая и пищевая промышленность, 1982. - 296 с.
2. Малкин, А.Я. Реология: концепции, методы, приложения / RHEOLOGY: conceptions, methods, applications: авториз. пер. с англ. яз. / А.Я. Малкин, А.И. Исаев. - Санкт Петербург: Профессия, 2007. - 560 с.
3. Арет, В.А. Физико-механические свойства сырья и готовой продукции: учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению 260100 (552400) «Технология продуктов питания» и по направлению подготовки дипломированного специалиста 260600 (655800) «Пищевая инженерия» / В.А. Арет, Б.Л. Николаев, Л.К. Николаев. - Санкт-Петербург: ГИОРД, 2009. - 448 с.
4. Азаров, Б.М. Основы инженерной реологии: учебное пособие / Б.М. Азаров, Т.Г. Гогошидзе. - Москва: МТИПП, 1989. - 74 с.
5. Мачихин, Ю.А. Инженерная реология пищевых материалов. / Ю.А. Мачихин, С.А. Мачихин. - Москва: Легкая и пищевая промышленность, 1981 - 216 с.
6. Реометрия пищевого сырья и продуктов: справочник / под ред. Ю.А. Мачихина. - Москва: Агропромиздат, 1990. - 271 с.