

ИНЖЕНЕРНАЯ РЕОЛОГИЯ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

2-е издание, дополненное и переработанное

Москва 2025

УДК 664.66/.69:532.135 (075)
ББК 36.83:22.251я7

П 33 Инженерная реология: учебное пособие / Д.В. Доня,
А.А. Леонов, Ю.В. Устинова. 2-е изд., доп. и перераб.
– М.: ООО «Сам Полиграфист», 2025, 82 стр., илл.

ISBN 978-5-00227-635-6

Учебное пособие переработано и дополнено в соответствии с государственным образовательным стандартом РФ и рабочей программой по дисциплине «Инженерная реология» для студентов специальностей 19.03.03 «Продукты питания животного происхождения», 19.03.02 «Продукты питания из растительного сырья» для всех форм обучения.

ISBN 978-5-00227-635-6

Тираж 20 экз. Заказ № 59658.

Отпечатано в типографии «OneBook.ru»
ООО «Сам Полиграфист»
129090 г. Москва, Протопоповский пер., 6
www.onebook.ru

Содержание

Введение	4
1. Общетеоретическая часть	5
1.1 Общие понятия и определения	5
1.2 Классификация реологических тел, кривые течения	14
1.2.1 Классификация структур дисперсных систем	15
1.2.2 Классификация реологических тел	17
1.2.3 Кривые течения	22
1.3 Сдвиговые, поверхностные и компрессионные свойства материалов	26
1.3.1 Сдвиговые свойства	27
1.3.2 Поверхностные свойства	31
1.3.3 Компрессионные свойства	36
2. Общие вопросы реометрии	42
2.1 Методы измерения реологических свойств.	42
2.2 Классификация реометров	45
2.3 Приборы для измерения сдвиговых характеристик	46
2.3.1 Шариковые вискозиметры	47
2.3.2 Капиллярные вискозиметры	49
2.3.3 Ротационные вискозиметры	54
2.3.4 Конические пластометры	62
2.3.5 Приборы с плоскопараллельным смещением пластин	65
2.4 Приборы для измерения поверхностных свойств	67
2.4.1 Приборы для измерения адгезии	67
2.4.2 Приборы для измерения внешнего трения	69
2.5 Приборы для измерения компрессионных характеристик	72
2.6 Измерение реологических свойств в процессе переработки и готовой продукции молочной промышленности	74
Список рекомендуемой литературы	82

ВВЕДЕНИЕ

Пищевые материалы не имеют строго определенных реологических свойств, последние могут меняться при изменениях температуры, при незначительных колебаниях химического состава, связанных со спецификой производства сырья, а также в результате самой механической обработки. Таким образом, при переработке весьма непостоянного по свойствам исходного сырья необходимо получить высококачественный конечный продукт со строго заданными свойствами.

Реологические показатели сырья и полуфабрикатов необходимо учитывать при создании конструкций новых машин и модернизации существующих, для обоснования наиболее рациональных режимов работы оборудования и выбора оптимальных технологических схем производства, а также использовать в качестве контролируемых параметров при создании автоматизированных систем управления машинами, агрегатами, производственными участками. Реология позволяет управлять структурой и качеством продуктов путем внесения добавок, изменения режимов и способов механической и технологической обработки.

Из всего выше изложенного следует, что квалифицированный специалист должен знать основные понятия и методы реологии и уметь применить на практике результаты реологических исследований.

Настоящее учебное пособие предназначено для студентов специальности «Инженерная реология» для студентов специальностей 19.03.03 «Продукты питания животного происхождения», 19.03.02 «Продукты питания из растительного сырья», изучающих основы инженерной реологии сырья, полуфабрикатов и готовой продукции.

1. Общетеоретическая часть

1.1 Общие понятия и определения

Реология – наука о деформации и течении различных материалов. Она изучает способы определения структурно-механических свойств (СМС) сырья, полуфабрикатов и готовых продуктов; приборы для регулирования технологических процессов и контроля качества на всех стадиях производства, основываясь на структурно-механических свойствах продуктов.

Термин «реология» ввел американский ученый Ю. Бингам, которому принадлежат ценные реологические исследования жидкостей и дисперсных систем. Официально термин «реология» принят на 3-м симпозиуме по пластичности (1929, США), однако отдельные положения реологии были установлены задолго до этого. Реология тесно переплетается с гидромеханикой, теориями упругости, пластичности и ползучести, в ней широко пользуются методами вискозиметрии. В основу реологии легли законы Ньютона о сопротивлении движению вязкой жидкости, уравнения движения несжимаемой вязкой жидкости Навье – Стокса, работы Дж. Максвелла, У. Томсона и др. Значительный вклад в развитие реологии внесен русскими учеными: Д.И. Менделеевым, Н.П. Петровым, Ф.Н. Шведовым и советскими учеными П.А. Ребиндером, М.П. Воларовичем, Г.В. Виноградовым, А.В. Горбатовым, Ю.А. Мачихиным, С.А. Мачихиным, Б.М. Азаровым, В.А. Аретом и др.

При использовании инженерной реологии, на основе биохимических, биофизических, физико-химических и органолептических показателей, решают следующие задачи:

- изучение сущности процессов, участвующих в структурообразовании функциональных продуктов;
- определение нормативных структурно-механических свойств, характеризующих качество изделий, для их использования в технологической документации;
- получение необходимых данных для расчета и создания специализированного технологического оборудования.

Реология включает два раздела: первый посвящен изуче-

нию реологических или, в более общем смысле, структурно-механических свойств реальных тел, второй рассматривает движение реальных тел в рабочих органах машин и аппаратов и разрабатывает инженерные способы их расчета.

Для проведения теоретических реологических исследований свойства тел выражают в виде математических (идеализированных) моделей или уравнений, которые с той или иной степенью точности характеризуют поведение реального тела в процессе деформирования. Недостаток теоретической реологии заключается в том, что простые и понятные модели не пригодны для практического использования, а приемлемые для практики модели – чрезвычайно сложны. Это положение относится и к белковым пищевым продуктам, которые имеют сложное физико-химическое строение и чувствительны к изменению внешних факторов. Для точного описания процессов течения и деформирования этих продуктов необходимы составные комплексные модели теоретической реологии и соответствующие дифференциальные уравнения, что неприемлемо для практических целей. Поэтому приходится находить приближенные решения на основе различных гипотез и соображений. В инженерной реологии обычно ориентируются на отыскание возможно простых зависимостей, так как для практики требуются только некоторые средние, суммарные характеристики. С этой целью в теоретических и экспериментальных исследованиях используются различные реологические методы: дифференциальный и интегральный, методы анализа закономерностей и подобия. Разработка и проведение экспериментов, и их обобщение в таком направлении позволяют получить физически обоснованные решения, применимые для практических целей.

Реологические или структурно-механические свойства характеризуют поведение продукта в условиях напряженного состояния и позволяют связать между собой напряжения деформации и скорости деформации в процессе приложения усилий.

Реологические свойства реальных объектов проявляются при механическом воздействии на них касательными или нормальными напряжениями. Протекание разнородных процессов: механических, тепловых, диффузионных, электрических – в значительной степени определяется структурно-механическими

свойствами. Они зависят от внутреннего строения и состава продукта, характера взаимодействия частиц или молекул между собой, физико-химического состояния влаги в материале, т. е. от типа структуры.

Деформация – изменение линейных размеров тела, при котором частицы или молекулы смещаются относительно друг друга без нарушения сплошности.

Величина и характер деформации зависят от способа приложения внешних сил, свойств материала тела и его формы. Как известно из курса «Сопротивление материалов», деформацию делят на два вида: а) обратимую (упругую), которая исчезает после прекращения действия силы; б) пластическую (вязкую), которая не исчезает после снятия нагрузки. При пластической деформации часть механической энергии переходит в тепло.

Кроме того, существует и другое деление деформаций. Например, по виду нагружения они могут быть сдвиговыми (рис. 1.1,а), одноосными (линейными) (рис. 1.1,б), а так же двухосными (плоскими) и объемными. При этом деформации при сдвиге, γ , и при растяжении-сжатии, ε , вычисляются по следующим уравнениям:

$$\gamma = \frac{\Delta}{a} ; \quad \varepsilon = \frac{\Delta l}{l} . \quad (1.1)$$

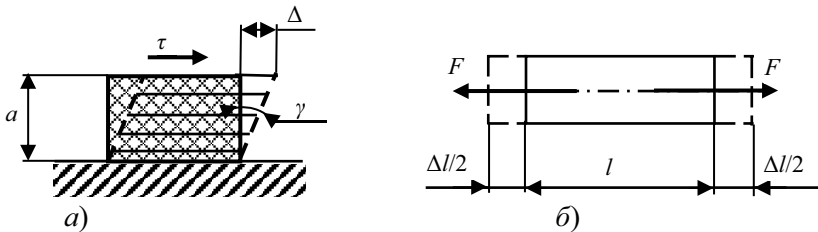


Рис. 1.1. Схемы нагружения материалов:
а) сдвиг; б) растяжение

Сдвиг – это очень важный вид деформации в реологии. Простой сдвиг рассматривается как плоская деформация, параллельная неподвижной плоскости вследствие действия на гранях элемента касательных напряжений. Простой сдвиг представляет

собой случай ламинарного потока, при котором тело можно считать состоящим из бесконечно тонких слоев. Эти слои не деформируются, а только скользят один по другому (рис. 1.1,а).

Деформации могут изменяться во времени t (с) при неустановившемся процессе, а при установившемся – изменение деформации в единицу времени постоянно. Все это описывается понятием скорости деформации:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt}, \quad (1.2)$$

где $\dot{\varepsilon}$ – скорость объемной деформации, с^{-1} .

Если деформация под действием конечных сил увеличивается непрерывно и неограниченно, то материал начинает течь. Установившийся режим течения характеризуется градиентом скорости, который по смыслу аналогичен скорости деформации, рис 1.2:

$$\dot{\gamma} = \frac{du}{dy}, \quad (1.3)$$

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

y – расстояние по нормали между двумя элементарными слоями, м.

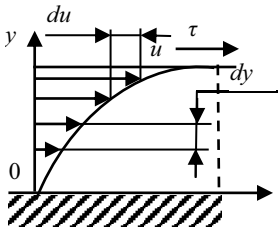


Рис. 1.2.

Вязкость – мера сопротивления течению. Она является основным свойством для жидких тел, а также для пластичных тел после превышения предела текучести. Для неньютоновских жидкостей вязкость является функцией скорости сдвига, поэтому ее называют «кажущейся», или эффективной, вязкостью

$\eta_{\text{эф}}$ [Па·с]. Для неньютоновских жидкостей эффективная вязкость состоит из двух компонентов:

- 1) ньютоновской вязкости η , которая основана на внутреннем трении и представляет физическую константу материала;

2) структурного сопротивления, которое зависит от структурного состояния дисперсных систем и является функцией скорости сдвига $\dot{\gamma}$.

Эффективная вязкость $\eta_{\text{эф}}$ является итоговой переменной характеристикой, которая описывает равновесное состояние между процессами восстановления и разрушения структуры в установившемся потоке и зависит от изменений градиента скорости и напряжения сдвига.

Если в условиях установившегося сдвигового течения касательное напряжение τ не пропорционально скорости деформирования $\dot{\gamma}$, т.е. их отношение: $\eta = \tau / \dot{\gamma}$, изменяется в зависимости от величины τ или $\dot{\gamma}$, то такую жидкость называют неньютоновской. Предложено несколько реологических уравнений для описания поведения неньютоновских жидкостей (см. ниже).

Вязкость жидкостей может зависеть от вибрационных (в т.ч. ультразвуковых), электрических, магнитных, световых воздействий, это относится как к растворам и расплавам полимеров, так и к дисперсным системам.

В реологии выделяют два вида течения: 1) *вязкое течение* – реализуется в истинно вязких, ньютоновских жидкостях при любых сколь угодно малых напряжениях сдвига τ . Это течение описывается уравнением Ньютона:

$$\tau = \eta \cdot \dot{\epsilon} \quad \text{или} \quad F = \eta \cdot A \cdot \frac{du}{dy}, \quad (1.4)$$

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

F – сила сопротивления между двумя элементарными слоями, Н;

A – площадь поверхности сопротивления этих слоев, м²;

2) *пластическое течение* – течение при величине напряжения τ , равного пределу текучести τ_r .

Напряжение – мера интенсивности внутренних сил F [Н],

возникающих в теле под влиянием внешних воздействий на единице площади S [м²], нормальной к вектору приложения силы:

$$\sigma = \frac{F}{A}, \text{ Па.} \quad (1.5)$$

Напряжение в точке нагруженного тела:

$$\sigma = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta F}{\Delta A} \right). \quad (1.6)$$

Реологические свойства качественно и количественно определяют поведение продукта под воздействием внешних факторов и позволяют связать между собой напряжения, деформации (или скорости деформаций) в процессе приложения усилия.

В реологии различают два взаимоисключающих понятия: «твердое идеально-упругое тело» и «невязкая жидкость». Под первым понимается такое тело, равновесные форма и напряжение которого достигаются мгновенно. Жидкость называется невязкой, т.е. если жидкость не способна создавать и поддерживать напряжения сдвига. Между предельными состояниями тел (удельно-упругими твердыми телами и невязкими жидкостями) в природе существует огромное многообразие тел промежуточного характера.

Рассмотрим основные модели, которые могут встретиться при изучении реологических свойств пищевых масс. При этом необходимо указать, что точные математические закономерности получены только для ньютоновских жидкостей, для всех неньютоновских течений получены только приближенные формулы.

Известны три промежуточные модели идеализированных материалов (таблица 1.1): идеально-упругое тело (Гука); идеально-вязкая жидкость (Ньютона); идеально-пластичное тело (Сен-Венана).

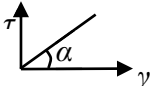
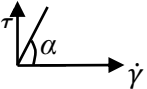
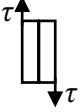
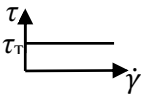
Идеально-упругое тело Гука. В идеально-упругом теле (модель – пружина) энергия, затраченная на деформацию, накапли-

вается и может быть возвращена при разгрузке. Закон Гука описывает поведение кристаллических и аморфных твердых тел при малых деформациях, а также жидкостей при изотропном расширении – сжатии.

Идеально-вязкая жидкость Ньютона. Идеально-вязкая жидкость характеризуется тем, что в ней напряжения пропорциональны скорости деформации. Вязкое течение происходит под действием любых сил, как бы малы они не были; однако скорость деформации снижается при уменьшении сил, а при их исчезновении обращается в ноль. Для таких жидкостей вязкость, являющаяся константой, пропорциональна напряжению сдвига.

Таблица 1.1

Реологические модели идеализированных тел

Модель	Вид модели	Графики течения	Уравнение $\tau = \gamma \cdot G$;
Гука			$\sigma = \varepsilon \cdot E.$
Ньютона			$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma};$ $\sigma = \eta_T \cdot \dot{\gamma}.$
Сен-Венана			При $\tau < \tau_T$ нет деформации; при $\tau = \tau_T$ течение

Закон Ньютона описывает поведение многих низкомолекулярных жидкостей при сдвиге и продольном течении. Механическая модель ньютоновской жидкости представляет собой *демпфер*, состоящий из поршня, который перемещается в цилиндре с жидкостью. При перемещении поршня жидкость через зазоры между поршнем и цилиндром протекает из одной части цилиндра в другую. При этом сопротивление перемещению поршня пропорционально его скорости (см. таблицу 1.1).

Идеально пластичное тело Сен-Венана может быть представлено в виде элемента, состоящего из двух прижатых друг к другу пластин. При относительном перемещении пластин между ними возникает постоянная сила трения, зависящая от величины сжимающей их силы. Тело Сен-Венана не начнет деформироваться до тех пор, пока напряжения сдвига не превысят некоторого критического значения – предела текучести τ_T (предельного напряжения сдвига), после чего элемент может двигаться с любой скоростью.

Для того чтобы описать реологическое поведение сложного тела в зависимости от свойств его компонентов, можно комбинировать в различных сочетаниях рассмотренные выше модели простейших идеальных тел, каждое из которых обладает лишь одним физико-механическим свойством. Эти элементы могут быть скомбинированы параллельно или последовательно.

В реологии широко распространен метод механических моделей. Например, для получения наглядной картины поведения материала под действием напряжений каждое его свойство (упругость, пластичность и др.) заменяют механическим элементом (пружиной, парой трения скольжения и т.д.). В реологии также широко используют геометрическое, математическое, физическое и другое моделирование. Физическое моделирование эффективно для получения качественных и количественных соответствий натурным объектам.

Практическое применение реологических исследований связано, во-первых, с возможностью сопоставлять различные материалы по форме реологических уравнений состояния и значениям входящих в них констант; во-вторых, с использованием реологических уравнений состояния для решения технических задач механики сплошных сред. Первое направление используется для стандартизации технологических материалов, контроля и регулирования технологических процессов практически во всех областях современной техники. В рамках второго направления рассматривают прикладные гидродинамические задачи – транспортировка неньютоновских жидкостей по трубопроводам, течение полимеров, пищевых продуктов в перерабатывающем оборудовании и т.д. Для концентрированных дисперсных систем к этим задачам примыкает установление оптимальных технологических

режимов перемешивания, формования изделий и т. п. Для твердых тел производят расчет напряженно-деформированного состояния конструктивных элементов и изделий в целом для определения их прочности, разрывного удлинения и долговечности.

Место реологии как одного из разделов технической механики сплошной среды (среди других разделов технической механики) наглядно видно из следующей классификации:

- а) идеальное твердое тело (эвклидово)* — при любых нормальных и касательных напряжениях деформация равна нулю (теоретическая механика);
- б) упругое тело (гуково)* — напряжение пропорционально деформации (сопротивление материалов);
- в) пластичное тело (сен-венаново)* — при достижении предельного напряжения сдвига начинаются пластические деформации (сопротивление материалов);
- г) реологические тела:* линейные – составленные из тел входящих в пункты *а, б, д*; нелинейные — эмпирические;
- д) истинно вязкая жидкость (ньютоновская)* — напряжение пропорционально градиенту скорости в первой степени;
- е) идеальная жидкость (паскалевская)* — вязкость и сжимаемость равны нулю.

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

Классическая реология как наука о течении и деформации реальных тел (техническая механика реальных тел или дисперсных систем) ставит задачей изучение свойств существующих продуктов и разработка методов расчета процессов их течения в рабочих органах машин, для получения готовых изделий заданного качества.

Физико-химическая механика как наука о способах и закономерностях формирования структур дисперсных систем с заранее заданными свойствами решает следующие задачи:

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

- 2) исследование, обоснование и оптимизация путей получения структур с заранее заданными реологическими (в самом широком смысле этого слова) свойствами.
- 3) разработка способов приложения установленных закономерностей для расчета машин и аппаратов и оперативного контроля основных показателей качества по значениям величин структурно-механических характеристик.

Управляющая реология включает исследование и обоснование такого сочетания различных видов воздействий на перерабатываемое сырье, при которых обеспечивается заданный уровень реологических характеристик в течение всего технологического процесса и получение готового продукта с заданными потребительскими свойствами.

Реализация исследований методами инженерной реологии и 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.

Таким образом, реология изучает СМС различных тел, а так же способы и приборы для их определения и регулирования, что необходимо знать инженерам пищевых производств.

1.2 Классификация реологических тел, кривые течения

Объектом исследований в пищевой реологии являются пищевые материалы. Проведем качественный предварительный анализ и группировку пищевых материалов. Если за основные простейшие (по агрегатному состоянию) материалы принять газы, жидкости и твердые тела, то подавляющее большинство пищевых материалов представляет собой, так называемые, дисперсные системы. Именно для последних особенно характерны существенные отклонения от классических законов деформации и течения.

Дисперсные системы состоят из двух или более компонентов или фаз. Обычно одну из фаз рассматривают как сплошную и

называют дисперсионной средой, другую, несплошную – дисперсной фазой. Такое разделение является условным и более или менее очевидным в большинстве случаев. Формально, и в некоторой степени условно, дисперсные среды могут быть разделены на восемь типов:

- 1) двухфазные системы из твердой и газовой фаз;
- 2) двухфазные системы из твердой и жидкой фаз;
- 3) двухфазные системы из жидкой и газовой фаз;
- 4) двухфазные системы из двух твердых фаз;
- 5) двухфазные системы из двух жидких фаз;
- 6) двухфазные системы из двух газовых фаз;
- 7) трехфазные системы из твердой, жидкой и газовой фаз;
- 8) многофазные системы.

Пищевые продукты, включая сырье и полуфабрикаты, в зависимости от состава, дисперсного строения и структуры обладают различными реологическими свойствами. Наиболее сложными реологическими свойствами обладают высоко-концентрированные дисперсные системы с пространственными структурами.

Если рассматривать классификацию дисперсных сред в более широком плане, как часть классификации состояний сред, с которыми приходится сталкиваться в пищевой промышленности, то в нее (в эту классификацию) необходимо включить представления о магнитных и электрических полях, потоках электромагнитных излучений, радиоактивном излучении, ультразвуке и т. п.

1.2.1 Классификация структур дисперсных систем

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

По классификации акад. П.А. Ребиндера, структуры 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 в результате 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. Зачастую эти структуры обладают способностью к самопроизвольному восстановлению после разрушения (тиксотропия). Нарастание прочности после разрушения происходит постепенно обычно до первоначальной прочности в результате броуновского движения высокодисперсных частиц при попадании на коагуляционные контакты. Толщина прослоек зависит в определенной мере от содержания дисперсионной среды. При увеличении ее содержания значения сдвиговых свойств обычно уменьшаются, а система из твердообразной переходит в жидкообразную. При этом дисперсность, т.е. преобладающий размер частиц, даже при постоянной концентрации фазы влияет на состояние системы, ее прочность или вязкость.

При обезвоживании коагуляционных структур (при увеличении содержания дисперсной фазы) прочность их повышается, но после определенного предела они перестают быть обратимотиксотропными. Восстанавливаемость структуры сохраняется в вязко-пластичной среде, когда пространственный каркас разрушается без нарушения сплошности. При дальнейшем снижении содержания жидкой фазы, т.е. при переходе к пластическим пастам, восстановление прочности после разрушения структуры возможно при действии напряжения, вызывающего пластические деформации, которые обеспечивают истинный контакт по всей поверхности разрыва. 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 и при одновременном изменении биохимической сущности объекта.

При образовании коагуляционных структур во многих пищевых продуктах 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 они могут образовываться из коагуляционных структур при удалении дисперсионной среды или при срастании частиц дисперсной фазы в процессе термообработки (коагуляция или денатурация белков), при охлаждении расплавов и охлаждении или увеличении концентрации растворов. 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 жесткости скелета структуры, наличие внутренних напряжений, возникающих в процессе образования фазовых контактов и влекущих в последующем перекристаллизацию и самопроизвольное понижение прочности вплоть до нарушения сплошности, например растрескивание при сушке.

Таким образом, вид структуры продуктов обуславливает его качественные и технологические показатели и поведение в процессах деформирования.

1.2.2 Классификация реологических тел

Принадлежность реального продукта к тому или иному виду «идеального» реологического тела, выявленная на основе предварительных экспериментов, позволяет обосновать выбор прибора для исследований и правильно определить его свойства.

Сдвиговые свойства представляют собой основную группу свойств, которые широко используются как для расчета различных процессов движения в рабочих органах машин, так и для

оценки качества пищевых продуктов. В связи с этим наибольшее распространение получили способы классификации пищевых и других реологических тел по сдвиговым характеристикам.

Если взять упругое и истинно-вязкое тела в качестве граничных, то все остальные тела будут располагаться между ними. Наиболее простая классификация (таблица 1.2) предложена по величине отношения предельного напряжения сдвига к плотности и ускорению свободного падения ($\tau_0 / (\rho \cdot g)$), характеризующего меру способности вещества сохранять свою форму.

Таблица 1.2

Классификация тел по физическим параметрам

$\tau_0 / (\rho \cdot g)$	Менее 0,005	0,005 – 0,02	0,02 – 0,15	Более 0,15
Наименование вещества	Структурные жидкости	Жидкие пасты	Густые пасты	Твердые тела

Б.А. Николаев предложил обобщенную классификацию (от твердого до истинно-вязкого состояния) по величине механических свойств. К первой группе относятся твердые и твердообразные тела, ко второй – твердо-жидкие, к третьей – жидкообразные и жидкости. Минимум показателей, характеризующих в достаточной мере реологические свойства продуктов, для каждой группы будут различными.

Твердые и твердообразные продукты первой группы (твердый жир, целые ткани мяса, сухари, печенье и пр.) характеризуются в основном модулями упругости, вязкостью и отношением вязкости к модулю упругости, а также предельным напряжением сдвига, обуславливающим начало течения структуры.

Твердо-жидкие продукты второй группы (мясной фарш, творог, студни, мучное тесто и пр.), обладающие многообразием механических свойств, характеризуются наибольшим количеством показателей: модулями упругости, эластичности, отношением вязкости к модулю упругости, предельным напряжением сдвига, пластичностью, а также эластичностью и коэффициентом разжижения (упрочнения).

Жидкообразные и жидкие продукты третьей группы (расплавленный жир, бульоны, молоко, мед, вода и пр.) характеризуются величинами их предельного напряжения сдвига, зависимостью структурной вязкости от напряжения, потерей давления при течении по трубам, предельной скоростью течения и, главным образом, вязкостью.

Предложенная проф. В.Д. Косым и М.Ю. Меркуловым классификация биотехнологических сред по реологическим сдвиговым характеристикам, делит материалы на следующие группы:

- 1) **структурированная жидкость**, практически ньютоновская, когда вязкость не зависит от градиента скорости и является постоянной величиной, при этом предельное напряжение сдвига равно нулю;
- 2) **переходная структурированная жидкость**, когда эффективная вязкость незначительно зависит от градиента скорости до критического значения $\dot{\gamma}_{кр}$, например для молока $\dot{\gamma}_{кр} = 200 \text{ с}^{-1}$. при дальнейшем увеличении $\dot{\gamma}$ вязкость остается практически постоянной величиной $\eta_{эф}$, а предельное напряжение сдвига находится в следующих пределах: $0 < \tau_0 < 10 \text{ Па}$, величиной которого в практических инженерных расчетах можно пренебречь;
- 3) **слабоструктурированная система**, когда эффективная вязкость зависит от $\dot{\gamma}$ во всей зоне разрушения структуры, при этом значения τ_0 находятся в следующем интервале: $10 < \tau_0 < 100 \text{ Па}$;
- 4) **вязко-пластическая система**, когда $\eta_{эф}$ резко зависит от $\dot{\gamma}$ при $100 < \tau_0 \leq 1000 \text{ Па}$;
- 5) **пластичная система**, которая характеризуется в основном величиной τ_0 : $1000 < \tau_0 \leq 5000 \text{ Па}$;
- 6) **упруго-эластичная система**, которая характеризуется в основном компрессионными или прочностными свойствами: $\tau_0 > 5000 \text{ Па}$.

Представляет интерес классификация реальных тел с помощью степенного уравнения Гершеля – Балкли:

$$\tau = \tau_0 + B_1 \cdot \dot{\gamma}^n, \quad (1.7)$$

где: τ – напряжение между слоями продукта, Па;

τ_0 – предельное напряжение сдвига, Па;

B_1 – коэффициент консистенции, пропорциональный вязкости, Па·сⁿ;

n –индекс течения.

При таком способе классификации строятся зависимости между напряжением сдвига и градиентом скорости (кривые течения, см. ниже) и между эффективной вязкостью и градиентом скорости сдвига. По характеру полученных кривых выделяют следующие виды тел, представленные в таблице 1.3.

Таблица 1.3
Значения постоянных в уравнении (1.7).

№ п/п	Предель- ное напря- жение сдвига	Индекс течения	Вяз- кость	Название тела
1	0	∞	∞	упругое тело Гука
2	> 0	0	> 0	пластичное тело Сен-Венана
3	> 0	1	> 0	пластично-вязкое тело Шведова-Бингама
4	0	< 1	> 0	псевдопластическое тело
5	0	> 1	> 0	дилатантное тело
6	> 0	< 1	> 0	нелинейное пла- стичное тело
7	> 0	> 1	> 0	нелинейное дила- тантное тело
8	0	1	> 0	истинно-вязкое тело Ньютона
9	0	0	0	идеальная жидкость

Перечисленные в таблице 1.3 системы не меняют своих свойств во времени. Выделяют еще группу систем с переменными во времени свойствами: *тиксотропные*, которым присуще изотермическое восстановление структуры после разрушения, а также непрерывное ее разрушение (до определенного предела) при деформировании, и *реопексные*, которые способны структурироваться, т.е. образовывать контакты между частицами в результате ориентации или слабой турбулизации при механическом воздействии с небольшими градиентами скорости.

П.А. Ребиндер и Н.В. Михайлов предложили разделять реологические тела на *жидкообразные* и *твердообразные* в зависимости от характера кривой $\eta_{эф}(\tau)$ рис. 1.3 и от периода релаксации (период релаксации – время, в течение которого напряжения в нагруженном теле уменьшается в $e = 2,7$ раз).

К жидкообразным телам относятся ньютоновские жидкости и структурированные системы, не имеющие статического предельного напряжения сдвига ($\tau_{0\text{ст}} = 0$), т.е. такие системы текут при приложении сколь угодно малого внешнего воздействия. К твердообразным относятся упруго-пластичные и другие тела, обладающие статическим и динамическим предельным напряжением сдвига.

В целях системного рассмотрения тенденций формирования ассортимента молочных продуктов необходимо в качестве исходной предпосылки использовать научно-обоснованную классификацию, которая упростит конструирование молочных продуктов с заданной консистенцией и химическим составом.

В основу такой классификации предложена консистенция продуктов, которая представляет собой совокупность реологических свойств слабоструктурированных жидкостей, вязко-пластичного и упруго-эластичного продукта.

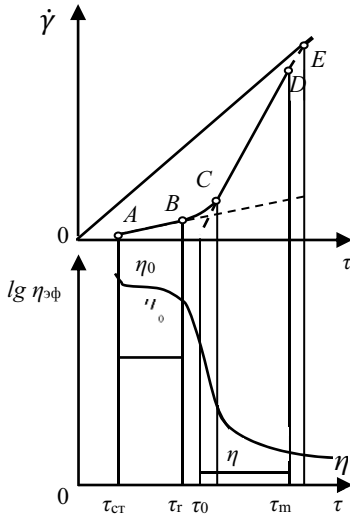


Рис. 1.3. Обобщенная кривая течения для твердообразных систем

Первая группа включает в себя слабоструктурированные (условно ньютоновские и ньютоновские) жидкости, к которым относятся: молоко, сливки, концентрированное молоко без сахара и др. Слабоструктурированные жидкости практически не проявляют аномалии вязкости и могут быть отнесены к ньютоновским жидкостям, течение которых описывается уравнением:

$$\dot{\gamma} = \frac{1}{\eta} \cdot \tau. \quad (1.8)$$

Вторая группа объединяет молочные продукты, текущие как вязко-пластические жидкости (ряженка, сметана, йогурт и т.д.). Вязко-пластическое тело не деформируется при напряжениях, меньших критического значения, а при больших течет как вязкая жидкость (жидкость Бингама):

$$\tau^n = \eta \cdot \dot{\gamma} + \tau_0. \quad (1.9)$$

Третья группа включает в себя упруго-эластические продукты (плавленый, сычужный, колбасный сыры, сливочное масло).

1.2.3 Кривые течения

Деформационное поведение реальных дисперсных систем, к которым относятся пищевые массы, можно охарактеризовать так называемой *кривой течения*. Эта кривая строится по экспериментальным данным в координатах: напряжение сдвига – скорость сдвига. В общем виде эту зависимость можно записать как:

$$\tau = f(\dot{\gamma}), \text{ или } \dot{\gamma} = \varphi(\tau). \quad (1.10)$$

Это уравнение применимо для реальных систем, которые могут быть либо жидкостями либо твердообразными материалами. Жидкости, в свою очередь подразделяются на ньютоновские и неньютоновские. Твердообразные материалы, имеющие предельное напряжение сдвига τ_0 , являются, как правило, неньютоновскими средами.

Кривые течения жидкостей исходят из начала координат (рис. 1.4). Из этого следует, что жидкость является средой, поддающейся деформации (течению) независимо от величины вязкости при сколь угодно малом прилагаемом внешнем усилии. Твердообразные системы могут течь, проявляя свойства жидкостей только после превышения касательным напряжением некоторой критической величины – предельного напряжения сдвига τ_0 , определяющей пластические свойства материала.

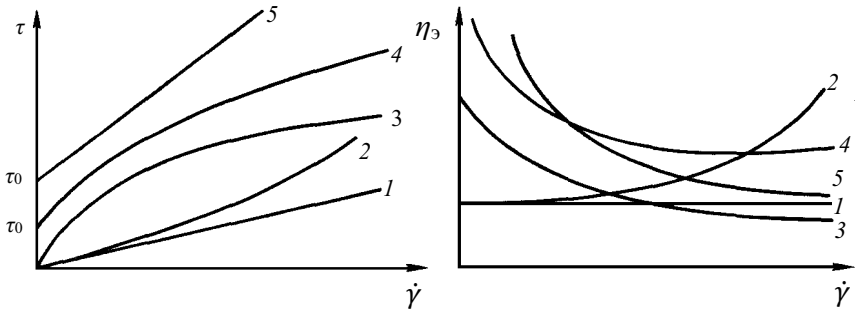


Рисунок 1.4. Кривые течения:

- 1 – ньютоновской жидкости; 2 – дилатантной жидкости;
3 – структурно-вязкая жидкость; 4 – нелинейного пластичного тела;
5 – линейного пластичного тела

Кривые течения (реограммы) *ньютоновских* жидкостей представляют собой прямую линию 1, проходящую через начало координат (рис. 1.4). Для таких жидкостей применимо реологическое уравнение Ньютона:

$$\tau = \frac{\eta}{\dot{\gamma}}. \quad (1.11)$$

Все кривые течения (2 – 5), которые отклоняются от прямой линии, называют неньютоновскими (аномально-вязкими) жидкостями. Неньютоновское поведение жидкостей может иметь различные причины: в жидких дисперсных системах определяющую роль играет ориентация частиц дисперсной фазы, изменение их формы и степени агрегации, в коллоидных жидкостях – постепенно углубляющееся с ростом напряжений разрушение (или изменение) внутренней структуры; в полимерах – эффекты механической релаксации, т.е. перераспределения напряжений. В конкретных случаях может иметь место наложение различных механизмов; например, неньютоновское поведение наполненных полимеров связано как со структурными перестройками, так и с релаксационными явлениями. Частный случай неньютоновского поведения жидкости – изменение вязкости с течением времени из-за протекающих в среде химических реакций. Если реакция идет в гомогенной среде, изменение вязкости среды отражает изменение ее состава; при этом деформирование обычно не влияет на кинетические закономерности реакции. Однако для гетерогенных реакций, например, гетерогенной полимеризации или отверждения олигомеров, деформирование влияет на кинетику реакции (например, сдвиговое течение в реакторе или воздействие ультразвуковыми колебаниями).

Среди пищевых материалов существуют такие, у которых вязкость изменяется от скорости деформирования. Такие жидкости описываются реологическим уравнением Оствальда-де-Вилля:

$$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n, \quad (1.12)$$

где K – коэффициент консистенции, зависящий как от природы материала, так и от вида и геометрии измерительных элементов прибора;

n – индекс течения.

$$n = \frac{d \lg \tau}{d \lg \dot{\gamma}}.$$

При этом кривая 2 характеризует *дилатантное* течение (при $n > 1$), характерное в основном для концентрированных дисперсных систем, при котором с увеличением скорости деформации наступает «затруднение сдвига», т.е. происходит повышение вязкости; кривая 3 описывает *псевдопластическое* течение (при $0 < n < 1$), что характерно для «сдвигового размягчения» вследствие разрушения структуры с увеличением скорости деформации;

Кривая 4 показывает *нелинейное пластическое* течение, характерное для большинства пластичных тел после достижения предельного напряжения сдвига τ_0 , реологическое уравнение Гершеля – Балкли описывает их поведение:

$$\tau = \tau_0 + B_0^* \cdot \dot{\gamma}^n. \quad (1.13)$$

Линейная зависимость 5 характерна для *бингамовских* тел и соответствует идеальному пластичному течению, у которых после достижения предельного напряжения сдвига τ_0 наблюдается пропорциональность между скоростью и напряжением сдвига. Такие материалы описываются уравнением Бингама:

$$\tau = \tau_0 + \eta_{\text{пл}} \cdot \dot{\gamma}^n, \quad (1.14)$$

где $\eta_{\text{пл}}$ – пластическая вязкость, Па·с.

Таким образом, в качестве контролируемого параметра всех молочных продуктов может быть принята величина эффективной вязкости $\eta_{\text{эф}}$ (при $\dot{\gamma} = \text{const}$). Для молочных продуктов, имеющих вязко-пластичный характер течения, необходимо контролировать предельное напряжение сдвига τ_0 и пластическую вязкость $\eta_{\text{пл}}$.

Для многих неньютоновских жидкостей характерны такие явления, как *тиксотропия* – обратимое уменьшение вязкости («разжижение») жидкости или структурирование системы во времени (рис. 1.5,а), и *реопексия* – рост вязкости предельно наполненных дисперсных систем с вязкой дисперсионной средой (рис. 1.5,б).

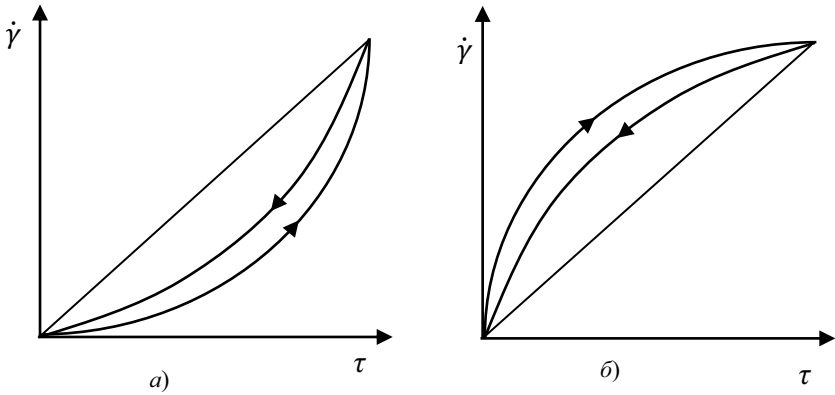


Рис. 1.5. Кривые течения характеризующие:
а) тиксотропные системы; б) реопексные системы

Во многих процессах продукт подвергается интенсивным механическим воздействиям (в насосах, мешалках и т.д.), т.е. его структура достигает частичного или практически предельного разрушения. Поэтому при использовании результатов реологических исследований для практических расчетов следует хотя бы приближенно выбрать ту кривую течения, которая соответствует данной степени разрушения. В соответствии с этим при расчете различных процессов необходимо использовать характеристики, определенные в соответствующем интервале напряжений и деформаций. Качественную оценку продукта также необходимо проводить по наиболее существенным для данного процесса характеристикам.

1.3 Сдвиговые, поверхностные и компрессионные свойства материалов

Реологические свойства материалов проявляются при воздействии на него каких-либо внешних усилий или факторов. Это воздействие происходит во время переработки материалов, их транспортировки или хранения. По виду приложения внешних усилий к продукту эти свойства можно разделить на три группы: сдвиговые, объемные и поверхностные (рис 1.6).

Сдвиговые свойства характеризуют поведение объема продукта при воздействии на него сдвиговых, касательных напряжений, рис. 1.6,а.

Поверхностные свойства характеризуют поведение продукта на границе раздела с другим, твердым материалом при воздействии нормальных (адгезия, рис.1.6,б) и касательных (внешнее трение) напряжений.

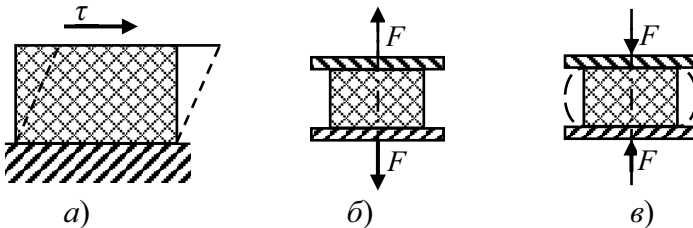


Рис 1.6. Виды воздействий на материалы:
а) сдвиговое; б) поверхностное; в) компрессионное

Компрессионные (объемные) свойства определяют поведение объема продукта при воздействии на него нормальных напряжений в замкнутой форме или между двумя пластинами, рис. 1.6,в.

1.3.1 Сдвиговые свойства

Как уже отмечалось выше, сдвиговые свойства представляют собой основную группу свойств. Характеристики, определяющие эти свойства, можно использовать для самых различных целей – от оценки качества продукта до расчета трубопроводов, машин и аппаратов. Эти свойства проявляются при воздействии на продукт касательных напряжений (сил).

К основным сдвиговым свойствам **слабоструктурированных и вязко-пластичных систем**, когда $\tau > \tau_0$, относятся *статическое и динамическое предельное напряжение сдвига, эффективная и пластическая вязкость, пластичность структуры* для вязко-пластичных систем и *динамическая вязкость* для слабоструктурированных систем.

Статическое предельное напряжение сдвига (τ_0 , Па) – это усилие, приходящееся на единицу поверхности продукта, при превышении которого продукт начинает течь, т.е. напряжение, по достижению которого в системе начинают развиваться необратимые деформации.

Динамическое предельное напряжение сдвига ($\tau_{0д}$, Па) – напряжение, равное отрезку, отсекаемому на оси абсцисс прямой зоны вязко-пластичного течения в координатах градиента скорости – напряжения сдвига.

Эффективная вязкость – это так называемая «кажущаяся» вязкость, которая является переменной величиной и зависит от градиента скорости продукта ($\dot{\gamma}$, с^{-1}).

Эффективная вязкость является итоговой переменной характеристикой, описывающей равновесное состояние между процессами восстановления и разрушения структуры в установившемся потоке. Она характеризуется углом наклона прямой линии, соединяющей начало координат с точкой, для которой определяется ее значение. С увеличением напряжения сдвига эффективная вязкость уменьшается, т.е. угол наклона возрастает на кривой течения в зоне лавинообразного разрушения структуры (зона 3 – 4, рис.1.7). Точки a , b , c – соответствующие определенному значению τ (τ_a , τ_b , τ_c), соединим с точкой 0, тогда эффективная вязкость в каждой точке характеризуется углом наклона прямой: $\eta_{\text{эф}_a} = \tau_a / \dot{\gamma}_a$; $\eta_{\text{эф}_b} = \tau_b / \dot{\gamma}_b$; $\eta_{\text{эф}_c} = \tau_c / \dot{\gamma}_c$. Зависимость эффективной вязкости от скорости сдвига в логарифмических шкалах (рис. 1.8) подчиняется следующей зависимости:

$$\eta_{\text{эф}} = B_0^* \cdot \dot{\gamma}_*^{-m}, \quad (1.15)$$

где: B_0^* – эффективная вязкость при единичном значении относительного (безразмерного) градиента скорости:

$$\dot{\gamma}_* = \dot{\gamma} / \dot{\gamma}_1 \quad (\dot{\gamma}_1 = 1 \text{ с}^{-1});$$

m – темп разрушения структуры, т.е. tg угла наклона логарифмической прямой.

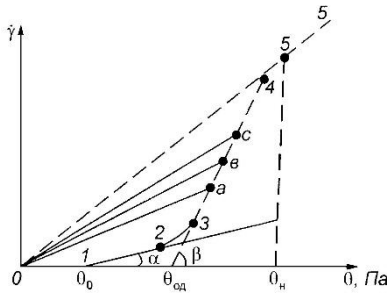


Рис. 1.7. Кривая течения вязко-пластичных систем: 0 – 1 – упругие деформации; 1 – 2 – зона пластического течения с наименьшей пластической вязкостью; 2 – 3 – начало лавинного разрушения структуры; 3 – 4 – зона вязко-пластичного течения; 5 – 5 – зона ньютоновского течения с минимальной вязкостью предельно разрушенной структуры

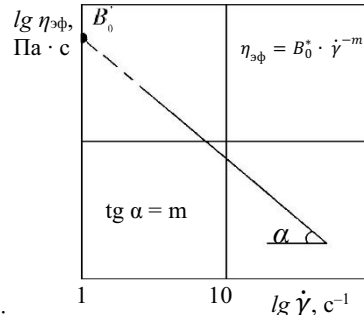


Рис. 1.8. Характер изменения эффективной вязкости от градиента скорости сдвига в логарифмических шкалах в зоне лавинного разрушения структуры

Пластическая вязкость – величина постоянная, не зависящая от напряжения сдвига и в осях координат градиент скорости – напряжение сдвига представляет собой $\operatorname{ctg} \alpha$ прямой, не выходящей из начала координат и отсекающей на оси τ отрезок, равный статическому (соответствующая η_0) или динамическому (соответствующая η_m) предельному напряжению сдвига: наибольшая (шведовская) пластическая вязкость:

$$\eta_0 = (\tau - \tau_0) / \dot{\gamma}, \text{ Па} \cdot \text{с}; \quad (1.16)$$

наименьшая (бингамовская) пластическая вязкость:

$$\eta_m = (\tau - \tau_{0д}) / \dot{\gamma}, \text{ Па} \cdot \text{с}; \quad (1.17)$$

Пластичность структуры – это отношение статического предельного напряжения сдвига к пластической вязкости:

$$\psi = \tau_0 / \eta_m, \text{ с}^{-1} \quad (1.18)$$

Динамическая вязкость ньютоновской или структурированной жидкости характеризуется углом наклона прямой $\dot{\gamma} = f(\tau)$, выходящей из начала координат, т.е. $\tau_0 = 0$.

Структурно-механические свойства **в области практически неразрушенных структур**, когда $\tau < \tau_0$, можно характеризовать законом Гука. К ним относятся: условно-мгновенный модуль упругости, эластичный и равновесный модуль, период релаксации. Эти свойства определяют из диаграммы кинетики относительной деформации γ при действии постоянного напряжения сдвига τ , когда происходит ползучесть (рис. 1.9).

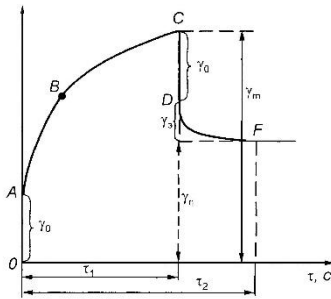


Рис. 1.9. Кинетика относительной деформации при действии постоянного напряжения сдвига

Диаграмма кинетики деформации складывается из двух кривых: OABC – нагрузки (действия постоянного напряжения сдвига τ) и CDF – разгрузки (деформация после снятия нагрузки). Момент снятия нагрузки устанавливают после появления практически прямолинейного участка на кривой ABC.

После снятия нагрузки за 0,5 – 1,0 с исчезает условно-мгновенная истинно упругая деформация γ_0 . На диаграмме полное развитие деформации γ_m к моменту снятия нагрузки выражает уравнение:

$$\gamma_m = \gamma_0 + \gamma_s + \gamma_\eta, \quad (1.19)$$

где: $(\gamma_0 + \gamma_s = \gamma_y)$ – упругая деформация, спадающая самопроизвольно после снятия нагрузки;

γ_η – остаточная деформация;

γ_s – деформация упругого последствия (эластическая).

Остаточная деформация γ_η , которая образуется после разгрузки, не исчезает во времени. После выхода на прямолинейный участок кривой разгрузки она остается практически постоянной величиной. Это выражается в течении системы, а скорость зависит от ее вязкости.

Деформация упругого последствия или замедленно развивающаяся (эластическая) является обратимой. Обусловлена

она структурой реальных тел, в которых наряду с релаксацией, обратимость напряжений производит перераспределение упругих деформаций по времени в различных частях структуры.

Условно-мгновенный модуль упругости представляет собой отношение напряжения τ к мгновенно упругой составляющей деформации сдвига γ_0 . Упругость тел при сдвиге характеризуется модулем упругости второго рода $G_{\text{ум}}$:

$$G_{\text{ум}} = \tau / \gamma_0. \quad (1.20)$$

Эластичный модуль G_3 – это отношение τ к упругой γ_y деформации, за вычетом мгновенно упругой составляющей γ_0 , т.е. к эластической деформации γ_3 :

$$G_3 = \tau / (\gamma_y - \gamma_0) = \tau / \gamma_3. \quad (1.21)$$

Равновесный модуль – это отношение напряжения τ к общей деформации γ_m , где нельзя разграничить упругую и эластичную деформации:

$$G = \tau / \gamma_m. \quad (1.22)$$

Период релаксации – это продолжительность релаксирования (восстановления) напряжения при постоянной деформации или деформации после снятия напряжения (t_p , с).

Для измерения характеристик, определяющих сдвиговые свойства продуктов, применяют вискозиметры различных конструкций и принципов действия. От выбора измерительного узла для конкретного продукта зависит получение достоверных результатов, что обеспечивает получение правильных расчетных данных.

1.3.2 Поверхностные свойства

Особое место среди структурно-механических свойств занимают *поверхностные свойства* (адгезия, когезия, коэффициент трения). Они характеризуют усилие взаимодействия между рабочими поверхностями оборудования и перерабатываемого продукта при отрыве или сдвиге.

В процессе технологической обработки пищевые материалы (адгезив) находятся в контакте с поверхностями различных рабочих органов машин (субстрат), транспортирующих устройств и т.п. Характер течения массы по каналам формирующих машин разных типов (шнековых, валковых, шестеренных и др.), а также по технологическим трубопроводам определяется как ее структурно-механическими свойствами, так и силами сцепления с поверхностями контакта.

Адгезия – это слипание поверхностей двух разнородных материалов. Это явление часто встречается в природе и широко используется в технике. Под *когезией* понимают сцепление частиц внутри рассматриваемого тела. Для пищевых материалов характерны разные виды отрыва (рис. 1.10): *а)* адгезионный; *б)* когезионный; *в)* смешанный – адгезионно-когезионный.

В ряде случаев для двух или более фазовых систем установить границу разрушения сложно. Поверхность пластины после отрыва может быть смочена дисперсионной средой или покрыта тончайшей пленкой тонкодисперсной фракции исследуемого продукта.

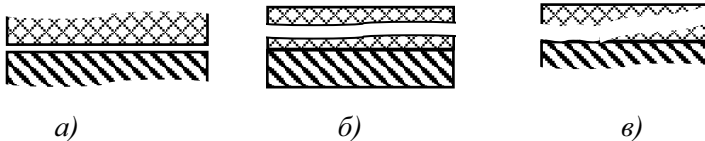


Рис. 1.10. Виды отрыва материала:
а) адгезионный; *б)* когезионный;
в) смешанный – адгезионно-когезионный

Общей количественной теории адгезии пока нет, хотя весьма плодотворны попытки комплексного объяснения адгезии на основе различных механизмов взаимодействия. В этом смысле для разработки теоретических представлений об адгезии перспективны фундаментальные работы академика П.А. Ребиндера об адсорбции и поверхностной активности тонких пленок. В результате остроумных и тонких экспериментов В.А. Пчелин установил для растворов белковых веществ поверхностное натяжение, диэлектрическую постоянную, поверхностный потенциал и

др. В явлении адгезии белковых веществ, как следует из теоретических представлений Б.В. Дерягина, участвуют, кроме Ван-дер-Ваальсовых сил притяжения, электростатические силы, обусловленные возникновением двойного электрического слоя на поверхности.

Величину адгезии двух тел принято характеризовать: силой отрыва; удельной работой отрыва, отнесенной к единице площади; временем, необходимым для нарушения связи между субстратом и адгезивом под действием определенной нагрузки. Наиболее распространенными методами испытания являются:

- а) неравномерный отрыв, который позволяет выявить изменения в значениях адгезионной прочности на отдельных участках испытуемого образца;
- б) равномерный отрыв, при котором измеряют значение усилия, необходимого для отделения адгезива от субстрата одновременно по всей площади контакта;
- в) сдвиг одного материала относительно другого.

Часто адгезию характеризуют минимальной силой, необходимой для отрыва. Эту величину называют адгезионной прочностью, адгезионным давлением (напряжением), давлением прилипания или удельным прилипанием.

На формирование адгезионной связи большое влияние оказывают реологические свойства адгезива, чистота поверхности подложки и ее топография, продолжительность контактирования адгезива и субстрата, давление при контакте, температура адгезива и подложки, скорость отрыва от подложки.

При эксплуатации оборудования, а также при проектировании и создании новых машин необходимо учитывать адгезионные явления, для того чтобы правильно выбрать материал деталей или покрытий, установить оптимальный режим работы. Например, при производстве мягких сортов конфет из пралиновых масс, сливочной помадки и ряда других в зависимости от назначения тех или иных органов машины приходится или увеличивать их адгезионное взаимодействие, или добиваться минимального прилипания. Так, если в питающей зоне формирующей машины прилипание массы к стенкам должно быть наименьшим, то в шнековой камере – наибольшим. Поверхность же шнека в

противоположность выше сказанному должна быть гладкой, выполненной из материала, наименее прилипающего к массе. Для валкового нагнетателя характерно максимальное увеличение сил взаимодействия массы с поверхностью валков, что повышает эффективность работы машины.

Хотя до настоящего времени природа адгезии не выявлена, известно несколько теорий, объясняющих физико-химическую сущность адгезионных явлений:

1) по адсорбционной теории Дебройна и Мак-Ларена, адгезия связана с действием межмолекулярных сил: *физических* – Ван-дер-Ваальсовых или *химических*, например ковалентно-ионных;

2) по электрической теории Б.В. Дерягина и Н.А. Кротовой – с разностью потенциалов на границе разнородных тел, т.е. с возникновением в зоне контакта своеобразного электрического молекулярного конденсатора, обусловленного двойным электрическим слоем;

3) по электромагнитной – с электромагнитным взаимодействием, т.е. излучением и поглощением электромагнитных волн атомами и молекулами, что может реализоваться в конденсированных телах;

4) по электрорелаксационной теории Н.М. Москвитина – с двойным электрическим слоем и скоростью отрыва, измерение которой вызывает появление деформационной составляющей силы или работы разрушения, связанной со скоростью протекания релаксационных процессов в разрушенном соединении;

5) по диффузионной теории С.С. Воюцкого и Б.В. Дерягина – с диффузией концов макромолекул через границу первоначального контакта, в результате чего в предельном случае граница раздела фаз может исчезать; подобна этой механическая теория, согласно которой адгезионный контакт образуется за счет механического зацепления молекулярных или надмолекулярных образований с микронеровностями поверхности;

6) по термодинамической теории – с поверхностным натяжением, которое обуславливает, по правилу Дюпре, работу по замене поверхности раздела «твердое тело – жидкость» поверхностью «твердое тело – газ», что реализуется при отрыве диска от продукта.

Формально адгезия определяется как удельная сила нормального отрыва пластины от продукта:

$$p_0 = F_0 / A_0, \quad (1.23)$$

где: F_0 – сила отрыва, Н;

A_0 – геометрическая площадь пластины, м^2 .

Внешнее трение – взаимодействие между телами на границе их соприкосновения, препятствующее относительному их перемещению вдоль поверхности соприкосновения.

Трудно разделить силы трения и адгезии, возникающие при относительном смещении соприкасающихся поверхностей двух тел. Связь сил трения и адгезии определяется уравнением Дерягина:

$$F_{\text{тр}} = \mu(N + p_0 \cdot A_0), \quad (1.24)$$

где: $F_{\text{тр}}$ – сила внешнего трения, Н;

μ – истинный коэффициент трения;

N – нормальная нагрузка, Н;

A_0 – площадь истинного контакта, м^2 ;

p_0 – удельное прилипание, действующее на участках площади A_0 , Па.

Сила внешнего трения – усилие, действующее по касательной к продукту и вызывающее сдвиг твердого материала по продукту. Она может быть статической $F_{\text{тр ст}}$ или динамической $F_{\text{тр ст}}$.

Статическая – максимальное значение, которое достигается в начальный момент сдвига одной поверхности по отношению к другой, и расходуется на преодоление силы трения покоя (инерции) и разрушения связей между материалом и продуктом (поверхностями), образовавшихся в период предварительного контактирования. В начальный момент сдвига происходит переход из состояния покоя в равномерное движение, сопровождаемый пластическими деформациями.

Динамическая – учитывает силу трения скольжения при

установившейся скорости движения. При малых скоростях движения, а следовательно и ускорениях, динамическая сила трения практически будет равно статической. Разница между динамической и статической силой составляет *инерционную силу* $P_{ин}$.

Истинный коэффициент внешнего трения μ (статический или динамический) – отношение соответствующей силы внешнего трения $F_{тр}$ к сумме нормальных сил контакта N и отрыва ($p_0 \cdot A_0$) (1.26).

В ряде случаев удобнее оперировать *эффективным коэффициентом внешнего трения $\mu_{эф}$* :

$$\mu_{эф} = F_{тр} / N. \quad (1.25)$$

Этот коэффициент связан с истинным коэффициентом трения следующим образом:

$$\mu_{эф} = \mu \left(1 + \frac{p_0 A_0}{N} \right). \quad (1.26)$$

Внешнее трение зависит от липкости и ряда других факторов (давление контакта, скорости смещения, температуры и пр.), причем влияние этих факторов неоднозначно. Для теоретического обоснования внешнего трения предложены молекулярно-кинетическая, механическая, физическая и другие теории, аналогичные теориям, объясняющим адгезию.

1.3.3 Компрессионные свойства

Компрессионные свойства используются для расчета рабочих органов машин и аппаратов и для оценки качества продукта, например, при растяжении – сжатии. К ним относятся *коэффициенты объемного и бокового давления, коэффициент Пуансона, модули упругости* и д.р. Кроме того, ряд механических моделей (Максвелла, Кельвина и д.р.) описывают поведение продукта при осевом или объемном деформировании.

Плотность, как одно из компрессионных свойств, является

существенной характеристикой при расчете ряда машин и аппаратов и при оценке качества продукта. Среднюю плотность (ρ , кг/м³), для сравнительно небольшого объема определяют из соотношения:

$$\rho = M / V, \quad (1.27)$$

где: M – масса продукта, кг;

V – объем продукта, м³.

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

Между плотностью ρ и удельным весом (γ , Н/м³) существует простая зависимость:

$$\gamma = \rho \cdot g, \quad (1.28)$$

где: g – ускорение свободного падения, м/с².

Плотность смеси из нескольких компонентов, когда они не вступают во взаимодействие, при котором меняется состав или объем смеси, можно вычислить по зависимости:

$$\rho = \sum_i c_i \rho_i \quad \text{или} \quad \rho = 1 / \sum_i (c_i / \rho_i), \quad (1.29)$$

где: c_i – концентрация одного из компонентов в смеси, кг на 1 кг смеси;

ρ_i – плотность компонента, кг/м³;

i – число компонентов.

Коэффициент объемного сжатия (β , Па⁻¹) характеризует изменение объема (ΔV , м³) продукта при изменении давления (Δp , Па) на единицу его измерения.

Для практически ньютоновских структурированных жидкостей он почти не зависит от давления и продолжительности его действия. Для пластично-вязких систем с увеличением давления коэффициент уменьшается и при достаточно высоких давлениях, например при давлениях $(20 - 30) \cdot 10^5$ Па, достигает значения, присущего дисперсионной среде, в частности воде, так как во многих продуктах молочной промышленности (творожная масса и др.) ее содержится до 70-75%.

Коэффициент объемного сжатия для ньютоновских и практически ньютоновских структурированных жидкостей определяется по зависимости:

$$\beta_p = -\frac{1}{V} \cdot \frac{\Delta V}{\Delta p} \quad (1.30)$$

Для пластично-вязких систем коэффициентом β можно пользоваться как интегральной характеристикой, зависящей от продолжительности воздействия и давления на продукт:

$$\beta_p(p, t) = -\frac{\varepsilon_v(p, t)}{\Delta p}, \quad (1.31)$$

где: p – давление, действующее на продукт, Па⁻¹;

t – продолжительность действия давления на продукт, с;

ε_v – относительная объемная деформация.

Коэффициент бокового давления ζ – это отношение бокового давления p_δ к осевому p_o при действии нормальных напряжений в замкнутом объеме:

$$\zeta = p_\delta / p_o. \quad (1.32)$$

Для ньютоновских и структурированных жидкостей $\zeta = 1$, а для пластично-вязких $\zeta < 1$.

При условии постоянства объема, например при одноосном сжатии, уменьшается высота тела и увеличиваются его поперечные размеры, что характеризуется соответственно относительными деформациями, которые связаны между собой посредством *коэффициента Пуассона*.

Коэффициент Пуассона ν – это отношение относительных линейных деформаций, т.е. поперечной к продольной в области действия закона Гука, и характеризует упругие свойства продукта.

Упругость – способность тела после деформирования полностью восстанавливать свою первоначальную форму, при этом работа деформирования равна работе восстановления.

Характеризуется упругость при растяжении – сжатии модулем упругости первого рода (E , Па). Для описания упругих свойств продуктов в различных зонах деформации (рис. 1.11) часто недостаточно классических понятий о модулях упругости. Тогда можно применять модификации модулей упругости: условно-мгновенный, эластический, равновесный.

Условно-мгновенный модуль упругости представляет собой отношение напряжения σ к условно-мгновенной истинно упругой составляющей деформации ε_0 .

Эластичный модуль – это отношение напряжения σ к эластической деформации ε_3 .

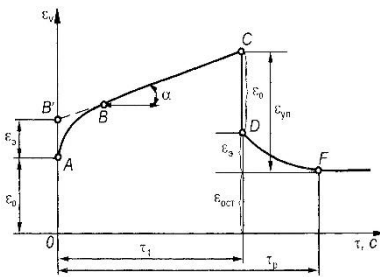


Рис. 1.11. Типичная кинетическая кривая зависимости относительной объемной деформации от времени действия напряжения

Равновесный (релаксационный) модуль – это отношение напряжения σ к общей упругой деформации $\varepsilon_{уп}$, когда нельзя разграничить условно-мгновенную истинно упругую и эластическую деформации.

Пищевые материалы при технологической обработке подвергаются воздействию внешних нагрузок, вызывающих их деформацию, вследствие которой в материале воз-

никают внутренние напряжения. Даже при малых напряжениях соотношение между упругой, вязкой и пластичной компонентами деформации не сохраняется постоянным, и в материале происходит развивающийся во времени процесс *релаксации* (рассасывания) напряжений.

Впервые понятие релаксации напряжений ввел Максвелл в конце 70-х годов позапрошлого столетия. Им было дано аналитическое выражение процесса релаксации материалов, исходя из предположения наличия прямо пропорциональной зависимости между скоростью убывания напряжений с течением времени и величинами действующих напряжений.

После Максвелла изучением явлений пластичности занимался Ф.Н. Шведов, который развил теорию упругих жидкостей, заложив тем самым основы реологии дисперсных систем. Ф.Н. Шведовым было дано уравнение релаксации напряжений в виде функции

$$\sigma = \sigma_k + (\sigma_0 - \sigma_k)e^{-t/T_p}, \quad (1.33)$$

где σ – напряжение в момент времени t , Па;

σ_0, σ_k – соответственно начальное и конечное напряжение, Па;

T_p – период релаксации, с.

Период релаксации (T_p) – промежуток времени, в течение которого материал из неравновесного напряженного состояния переходит практически в равновесное, установившееся.

Это уравнение облакает в реальную форму, высказанную Максвеллом мысль, что пластичные тела текут в определенных границах напряжений. В отличие от Максвелла, принимавшего, что напряжение в теле релаксирует до нуля, Шведов показал, что любое напряжение релаксирует не до нуля, а только до определенного предела σ_k , являющегося пределом упругости или пределом текучести, ниже которого релаксация не должна протекать.

Кривые релаксации имеют два отчетливо выраженных участка, первый из которых характеризуется резким падением напряжений в условиях быстро затухающей скоростью релаксации, а второй определяется замедленным падением напряжений с весьма малой скоростью релаксации. На втором участке кривая релаксации асимптотически приближается к некоторой прямой, параллельной оси абсцисс и отстоящей от нее на величину напряжения, при котором практически не происходит релаксации.

Процессу релаксации напряжений в пищевых материалах сопутствует процесс *ползучести*.

Ползучесть – медленное деформирование тела под действием постоянной нагрузки.

Процесс ползучести делится на два этапа: первый – неустановившийся с постепенно затухающей скоростью деформации, второй – установившийся с постоянной скоростью ползучести.

Релаксация напряжений и сопутствующая этому процессу ползучесть являются видами пластической деформации. Протекание процессов пластической деформации в условиях релаксации напряжений приводит к снижению упругих и повышению пластических свойств. В свою очередь рост пластичности ведет к уменьшению энергии, затрачиваемой на формование изделий, при этом качество изделий улучшается.

2. Общие вопросы реометрии

2.1 Методы измерения реологических свойств

Реометрию пищевых материалов можно определить как совокупность приборов и методов для измерения реологических свойств материалов, определения структурных, кинематических и динамических характеристик взаимодействия рабочих органов машин с пищевыми материалами и определения изменений реологических свойств материалов при реализации тепловых, химических и других технологических процессов переработки.

Методы физико-химической механики находят все большее применение в различных областях производства пищевых продуктов. Определение реологических свойств пищевых масс связано с необходимостью постоянного технологического контроля производства. Существенные отклонения реологических свойств от принятых норм могут сказаться не только на снижении качества готовых изделий, но и на снижении производительности оборудования при проведении отдельных технологических процессов. Поэтому, основной задачей реометрии является определение изменений свойств материала, происходящих под влиянием тех или иных факторов.

Совокупность объектов реологических исследований в пищевой промышленности охватывает широкий диапазон агрегатных состояний материалов, начиная от твердых тел и заканчивая маловязкими жидкостями. Это, а также разнообразие целей реологических исследований, требует применения исключительного разнообразия приборов, как по принципу действия, так и по конструктивным особенностям.

По виду измеряемой величины реологические методы делятся на четыре группы (таблица 2.1). 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.

Таблица 2.1

Классификация методов измерения
реологических характеристик

Измеряемая величина	Постоянные величины	Пример прибора
Динамическая (сила, момент, напряжение)	Геометрические, кинематические	Вискозиметр "Reotest"; универсальный прибор ВНИИМПа; сдвигометр Симоняна
Кинематическая (время, скорость)	Динамические, геометрические	Вискозиметры: РВ – 8, Оствальда, Уббелоде, Гепплера
Геометрическая (длина, площадь, объем)	Динамические, кинематические (время)	Пенетрометры (конический пластометр КП – 3 и др.)
Энергия (мощность)	Геометрические, кинематические	Приборы, дающие диаграмму сила – расстояние

Первый метод – метод постоянной скорости сдвига $\dot{\gamma} = \text{const}$ – реализуется обычно путем применения электромеханического или гидравлического привода. При этом сила сопротивления среды измеряется различными динамометрами.

Второй метод – метод постоянной нагрузки $F = \text{const}$ или $M = \text{const}$ – конструктивно значительно проще, так как скорость перемещения или вращения измерительного тела 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. На приборах измеряют глубину погружения в материал индентора специальной формы при уменьшающейся скорости, которая в пределе достигает нуля.

Четвертый метод позволяет по площади диаграммы, получаемой в координатах «сила – перемещение», 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.

По классификации М.П. Воляровича реологические методы исследования и приборы можно разделить на *интегральные*, дающие возможность определять суммарный эффект течения, и на *дифференциальные*, позволяющие непосредственно наблюдать деформацию во времени в каждой точке дисперсной системы при ее течении.

Дифференциальные методы позволяют наблюдать изменение поля напряжений и деформаций во времени при исследовании сложных случаев течения структурированных систем. При этом наблюдения могут вестись визуально, а также с помощью рентгеноскопии, микрокиносъемки и т. д. Дифференциальные методы позволяют получить лишь качественную характеристику исследуемого явления. Например, при исследовании течения вязко-пластичного материала в зазоре между двумя цилиндрами М.П. Волярович с сотрудниками перед исследованием нанесли на поверхность материала алюминиевую пудру. При деформировании (при вращении внутреннего цилиндра) на поверхности материала четко обозначились две зоны: *а)* зона пластического течения; *б)* зона упругого состояния (рис 2.1).

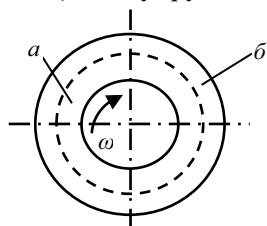


Рис. 2.1. Схема вязко-пластичного деформирования

Интегральные методы позволяют наблюдать суммарный эффект течения. В зависимости от условий исследования при помощи модельного анализа в каждом отдельном случае определяют число независимых характеристик механических свойств изучаемой системы, необходимых для решения поставленной задачи. Наиболее со-

вершенными являются методы капиллярной и ротационной вискозиметрии, внедрения конуса, продольного смещения пластинки, а также шариковые вискозиметры.

2.2 Классификация реометров

При планировании и организации реометрических исследований большое значение имеет классификация приборов и методов исследований. М. Рейнер делит реометры на три типа:

1. Приборы, на которых реализуется однородная деформация. Например, машины для испытания твердых тел на растяжение и сжатие.
2. Приборы ламинарного полу-однородного сдвига, обработка данных на которых вследствие неоднородного поля деформаций требуют интегрирования или дифференцирования эмпирических результатов. Это, например, ротационные и капиллярные вискозиметры.
3. Приборы, на которых реализуется ламинарное течение более сложного вида. Например, вискозиметры с падающим шариком.

Приборы для изучения реологических свойств по их физико-математической обоснованности можно подразделить на *абсолютные, относительные и условные*.

На приборах первой группы получают значения исследуемых характеристик в абсолютных единицах.

При работе на приборах второй группы осуществляют их предварительную тарировку на эталонных материалах, характеристики которых в условиях проведения опыта заведомо известны. В результате экспериментов получают относительные значения, которые с учетом тарировочных графиков легко пересчитываются в абсолютные.

На приборах третьей группы получают некоторые условные величины, характерные для данного прибора. Эти условные характеристики могут быть использованы для сравнения различных масс, а также для изучения влияния на испытуемые материалы технологических и других факторов в процессе производства. Условные показатели имеют лишь качественный характер и не могут быть использованы для расчета машин и оборудования.

Данные, полученные на приборах первых двух групп, являющихся теоретически обоснованными, могут быть применены, как для оценки качества пищевых продуктов, так и для расчета рабочих узлов машин и выбора оптимальных режимов их работы.

Условия, при которых проводятся исследования на производстве, а также используемые методы и приборы определяются поставленной задачей. В соответствии с этим приборы, предназначенные для измерения реологических свойств пищевых материалов, могут быть разделены на четыре группы:

- 1) промышленные приборы, устанавливаемые непосредственно на технологических машинах и регистрирующие свойства масс в потоке;
- 2) лабораторные приборы массового назначения для проведения ускоренного контроля за ходом технологического процесса;
- 3) приборы, позволяющие проводить более углубленные испытания в лабораториях предприятий;
- 4) приборы, предназначенные для исследовательских целей, для измерения некоторых специфических физических свойств материалов.

При выборе метода исследования и приборов для определения реологических свойств какого-либо материала необходимо помнить об условиях, в которых последний находится в перерабатывающих машинах.

В некоторых случаях измерение реологических параметров одного продукта различными методами дает неодинаковые результаты. Это объясняется тем, что каждый метод измерения характеризуется определенными геометрическими, кинематическими и динамическими параметрами прибора и условиями проведения опыта. Указанные параметры и условия обусловлены теоретическими положениями, при разработке которых всегда вводятся определенные допущения. При научно обоснованной методике эксперимента измеряемые величины должны иметь *одинаковые* значения независимо от способов измерения и конструкции прибора.

2.3 Приборы для измерения сдвиговых характеристик

Сдвиговые свойства проявляются при касательном смещении слоев продукта. Приборы для измерения указанных свойств по принципу действия делятся на следующие группы: вискозиметры (с падающим шариком; капиллярные; ротационные); пенетометры; приборы с плоскопараллельным смещением пластин.

2.3.1 Шариковые вискозиметры

Шариковые вискозиметры относятся к неоднородным методам исследования и широко используются при работе с однородными ньютоновскими или слабоструктурированными (неньютоновскими) жидкостями. *Вязкость определяется* по времени прохождения шаром измерительного участка определенной длины. Приборы конструируются по двум основным схемам (рис. 2.2):

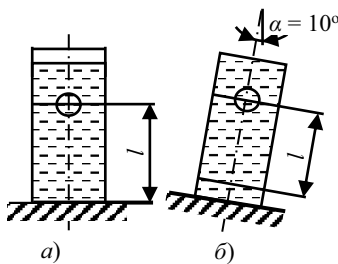


Рис. 2.2. Схемы капиллярных вискозиметров

- а) шар, свободно падающий в вертикальном цилиндре;
- б) шар, катящийся в наклонном цилиндре.

Недостатком схемы а) является то, что при опускании шара в слабоструктурированной жидкости возможно отклонение его от прямолинейного движения, т.е. проявляется так называемое «витание» шара, что может

привести к искажению результатов измерений.

Поэтому более широкое распространение получили вискозиметры с катящимся шаром. Схема такого примера – вискозиметра Гепплера – приведена на рис. 2.3.

Шарик 2 движется в наклонной трубке 1, образуя узкую серповидную щель с ее 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 жидкостей в диапазоне от $3 \cdot 10^{-4}$ до 60 Па·с. Паспортная ошибка измерений ньютоновских жидкостей не превышает 0,5% для лабораторной модели. Прибор не применим для систем, имеющих предельное напряжение сдвига.

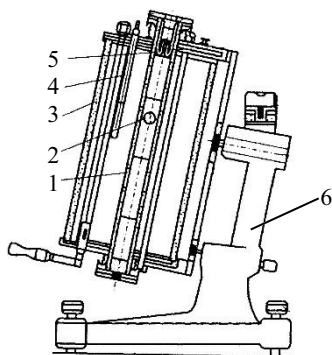


Рис. 2.3. Шариковый вискозиметр Гепплера:

- 1 – прецизионная стеклянная трубка; 2 – шарик;
- 3 – термостат; 4 – термометр;
- 5 – колпачок для отвода избытка жидкости; 6 – подставка

ется в том, что для получения кривой течения необходимо проведение серии измерений с использованием шаров различного диаметра, а при исследовании *тиксотропных* жидкостей возможны большие погрешности из-за неравномерности скорости шара по длине измерительного участка.

Одной из трудностей применения шариковых вискозиметров является то, что при воздействии падающего шара на продукт реологические свойства последнего меняются, вследствие чего результат каждого последующего наблюдения отличается от предыдущего. При строгом выполнении требований ГОСТа об окончании измерения судят по достижению разницы между двумя последующими результатами наблюдений не более 1с. Например, для сгущенного молока это достигается после проведения 10 – 15 наблюдений, что говорит о продолжительности испытания.

В силу указанных недостатков шариковые вискозиметры не нашли широкого применения в пищевой промышленности.

Для вычисления вязкости используют формулу, полученную на основе закона Стокса:

$$\eta = K(\rho_{\text{ш}} - \rho)t, \quad (2.1)$$

где: K – константа прибора, $\text{м}^2/\text{с}^2$;

$\rho_{\text{ш}}$ – плотность материала шарика, $\text{кг}/\text{м}^3$;

ρ – плотность жидкости при температуре измерения, $\text{кг}/\text{м}^3$;

t – время перемещения шарика на участке h , с.

Трудность использования шариковых вискозиметров для реологических исследований структурированных жидкостей, заключа-

2.3.2 Капиллярные вискозиметры

Капиллярные вискозиметры долее универсальны по сравнению с шариковыми и теоретически обоснованны, они дают возможность исследовать аномалию вязкости при различных давлениях истечения, т.е. получать зависимость градиента скорости от напряжения сдвига. Вискозиметры этого типа применяются для измерения вязкостных характеристик материалов, обладающих относительно небольшой вязкостью.

Идея капиллярных вискозиметров заключается в том, что, измеряя расход, перепад давлений, длину и диаметр капилляра, по которому течет материал, можно рассчитать меру сопротивления материала сдвиговому течению, т.е. вязкость. Особенно проста эта задача для ньютоновских жидкостей, ламинарное течение которых в капилляре описывается уравнением Пуазейля:

$$\eta = \frac{\pi R^4 \Delta p}{8 L Q}, \quad (2.2)$$

где: η – коэффициент динамической вязкости, Па·с;

R – радиус капилляра, м;

Δp – перепад давления на длине капилляра, Па;

L – длина капилляра, м;

Q – объемный расход материала через капилляр, кг/м³.

Схема течения жидкости в капилляре вискозиметра представлена на рис. 2.4. Теория капиллярной вискозиметрии основывается на том, что по ток в приборе ламинарный, скольжение на стенке отсутствует, скорость сдвига в точке зависит от нагружения в той же точке.

Попутно следует отметить, что в некоторых случаях возможно проскальзывание, что неоднократно отмечалось многими исследователями. Однако достаточно надежных способов учета этого явления до сих пор не разработано. В опытах на капиллярных вискозиметрах получают зависимость расхода массы Q от перепада давлений Δp . Если опыты проводят на одном капилляре, то напряжение сдвига на стенке капилляра τ , Па, рассчитывают по формуле:

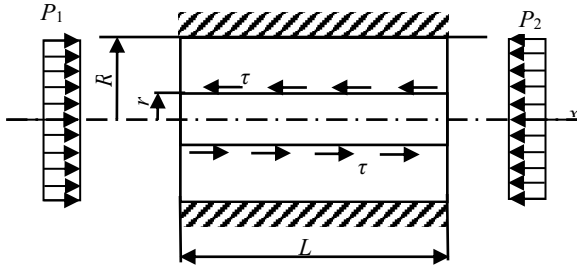


Рис. 2.4. Схема течения в капилляре вискозиметра

$$\tau = \Delta p R / [2(L + nR)], \quad (2.3)$$

где: n – поправка, учитывающая концевые эффекты.

Для исключения влияния концевых эффектов на точность измерений вязкости используется метод двух капилляров одного радиуса, но разной длины. Тогда τ определяют по формуле:

$$\tau = R(p_1 - p_2) / [2(L_2 - L_1)(R_2 - R_1)]. \quad (2.4)$$

Скорость сдвига $\dot{\gamma}$, с^{-1} , (также на стенке капилляра) рассчитывают по формуле:

$$\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_{\text{cp}} (3 + d \lg \dot{\gamma}_{\text{cp}} / d \lg \tau), \quad (2.5)$$

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

Принципиальные схемы капиллярных вискозиметров для ньютоновских и не ньютоновских продуктов показаны на рис. 2.5. 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 используют калиброванные трубки диаметром от долей до 2 – 3 мм для измерения вязкости ньютоновских и не очень вязких неньютоновских жидкостей. Получаемые результаты, как правило, инвариантны, т.е. не зависят от диаметра трубки. Для высоковязких неньютоновских жидкостей и

пластично-вязких систем диаметр «капилляра» может достигать нескольких десятков миллиметров, а результаты измерений часто зависят от его *диаметра*, т.е. не инвариантны. В двух названных случаях диаметр капилляра, конечно, входит в теоретически полученные формулы для соответствующих моделей тел. Однако в случае движения по трубкам пластично-вязких тел модель течения может зависеть от диаметра, т.е. при разных диаметрах один и тот же продукт имеет разные модели течения, что учесть довольно сложно.

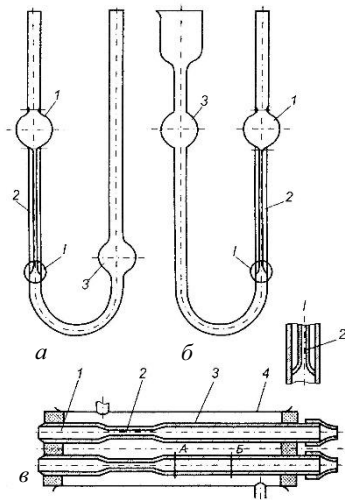


Рис. 2.5. Капиллярные вискозиметры:

- а) Оствальда; б) Уббеллоде;
 в) ВК – 4 с двумя параллельно работающими капиллярами:
 1 – емкость для исследуемой жидкости; 2 – капилляр;
 3 – емкость для сбора жидкости; 4 – водяная рубашка

Наиболее простые, традиционные и вместе с тем универсальные капиллярные вискозиметры Оствальда (рис. 2.5,а) и Уббеллоде (рис. 2.5,б) имеют капилляр 2 и два полых шарика для жидкости 1 и 3. Движущая сила процесса истечения – перепад давлений. В вискозиметре Оствальда она обусловлена разностью высот жидкости, в вискозиметре Уббеллоде – вакуумом или давлением в одном колене трубки. При измерениях приборы обычно помещают в водяную баню, для термостатирования исследуемой жидкости. Термостатирование исследуемой жидкости в приборе занимает 10 – 30 мин, что определяется ее объемом. За это время ее температура достигает температуры жидкости из термостата, т.е. создаются условия, идентичные предыдущему измерению.

При кратковременном термостатировании температурные ошибки дают существенные отклонения от истинных ее значений.

При измерениях вискозиметрами типа Уббеллоде необходимо с одной стороны создавать давление или вакуум. Для этого используют установку (стенд), 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 выровнено. Избыточное давление при течении жидкости по капилляру создает возможность турбулизации потока, поэтому проверку на ламинарность по критерию Рейнольдса следует провести особенно тщательно.

Общими условиями в методике работы на всех приборах являются компоновка стенда и строгая горизонтальная или вертикальная установка прибора; заполнение сухого тщательно промытого прибора исследуемым продуктом и его термостатирование при выбранной температуре; измерение времени истечения определенного объема, которое обусловлено вязкостью и разностью высот или гидростатических давлений. Перед рабочими измерениями прибор тарируют по эталонной жидкости – дистиллированной воде, сахарному раствору или касторовому маслу. У абсолютных приборов, не требующих тарировки, константы определяют по размерам рабочих органов в соответствии с уравнением Пуазейля:

$$pd/(4l) = \eta 8w/d, \quad (2.6)$$

где: p – гидростатическое давление, Па;
 d – внутренний диаметр капилляра, м;
 l – длина капилляра, м;
 η – динамическая вязкость, Па·с;
 w – скорость жидкости, м/с.

Следует иметь ввиду, что геометрические измерения следует проводить с чрезвычайно высокой точностью. Поэтому предпочтительнее капиллярные вискозиметры градуировать по эталонной жидкости.

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

$$\eta = K_T \rho t, \quad (2.7)$$

где: K_T – водная константа прибора при температуре измерения, $\text{м}^2/\text{с}^2$;

ρ – плотность жидкости при температуре заливки, $\text{кг}/\text{м}^3$;

t – время истечения, с.

Вискозиметр Уббелюде 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. Для вычисления вязкости используют формулу:

$$\eta = \eta_v p t / (p_v t_v), \quad (2.8)$$

где индекс «в» относится к данным, полученным при градуировке прибора по воде или какой-либо другой жидкости.

Меняя давление истечения p_v можно построить градуировочные реограммы, которые позволяют вычислить константы для рабочих измерений. Аналогичные графики строят для результатов измерений исследуемой жидкости. Существенное значение имеют графики $p t = f(p)$, которые для каждой температуры в области действия закона Пуазейля дают горизонтальные линии. Когда начинается турбулизация и закон Пуазейля перестает объективно отражать процесс, линии отклоняются вверх. 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 θ_0 .

В заключение отметим условия, необходимые для достижения заданной точности измерений на капиллярных вискозиметрах:

- а) обеспечивать ламинарный режим течения потока;
- б) исключить влияние концевых эффектов, например, при использовании двух капилляров различной длины;

- в) проверять отсутствие эффекта пристенного проскальзывания, например, по совпадению кривых течения в консистентных переменных для капилляров различного диаметра;
- г) при измерении расхода весовым способом нужно помнить, что многие пищевые материалы имеют свойство уплотняться под давлением. Этот вопрос требует специальных исследований материала в условиях всестороннего сжатия.

Капиллярная вискозиметрия в силу своих особенностей имеет весьма ограниченное применение и довольно редко используется в промышленных условиях.

2.3.3 Ротационные вискозиметры

Ротационные вискозиметры широко применяются во многих отраслях пищевой промышленности в технологических лабораториях предприятий, в научно-исследовательских организациях. Вискозиметры служат для контроля качества исходного сырья, полуфабрикатов и готового продукта, а также для контроля технологических процессов.

Идея ротационных вискозиметров заключается в том, что меру сопротивления сдвиговому течению можно определить, измеряя крутящий момент и угловую скорость при относительном вращении, например, коаксиальных (соосных) цилиндров, в зазоре между которыми находится вязкая жидкость. Схема ротационного вискозиметра с коаксиальными цилиндрами изображена на рис. 2.6, где для определенности внутренний цилиндр неподвижен, а наружный вращается с угловой скоростью ω .

В вискозиметрах с вращающимися цилиндрами, в особенности при малом зазоре между ними, характер течения продукта близок к простому сдвигу, что упрощает обработку опытных данных. Диапазон материалов, свойства которых контролируются на ротационных вискозиметрах, достаточно широк: сиропы, молоко, молочные консервы, творожные массы, бражки, кремы, шоколад и конфетные массы при повышенной температуре, фарши и др.

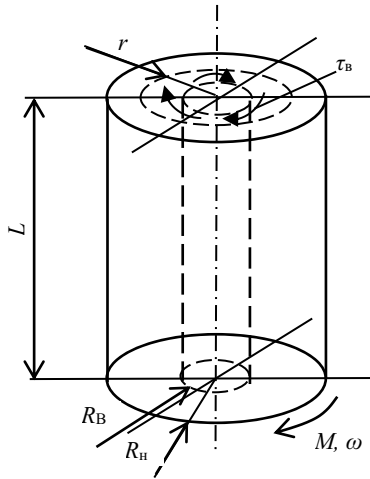


Рис. 2.6. Схема течения в ротационном вискозиметре с коаксиальными цилиндрами

При $\dot{\gamma} = \text{const}$ коэффициент динамической вязкости определяется по формуле Маргулеса:

$$\eta = \frac{M}{\omega} \cdot \frac{R_H^2 - R_B^2}{R_H^2 \cdot R_B^2} \cdot \frac{1}{2\pi L}, \quad (2.9)$$

где: R_B – радиус внутреннего цилиндра, м;

R_H – радиус внешнего цилиндра, м;

M – крутящий момент, приложенный к внешнему цилиндру, об/мин;

ω – угловая скорость наружного цилиндра, рад⁻¹;

L – высота слоя между цилиндрами, м.

При $M = \text{const}$ расчетная формула вискозиметра имеет вид:

$$\dot{\gamma} = \frac{2\omega}{1-\alpha^2}, \quad (2.10)$$

где: α – геометрический симплекс.

$$\alpha = \frac{56 R_{\text{в}}}{R_{\text{н}}} \quad (2.11)$$

Между формулами (2.9 и 2.10) существует следующая связь:

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (2.12)$$

По форме измерительных поверхностей различают ротационные приборы с системами (рис. 2.7): коаксиальные цилиндры, сферы или полусферы; два конуса, две плоскопараллельные пластины, два плоских кольца или два конических кольца; цилиндр – диск; цилиндр – полусфера; конус – диск; цилиндр – конус; цилиндр – конус – диск. Форма воспринимающего органа (ротора) зависит от вида исследуемого материала (ньютоновской или не-ньютоновской) и диапазона измеряемых значений вязкости.

Известны два основных варианта прибора с коаксиальными цилиндрами. Первый из них заключается в следующем: подвижный цилиндр (ротор) приводится во вращение под действием постоянного крутящего момента ($M = \text{const}$). Замеряется угловая скорость цилиндра ω , зависящая от вязкости жидкости (вискозиметр РВ – 8).

При втором варианте прибора: испытуемое вещество помещается в наружный цилиндр, приводимый во вращательное равномерное движение, т.е. при постоянной скорости сдвига ($\dot{\gamma} = \text{const}$), а крутящий момент, переданный через испытуемый материал, замеряется по закручиванию упругого элемента, на котором подвешен этот цилиндр (вискозиметр Куэтта, Мак-Майкея и др.).

Таким образом, в приборах реализуются, соответственно, два метода исследования:

- а) метод постоянства крутящего момента $M = \text{const}$ (рис. 2.8);
- б) метод постоянства скорости деформации $\dot{\gamma} = \text{const}$ (рис. 2.9).

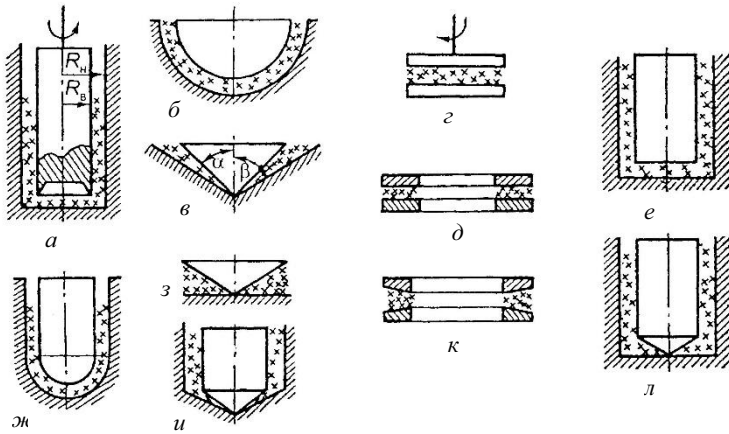


Рис. 2.7. Схемы измерительных поверхностей ротационных вискозиметров: а) коаксиальные цилиндры; б) две полусферы; в) два конуса; г) две плоскопараллельные пластины; д) два плоских кольца; е) два конических кольца; ж) цилиндр – диск; з) цилиндр – полусфера; и) конус – диск; л) цилиндр – конус; л) цилиндр – конус – диск

К основным недостаткам вискозиметров первой группы можно отнести недостаточную точность измерений реологических свойств за счет неточности фиксации частоты вращения ротора и определения высоты соприкосновения продукта с ротором вискозиметра. Работа на этих вискозиметрах трудоемка и требует большого внимания от работника.

К достоинствам вискозиметров второй группы относятся: возможность регулирования частоты вращения ротора в широком диапазоне и автоматическая запись показаний крутящего момента; наличие электромеханического привода; постоянная высота продукта в измерительной части прибора; небольшие относительные ошибки измерения $\pm 3\%$. К недостаткам этих приборов относятся: возможность образования воздушной полости при одевании стакана на ротор; проскальзывание гладкого ротора по продукту при больших скоростях сдвига для грубодисперсных систем.

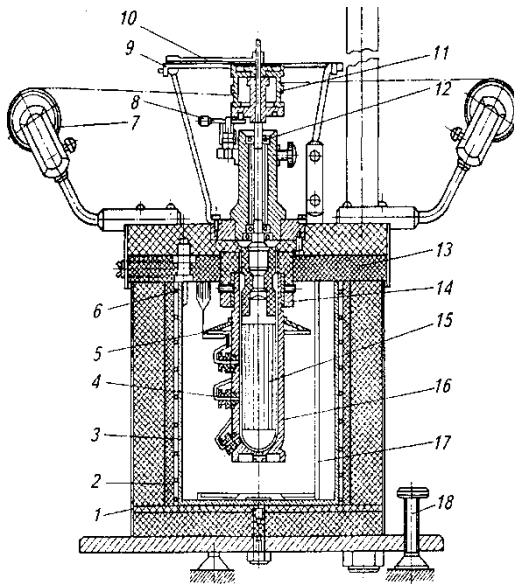


Рис. 2.8. Ротационный вискозиметр РВ-8 – системы Воляровича:
 1 – корпус со станиной; 2 – асбестовый сосуд; 3 – сосуд для термостатирующей жидкости; 4 – термопара; 5 – отражательное кольцо; 6 – нагревательный элемент; 7 – шкив; 8 – тормозное приспособление; 9 – шкала; 10 – стрелка; 11 – барабан; 12 – подшипник; 13 – крышка прибора; 14 – обойма для ротора; 15 – ротор; 16 – стакан; 17 – мешалка; 18 – установочный винт

Очень эффективно сочетание обоих методов при реологических исследованиях. Сочетание методов целесообразно осуществлять так, чтобы вязкоупругие свойства материалов с неразрушенной структурой изучались методом $M = \text{const}$, а процессы разрушения и режим установившегося течения – методом $\dot{\gamma} = \text{const}$.

Методика расчета реологических характеристик имеет специфические особенности для каждой из двух основных областей состояния структуры продукта.

В области неразрушенной структуры определяют модули упругости, наибольшую вязкость и характер развития деформаций. Измерения начинают после тиксотропного восстановления структуры. Величины деформаций отсчитывают по показаниям прибора.

Опыт проводят при усилиях, меньших, чем предельное напряжение сдвига, с интервалом записи деформаций 10 – 20 с.

При переходе к области лавинного разрушения структуры по кривой течения определяют статическое τ_c и динамическое θ_0 предельное напряжения сдвига, пластическую вязкость $\eta_{пл}$ и зависимость эффективной вязкости $\eta_{эф}$ от градиента скорости $\dot{\gamma}$ или напряжения сдвига τ . Обсчет результатов проводят по равновесной кривой течения, проходящей через все точки. Вращение ротора вызывает появление внутренних напряжений в продукте, который находится между ротором и стаканом. Эти касательные напряжения пропорциональны сдвигающим усилиям, поэтому графическую и математическую обработку опытов можно проводить в консистентных переменных $\dot{\epsilon}(\tau)$, или пользуясь первичными зависимостями, полученными непосредственно из опыта.

Наиболее распространенным ротационным вискозиметром, работающим с использованием метода $\dot{\gamma} = \text{const}$, является вискозиметр «Reotest» (Германия) и его модификации. Помимо основного набора цилиндрических измерительных элементов, этот прибор снабжен устройством типа конус – плоскость, предназначенным для измерения вязкости при повышенных скоростях сдвига для средне- и высоковязких продуктов. Угол между плоскостью и образующей конуса составляет $0,3^\circ$. Прибор позволяет измерять скорость сдвига $\dot{\gamma}$ от 0,56 до 4860 с^{-1} , напряжение сдвига τ – от 40 до $2,2 \cdot 10^5 \text{ Па}$. Величина измеряемой вязкости η находится в пределах от 8 до $40 \cdot 10^7 \text{ МПа}\cdot\text{с}$.

Вискозиметр «Reotest – 2» представлен на рис. 2.9. Внутри станины 1 прибора установлен синхронный электродвигатель, соединенный с 12-ступенчатой коробкой передач, которая позволяет изменять частоту вращения внутреннего цилиндра 4 от 0 до 1500 с^{-1} . Крутящий момент от коробки передач передается ведущему валу и далее через спиральную пружину 2 – ведомому валу 3, соединенному с внутренним цилиндром 4 муфтой. Наружный цилиндр 5 крепится к корпусу вискозиметра специальным зажимом. В приборе имеется термостатирующий сосуд. Величина крутящего момента отсчитывается по шкале прибора, а скорость сдвига – по указателю 8. Измеритель моментов торсионного типа с омическими датчиками работает на принципе превращения ме-

ханических усилий в электрические импульсы. Показания прибора 8 прямо пропорциональны крутящему моменту, а также напряжению сдвига и вязкости исследуемого материала. Скорость вращения синхронного электродвигателя и, следовательно, внутреннего цилиндра 4, зависит от частоты тока в сети. Отклонения от нормальной частоты 50 Гц фиксируется и учитывается специальным расчетным коэффициентом.

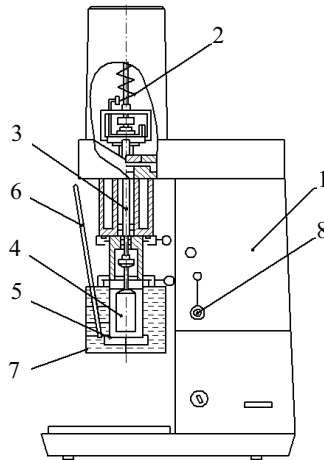


Рис. 2.9. Измерительный блок ротационного вискозиметра Reotest – 2:

1 – станина; 2 – динамометр; 3 – приводной вал; 4 – измерительный цилиндр (внутренний); 5 – измерительная емкость (наружный цилиндр); 6 – термометр; 7 – термостатирующая емкость; 8 – рычаг переключения коробки передач

Пределы измерения вязкости: от 10^{-2} до $104 \text{ Па} \cdot \text{с}$; скорости сдвига: от $0,1667$ до $1,458 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$; напряжения сдвига: от 12 до $3 \cdot 10^3 \text{ Па}$; температуры: от -30 до $150 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Погрешность измерений $\pm 3\%$ (по отношению к ньютоновским жидкостям).

При кажущейся простоте в ротационной вискозиметрии существует ряд проблем. Это, прежде всего, различные эффекты, снижающие точность измерений, а именно:

1. *Турбулизация потока.* Одним из условий точности измерений в ротационных приборах является ламинарность де-

формируемого потока, которая характеризуется числом Рейнольдса (Re), которое представляет собой безразмерный критерий, превышение которого вызывает турбулизацию потока.

2. *Тепловые эффекты.* Сам принцип ротационной вискозиметрии подразумевает совершение работы над материалом, находящимся в зазоре прибора. Это приводит к выделению тепла и изменению температуры измеряемой среды, что в свою очередь вызывает изменение вязкости. Решению этой проблемы посвящено большое количество работ, суть которых сводится к введению поправочных коэффициентов.

3. *Эффект Вейссенберга.* К. Вейссенбергом было обнаружено, что при течении упругих жидкостей в условиях простого сдвига возникают не только *касательные*, но и *нормальные* напряжения, ортогональные направлению сдвига. Упругая жидкость, деформационное состояние которой характеризуется осевой симметрией, стягивается нормальными напряжениями, противодействующими силам тяжести и центробежным силам и выдавливается из зазора вискозиметра.

4. *Явление эластической турбулентности* при движении упругих жидкостей. При течении упругих жидкостей в капиллярах с высокими скоростями было обнаружено, что, струя жидкости начинает деформироваться и на ней появляются различные возмущения. А при очень высоких скоростях деформации струя материала иногда даже распадается на отдельные зерна. Несмотря на то, что явление было обнаружено в капиллярных вискозиметрах, оно может наблюдаться и при работе ротационного вискозиметра. При этом могут наблюдаться спонтанные колебания измеряемого параметра.

5. *Концевые эффекты.* При работе ротационных вискозиметров крутящий момент передается на измерительный элемент не только через боковые (рабочие) поверхности, но и от днищ цилиндров. Поскольку математическое описание полей напряжений и скоростей сдвига, возникающих в зазорах, образованных днищами цилиндров, очень сложно, то расчетные формулы для ротационных приборов выводятся без учета влияния концевых эффектов, что вносит определенные погрешности в измерения.

Величины реологических характеристик, получаемых с помощью ротационных вискозиметров, могут иметь значительные колебания из-за неправильного выбора зазора между измерительными цилиндрами. Для получения более точных результатов измерений рабочий зазор между измерительными цилиндрами должен быть минимальным, с учетом дисперсности измеряемого продукта. В этом случае поле скоростей деформаций и напряжений должно приближаться к однородному. Однако с уменьшением зазора между измерительными поверхностями до определенного предела (более двух максимальных частиц дисперсной фазы продукта), особенно продукты с высокой консистенцией, трудно заполнить узкий рабочий зазор вискозиметра.

2.3.4 Конические пластометры

Предельное напряжение сдвига, по сравнению с пластической и эффективной вязкостью, наиболее чувствительно к изменению технологических (влажность, жирность, температура, продолжительность процесса и др.) и механических (степень измельчения, давление, вибрация и др.) факторов. Поэтому предельное напряжение сдвига можно использовать для оценки важной качественной характеристики продукта – консистенции. Для измерения предельного напряжения сдвига наиболее перспективными являются приборы, принцип которых основан на методе внедрения тела определенной формы и размера в исследуемый продукт.

Пенетрацией называется метод измерения структурно-механических характеристик полутвердых и твердых продуктов путем определения сопротивления продуктов проникновению в них за определенное время инденторов (конус, шар, игла, цилиндр) имеющих строго определенные размер, массу и материал. Приборы, работающие по такому принципу называются пенетрометрами. По измеряемым и фиксируемым величинам они подразделяются на три группы:

- а) с постоянным усилием пенетрации F (при этом определяется глубина пенетрации h);
- б) с постоянной глубиной погружения h (измеряется усилие F);

в) с постоянной скоростью погружения (регистрируется усилие в зависимости от глубины погружений).

Идея конических пластометров заключается в том, что по величине глубины погружения конуса в материал под воздействием вертикальной силы можно определить предельное напряжение сдвига материала (рис. 2.10).

Формула П.А. Ребиндера для определения предельного напряжения сдвига имеет вид:

$$\tau_0 = K_\alpha \frac{F}{h^2}, \quad (2.13)$$

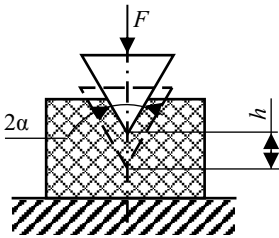


Рис. 2.10. Схема внедрения конуса

где: K_α – геометрическая константа конуса, зависящая от угла α при его вершине;

F – величина вертикальной внедряющей силы, Н;

h – глубина погружения конуса, м.

Константа конуса рассчитывается по формуле, также предложенной П.А. Ребиндером:

$$K_\alpha = \frac{g}{\pi} \cos^2 \left(\frac{\alpha}{2} \right) \operatorname{ctg} \frac{\alpha}{2}. \quad (2.14)$$

Следует отметить, что расчет τ_0 с использованием коэффициента K_α из формулы (2.18) не всегда дает одинаковые результаты при применении конусов с различными углами 2α при их вершине, т.е. результаты измерений не инвариантны по отношению к геометрии конусов. Рядом авторов предложены другие формулы для K_α и поправочные коэффициенты к ним, которые в определенной степени позволяют уменьшить влияние угла 2α при вершине конуса.

Одним из первых серийных приборов этой группы был конический пластометр М.П. Воляровича КП-3, схема которого представлена на рис. 2.11. Исследуемая масса помещается в емкость 6 на подъемный столик, вершина конуса 7 приводится в со-

прикосновение с поверхностью массы. Конус нагружается гирями, и с помощью индикатора 10 определяется глубина погружения конуса до полной его остановки.

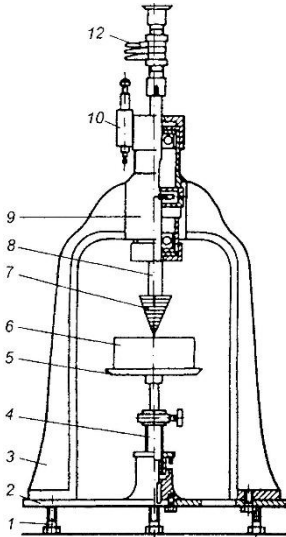


Рис. 2.11. Конический
пластометр: КП-3:

- 1 – установочные винты; 2 – основание;
- 3 – станина; 4 – винт подъема столика;
- 5 – столик; 6 – емкость для продукта;
- 7 – конус; 8 – штанга; 9 – обойма с под-
- шипниками; 10 – индикатор;
- 11 – подшипники; 12 – установочные по-
- перечные штанги

дуктивности, тензодатчиков и т.п.

Используемые для измерения конусы бывают гладкими, но применение рифленых конусов значительно уменьшает разброс экспериментальных данных.

Это повысило точность определения структурно-механических характеристик, но при этом диапазон измерений у всех конструкций остается довольно-таки узким, что не отвечает современным требованиям для проведения полномасштабного контроля пищевых продуктов.

У существующих конструкций пластометров имеется ряд общих недостатков, присущих, как всем приборам в общем, так и некоторым приборам в отдельности. К этим недостаткам можно отнести следующее: недостаточная точность измерений

структурно-механических свойств продуктов, вследствие ручной подачи индентора к поверхности материала, нагружение с помощью гирь и погрешности в определении глубины погружения конуса. При дальнейшем усовершенствовании конструкций пластометров перешли к способу нагружения конуса механическим способом, что облегчило проведение исследований. Глубину погружения предложено было определять с помощью датчиков ин-

2.3.5 Приборы с плоскопараллельным смещением пластин

Приборы с плоскопараллельным смещением пластин служат для измерения сдвиговых характеристик в области небольшого разрушения структуры материала при малых величинах деформаций. Приборы различных конструкций для исследования реологических свойств (вязкости, упругости, периода релаксации и т.п.) были предложены П.А. Ребиндером, Д.М. Толстым, Б.А. Николаевым.

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

В приборах плоскопараллельный зазор может быть расположен вертикально, горизонтально или наклонно. На рис. 2.12 изображен прибор С.Я. Вейлера и П.А. Ребиндера с вертикальным расположением зазора. Кювета 2 с исследуемым веществом установлена неподвижно, в нее помещается пластинка 1, приводимая в движение грузом 5. Между пластиной и нитью установлена микрошкала 4, по которой с помощью микроскопа 3 измеряют деформацию. Время отсчитывают по секундомеру.

Напряжение сдвига τ вычисляют по деформации пружины, соответствующей этой деформации нагрузке F и по площади боковых поверхностей пластины:

$$\tau = F / (2A). \quad (2.15)$$

Предельное напряжение сдвига θ_0 определяют по наибольшей нагрузке $F_{\max}$, при которой происходит сдвиг пластин:

$$\tau_0 = F_{\max} / (2A). \quad (2.16)$$

Пластометр с горизонтально расположенными пластинами Д.М. Толстого (рис. 2.13) служит для нахождения констант упруго-пластично-вязких свойств масс с практически неразрушенными структурами.

Модуль быстрой эластической деформации сдвига G_1 , модуль мгновенной эластической деформации G_2 , наибольшую пластическую вязкость η'_0 определяют по формулам:

$$G_1 = \tau \cdot h / \Delta h_0; \quad G_2 = \tau \cdot h / (\Delta h_m - \Delta h_0); \quad \eta'_0 = (\tau - \tau_T) / \dot{\gamma}, \quad (2.17)$$

где: τ – напряжение сдвига, Па;

h – толщина слоя продукта, м;

Δh_0 – начальная (условно-мгновенная) деформация, м;

Δh_m – эластическая деформация, м.

Также вычисляют условное статическое предельное напряжение сдвига $\tau_{0\text{ст}}$ по формуле (2.16).

Основными деталями пластометра (рис. 2.13) являются пластины 5, между которыми помещается образец продукта 6. Плоскости пластин имеют рифление, направленное в сторону, противоположную направлению усилий, деформирующих продукт.

Приборы этого типа имеют ряд существенных недостатков, серьезно ограничивающих их применение. К *недостаткам* можно отнести: сложность конструкции; низкое быстродействие; необходимость проведения предварительных расчетов величины зазора для конкретного материала, что значительно ограничивает применимость таких приборов для пищевой промышленности, т.к. пищевые материалы, как правило, изменяют свои реологические свойства в зависимости от многих технологических, физических и химических факторов; сложность удаления частиц исследуемого материала из рабочего зазора, а также трудности обеспечения заданной температуры.

Указанные недостатки значительно ограничивают область применения приборов этого класса. Также их применение ограничивается отсутствием серийного изготовления.

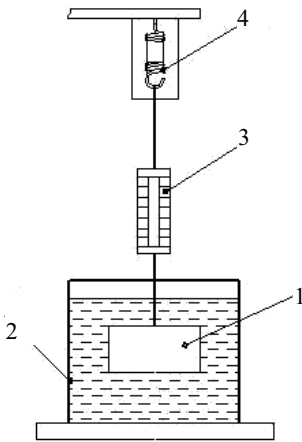


Рис. 2.12. Прибор Вейлера и Ребиндера:
1 – пластина; 2 – кювета;
3 – микрошкала; 4 – пружина

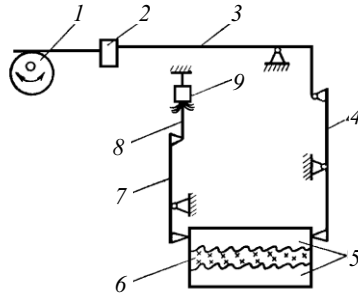


Рис. 2.13. Прибор
Д.М. Толстого:
1 – эксцентрик; 2 – гиря;
3 – неравноплечий рычаг;
4 – равноплечий рычаг;
5 – пластины; 6 – испытуемый
образец; 7 – рычаг; 8 – балочка;
9 – тензорезисторы

2.4 Приборы для измерения поверхностных свойств

Поверхностные свойства пищевых продуктов – адгезия и внешнее трение – проявляются на границе раздела между продуктом и твердой стенкой. Они имеют существенное значение в разнообразных технологических процессах, где возможен контакт между продуктом и стенкой обрабатывающей машины.

2.4.1. Приборы для измерения адгезии

Качественно адгезию можно охарактеризовать двумя способами: нарушением контакта одновременно на всех участках площади (рис. 2.14, а, з, д) или путем последовательного отрыва отдельных участков – расслаиванием, отдираанием (рис. 2.14, б, в), оба способа нашли практическое применение. При первом методе разрушающую нагрузку прилагают в направлении как перпендикулярном к плоскости контакта, так и параллельном ей и обычно относят к площади поверхности контакта. При втором

методе определяют силу, необходимую для расслаивания склейки, ее относят к единице длины.

Наиболее часто в адгезиометрах для пищевых продуктов реализуется схема по рис. 2.14,а. Она может отличаться способами приложения силы и регистрации отрывающего усилия.

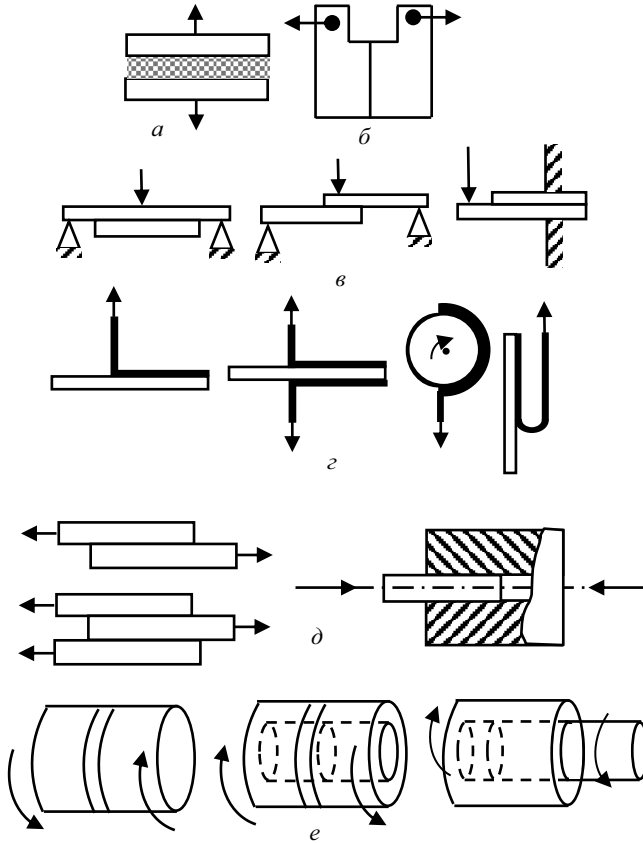


Рис. 2.14. Принципиальные схемы приборов для измерения адгезионной прочности:

а) равномерный отрыв; б) внецентренное растяжение; в) изгиб листовых материалов; г) способы расслаивания материалов; д) способы сдвигового разрушения; е) способы сдвигового разрушения при кручении

Например, в приборе Николаева «мгновенно» отрывается верхний диск с помощью рычажного механизма; в приборе Кульмана постепенно отрывается нижний диск при наполнении подвешенной к нему емкости водой. Разделение контактирующих тел может происходить по трем вариантам: адгезионное – по границе раздела продукт – стенка, когезионное – по слою продукта – и смешанное.

Приборы для измерения адгезии должны удовлетворять следующим требованиям:

- 1) не требовать предварительной тарировки на эталонном материале и выражаться в абсолютных единицах;
- 2) обеспечивать изменение усилия и длительности предварительного контакта в широком диапазоне;
- 3) иметь набор пластин разной площади и шаблон для нанесения продукта заданной толщины на пластину;
- 4) позволять легко заменять материал пластин и степень его механической обработки;
- 5) допускать варьирование скорости приложения силы отрыва или сдвига в широком диапазоне.

2.4.2. Приборы для измерения внешнего трения

Коэффициент внешнего трения для машиностроительных материалов изучен довольно подробно как экспериментально, так и теоретически. При этом для объяснения трения металлов и высокоэластичных полимеров используют молекулярно-кинетическую теорию.

Классический тип прибора для измерения силы внешнего трения представляет собой пару тел, соприкасающихся плоскими поверхностями, площадь которых может быть от долей квадратных миллиметров до десятков квадратных миллиметров. При этом одно из тел смещается относительно другого. Сила смещения (трения) измеряется тензометрическими, динамометрическими или какими-либо другими датчиками. Для малых скоростей трения реализуется прямолинейное смещение поверхности. И.В. Крагельский распределил известные *методы* определения коэффициента трения на *четыре группы*, положив в основу геометрический и кинематический принципы (рис 2.15).

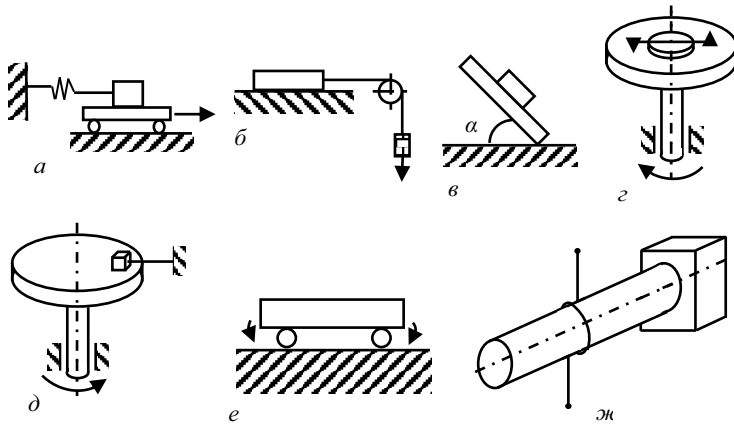


Рис. 2.15. Методы измерения внешнего трения

К *первой группе* методов относятся такие, в которых одна плоскость поступательно перемещается относительно другой плоскости (рис. 2.15, *а, б, в*). По схеме *а* продукт перемещается по движущейся исследуемой поверхности, при этом сила трения измеряется динамометром любого типа. Таким, наиболее распространенным методом, определяют трение твердообразных продуктов: сухарей, хлеба, зерна и т.п. По схеме *б* продукт перемещается с помощью груза по исследуемой неподвижной поверхности. Сила трения в этом случае равна минимальной массе груза, необходимой для равномерного перемещения продукта. Этим методом определяют коэффициент трения таких твердых продуктов, как сыр, кондитерские изделия. По схеме *в* продукт скользит по наклонной поверхности. Коэффициент трения определяют по минимальному углу наклона α поверхности исследуемого конструкционного материала, по которому скользит пищевой продукт. Такой метод позволил определить статический коэффициент трения сыра, сухарей, сыпучих продуктов. Определение коэффициента трения по углу наклона плоскости, при котором начинается движение продукта по поверхности, недостаточно точно, так как угол наклона плоскости в момент движения определяют приблизительно, к тому же невозможно установить изменение коэффициента трения с изменением скорости скольжения.

Ко *второй группе* относятся такие методы, при которых одна из фрикционных пар совершает вращательное движение. По схеме *г* определяют коэффициент трения кондитерских масс. Продукт лежит на вращающемся диске, исследуемый конструкционный материал скользит по вращающемуся продукту. Сила трения определяется по крутящему моменту, передаваемому от диска образцу. По схеме *д* продукт, закрепленный на упругой балке, скользит по вращающейся поверхности исследуемого материала. Этим методом определяют коэффициент трения мяса, рыбы, таблеток кофе и чая, сухарных плит, формового хлеба.

К *третьей группе* относятся методы, в которых образующая цилиндра соприкасается с плоскостью. Схема *е* – балка, совершающая колебательные движения на двух вращающихся навстречу друг другу роликах.

К *четвертой группе* относятся методы, в которых одна цилиндрическая или плоская гибкая поверхность перемещается по цилиндрической поверхности (схема *ж*).

При этом изменение давления допускают методы, изображенные на всех схемах, кроме *ж*; изменение размера поверхности – методы *а* – *д*; изменение скорости скольжения допускают все методы, кроме *в*.

На внешнее трение влияют те же факторы, что и на адгезию. Следовательно, статическое трение должно быть больше динамического. При первоначальном сдвиге часть усилия расходуется на выход частиц или молекул одного тела из неровностей или молекулярных ям другого, остальное – на разрыв молекулярных и других контактов, которые во время движения не успевают полностью восстанавливаться. Достаточно малая скорость относительного движения трущихся тел может вызывать скачки, т.е. прерывистость движения: тело переходит из одного статического положения в другое, где вновь образуются контакты с поверхностью скольжения. При больших скоростях скольжения и неизменном состоянии поверхности скольжения подобные эффекты обычно не наблюдаются.

2.5 Приборы для измерения компрессионных характеристик

Объемное и осевое сжатие, а также осевое растяжение являются основными типами механической деформации продуктов. В ряде машин (прессов, волчков, дозаторов, шприцев и пр.) продукты находятся при повышенных давлениях, что изменяет их первоначальный объем и плотность. На выходе из машины объем и плотность также могут отличаться от первоначальных. Эти изменения определяют, основываясь на компрессионных характеристиках.

Основные методы измерения этих характеристик показаны на рис. 2.16. Сжатие продукта между пластинами (рис. 2.16,а) используют также для оценки консистенции продукта. При испытании на растяжение (рис. 2.16,б) для надежного крепления концов образца предложено замораживание их в жидком азоте. При сжатии

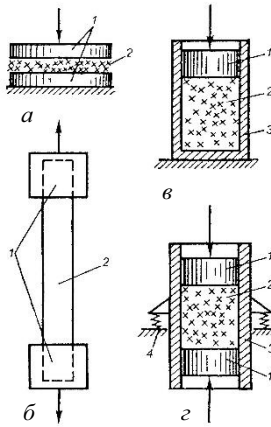


Рис. 2.16. Схемы измерения компрессионных характеристик:

- а) осевое сжатие: 1 – зажимы; 2 – продукт;
- б) осевое растяжение: 1 – зажимы;
- 2 – продукт; в, г) одностороннее и объемное сжатие: 1 – поршень; 2 – продукт;
- 3 – цилиндр; 4 – пружинные подвесы

продукта в цилиндре поршнем (рис. 2.16,в) появляются распорные усилия, в результате чего давление и плотность по высоте цилиндра изменяются. Двустороннее сжатие продукта (рис. 2.16,г) может происходить от двух подвижных поршней или от одного неподвижного и одного подвижного, когда цилиндр свободно подвешен, например на пружинах.

Методика измерения практически одинакова для всех приборов. Конструктивные схемы различаются по способу привода пластины: снизу

и сверху, от электродвигателя или непосредственно от груза.

Прибор для следования материалов на растяжение (рис. 2.17) состоит из ванны 1, в которую наливается раствор 2. Концы плавающего по поверхности образца 4 закрепляют в зажимах 3, один из которых неподвижен. Измерительная часть представляет собой линейку 9, закрепленную на направляющей. Нагружающий механизм состоит из стержня 7, грузов 11, нити 10 роликов 5 и 8, кронштейнов 6. Концентрация солевого или сахарного раствора подбирается такой, чтобы образец (например, тесто) свободно плавал по поверхности. Прибор предназначен для научно-исследовательских целей.

Приборы для измерения деформации при сжатии применяются для определения упруго-пластичных свойств.

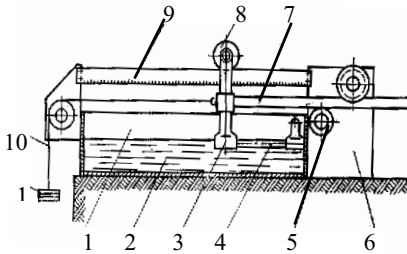


Рис. 2.17. Прибор для испытания образцов на растяжение:

- 1 – ванна; 2 – раствор; 3 – зажим;
- 4 – образец; 5 – ролик;
- 6 – кронштейн; 7 – стержень;
- 8 – ролик; 9 – измерительная шкала; 10 – нить; 11 – груз

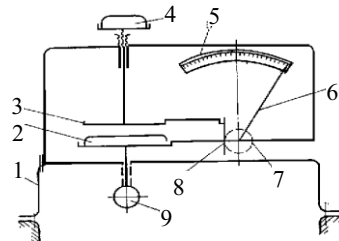


Рис. 2.18. Прибор для испытания на сжатие:

- 1 – станина; 2, 3 – диски;
- 4 – груз; 5 – шкала; 6 – стрелка;
- 7 – шестерня; 8 – рейка;
- 9 – эксцентрик

Прибор Б.А. Николаева и А.С. Шпигельгласа для измерения деформаций одноосного сжатия между параллельными плоскостями (рис. 2.18) состоит из станины 1, в которой перемещается опорная стойка столика. Испытуемый материал помещается между параллельными плоскостями дисков 2 и 3. Верхний из них может перемещаться под действием груза 4, в то же время он связан с рейкой 8, входящей в зацепление с шестерней 7, на оси которой закреплена стрелка 6, показывающая деформации по шкале 5. Нижний диск 2 имеет возможность перемещаться в вертикальной плоскости при помощи эксцентрика 9. На описанном

приборе можно определить мгновенную упругую деформацию, модуль упругого сжатия, а также вязкость и предельное напряжение сдвига.

2.6 Измерение реологических свойств в процессе переработки и готовой продукции молочной промышленности

Непрерывный контроль какого-либо параметра в любом технологическом процессе намного точнее и объективнее отражает ход этого процесса, его скорость, направленность и т.д., чем дискретный лабораторный контроль этих же параметров на входе, выходе и промежуточных фазах. Особенно актуально это для реологических свойств материалов в пищевой отрасли, где перерабатываемые материалы в процессе обработки нередко кардинально меняют свою структуру, химический состав и т.д. Как правило, изменение реологических свойств находятся в жесткой связи с химическими, структурными или иными преобразованиями перерабатываемого материала, что дает возможность судить о начале, окончании, скорости и направленности этих преобразований и самого процесса.

Все выше перечисленное делает непрерывный контроль реологических параметров особо значимым для пищевой отрасли. Поэтому разработка приборов для непрерывного реологического контроля является актуальной проблемой. Эти приборы можно разделить на два типа: *первые* – устанавливаются в трубопроводах и служат для измерения свойств в потоке; *вторые* – устанавливаются непосредственно в рабочей ванне, на машине или на аппарате и следят за изменением реологических характеристик в процессе переработки пищевых материалов.

Приборы первого типа служат для контроля подаваемых в переработку материалов по трубопроводам или материалов, выходящих из рабочей машины. С их помощью можно регулировать только свойства подаваемых материалов, они не позволяют следить непосредственно за прохождением процесса переработки, а только отслеживать его конечный результат. Для этой задачи используются приборы второго типа. Рассмотрим некоторые из конструкций приборов, предназначенных для контроля

процессов переработки.

Консистометр «Элгеп» (рис. 2.19) предназначен для контроля консистенции молочного сгустка непосредственно в ванне. Принцип его работы состоит в вытягивании индентора через свертываемое молоко. В молочную смесь опускают почти до дна ванны индентор 8, выполненный в виде крестовины с тремя кольцами. Нить 7 перекидывают через блок силоизмерительного устройства. Затем совмещают подвижный указатель 3 с нулевым делением шкалы 5 и с помощью ручки 4 устанавливают прорезь на диске против того деления шкалы, которое соответствует желаемой консистенции сгустка. После включения прибора тумблером 1 начинает работать электродвигатель, соединенный с барабаном 6, на который наматывается нить. При этом индентор начинает подниматься, разрезая сгусток.

В процессе свертывания плотность сгустка нарастает, увеличивается сопротивление движению индентора. При достижении заданной консистенции сгустка (при совмещении прорези на диске с уровнем указателя) автоматически зажигается красная лампочка 2 и включается звуковой сигнал. Недостатком устройства является то, что свертываемая смесь налипает на диск, что приводит к искажению результатов измерений готовности сгустка.

Еще одной конструкцией, работающей по такому же принципу является автоматический пластометр ЛТИХПа, схема которого представлена на рис. 2.20. Принцип действия прибора основан на определении напряжений тангенциального сдвига, возникающих при смещении пластины 3 под действием электромагнитного поля, создаваемого катушкой 2, в контролируемой среде. Контроль осуществляется без отбора проб при погружении герметичного измерительного преобразователя непосредственно в резервуар со средой. Для регистрации глубины погружения служит датчик 1. Однако на рифления пластины 3, выполненные для предотвращения ее проскальзывания относительно материала, во время измерений налипает материал, что незамедлительно сказывается на результатах измерений.

Переносной эластомер (рис. 2.21) предназначен для опре-

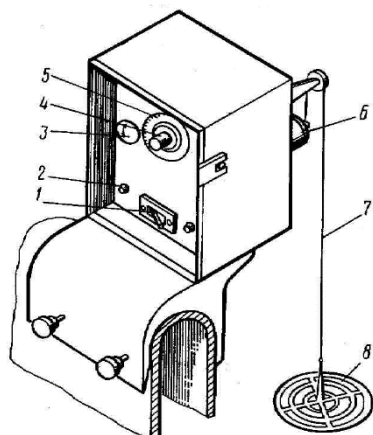


Рис. 2.19. Консистометр
«Элгеп»

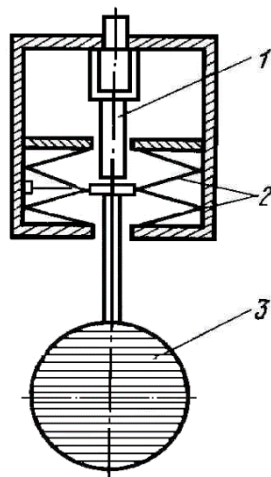


Рис. 2.20.
Пластометр ЛТИХПа

деления готовности сгустка к резке. Он состоит из измерительного блока 2, индентора 6 с ребрами вдоль образующей и динамометрического устройства 5. эластомер закрепляется в верхней части корпуса ванны при помощи кронштейна 7 и винтового зажима 1. После внесения сычужного фермента в молочную смесь опускают измерительный цилиндр. Сопротивление перемещению последнего, которое по мере упрочнения структуры сгустка растет, отмечается лимбом 4. С помощью установочного диска 3 эластомер настраивается на определенную величину сопротивления, при достижении которой прибор подает звуковой сигнал, извещающий о готовности сгустка к резке. Это позволяет производить резку сгустка при заданных структурно-механических свойствах, дает объективную оценку свойств сгустка перед резкой, сокращает потери жира и сухих веществ в сыворотку.

Недостатком этого прибора является то, что при колебаниях биохимического состава сырья будут меняться и структурно-механические характеристики сгустка, а это может привести к значительной ошибке в определении момента готовности сгустка к резке.

В лаборатории «Сопротивления материалов» КемТИППа

разработан ротационный датчик «Сгусток – Р1», в котором устранены недостатки предыдущих конструкций. Схема прибора «Сгусток – Р1» показана на рис. 2.22.

Прибор состоит из основания 1, в подшипниках 2 которого установлен измерительный валик 3. Снизу к валику замком 4 крепится рифленый измерительный цилиндр 5, а сверху валик 3 соединен соосно с валом синхронного электродвигателя 6, на верхнем торце которого установлена стойка 7, управляющая резистором 8, установленным на раме 9, прикрепленной к основанию 1. Пружина силоизмерителя 10 нижним концом закреплена на электродвигателе 6, а верхним – к раме 9. Прибор имеет также кожух 11. Измерение угла закручивания цилиндра осуществляется прецизионным резистивным датчиком, выходной сигнал которого подается на блок обработки и индикации.

Благодаря тому, что этот прибор имеет лишь одну фиксированную скорость вращения выходного вала и один силоизмеритель, упрощается его конструкция и уменьшаются габариты. Однако, как и у предыдущего датчика, у этого имеются такие же недостатки как: налипание исследуемого материала на рабочий орган и частичное разрушение продукта в месте его работы.

Все перечисленные выше приборы используют методы «разрушающего» контроля, что является их общим, довольно существенным недостатком.

Известна конструкция датчика для непрерывного контроля процесса свертывания молока, работающего по методу «неразрушающего» контроля. Мембранный прибор для определения готовности сгустка к резке (рис. 2.23) работает на принципе деформации мембран под влиянием повышенного давления. Прибор состоит из двух капсул 3 и 4, на внутренней поверхности которых поставлены гофрированные мембраны. Они полностью погружаются в емкость с молоком. С помощью насоса 2 задается циклически (2 раза в минуту) повышенное давление в капсулу 3, которое ведет к деформации мембран, и это воздействие передается на свертываемый продукт. Пока смесь не свернулась, эта деформация мембран почти не передается на приемную капсулу 4. Приемная капсула связана с приемным устройством, состоящим из камеры давления и трансформаторного датчика 1 с линейной дифференциальной характеристикой. При свертывании молока и

увеличении плотности сгустка пульсации мембран приемной капсулы увеличиваются. Недостатком данного прибора является сложность конструкции.

Для устранения главного недостатка последней конструкции в лаборатории КемТИППа был изготовлен реометра для непрерывного контроля процесса свертывания молока, также работающий по методу «неразрушающего» контроля (рис. 2.24). Реометр состоит из корпуса 1, в котором смонтированы нагружающее и измерительное устройства. В нижней части корпуса 1 в центральной втулке 2 перемещается шток 3, соединенный с нагружающим диском 4. Диск-отражатель 5 крепится к пластине 6, жестко связанной с центральной втулкой 2. Измерительная часть прибора погружается в ванну с продуктом и непрерывно отслеживает процесс структурообразования при свертывании молока, при этом нарушения структуры продукта не происходит из-за малых перемещений нагружающего диска 4.

Помимо непрерывного контроля за процессами, происходящими при переработке того или иного продукта, имеется необходимость исследования материалов в лабораторных условиях. Это позволяет при разработке новых продуктов еще до запуска их в производство, знать, как отразится на его свойствах изменение того или иного технологического параметра, подобрать наиболее рациональные режимы переработки и хранения.

В пищевой промышленности очень эффективными являются портативные приборы, позволяющие не только контролировать конечный продукт, но и проводить исследования его структурно-механических свойств в лабораторных условиях. К таким приборам относятся портативные сдвигометры. Экспериментальным машиностроительным заводом ВНИИМСа изготавливается портативный прибор Табачникова для контроля консистенции сыра (рис. 2.25), основными элементами которого являются специальный съемный пробоотборник и присоединенный к нему динамометр вращательного движения. Пробоотборник выполнен с продольными рифлениями вдоль наружной поверхности, которые предотвращают его проскальзывание относительно сыра.

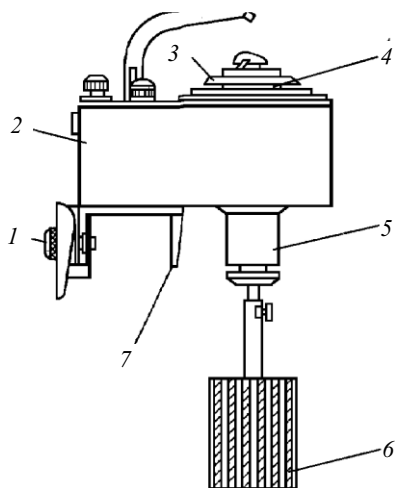


Рис. 2.21.
Переносной
эластомер

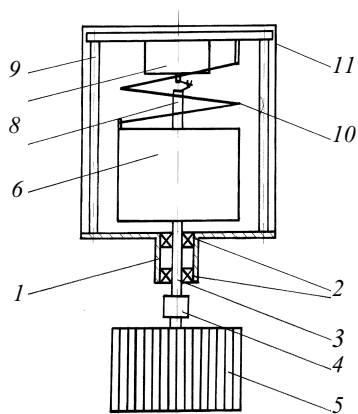


Рис. 2.22.
«Сгусток - Р1»

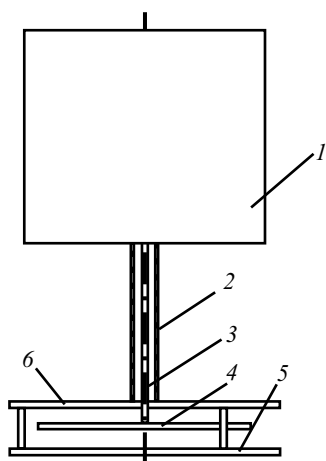


Рис. 2.23. Сгусток-2

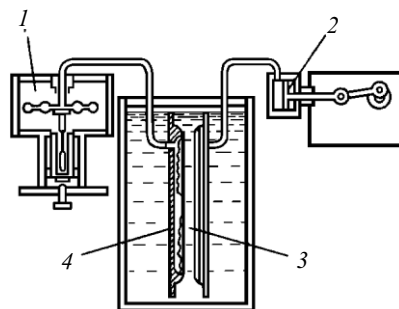


Рис. 2.24.
Мембранный датчик

В лаборатории «Прикладной механики» КемТИППа разработана конструкция сдвигометра для определения предельного напряжения сдвига твердых и мягких сыров СР –1 (рис. 2.26). Отличительной особенностью данного сдвигометра является наличие внутри измерительного цилиндра 4 сверла 2, размещенного на стержне 3, выполненного в виде четырех винтовых лопастей расположенных через 90° по окружности, и снабженного коническим наконечником 1 с винтовой нарезкой, которая позволяет более точно установить прибор в вертикальном положении относительно материала за счет того, что форма резцов 2 (угол конуса) точно соответствует углу фаски нижнего торца цилиндра. Причем диаметр сверла гарантированно меньше диаметра впадин измерительного цилиндра. Для автоматической фиксации данных измерения устройство имеет тормоз, выполненный в виде фрикционной обгонной муфты, что повышает точность измерений.

Пенетромтр ППМ – 4 (рис. 2.27), основан на внедрении конического индентора в материал. Его достоинствами является четыре легко заменяемые силоизмерительные гильзы, позволяющие проводить исследование материалов различной твердости, кроме того, прибор снабжен цифровым индикатором перемещений индентора. В качестве индентора можно использовать как конусы с различными углами при вершине, а также одно- и четырех-игольчатые инденторы.

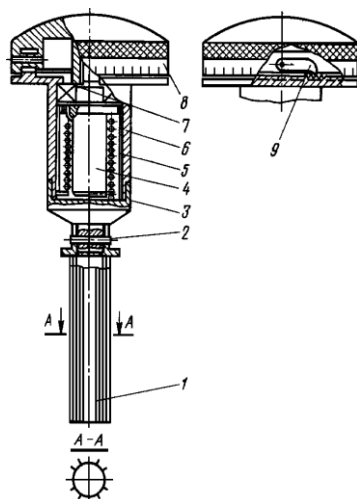


Рис. 2.25. Портативный прибор для контроля консистенции сыра

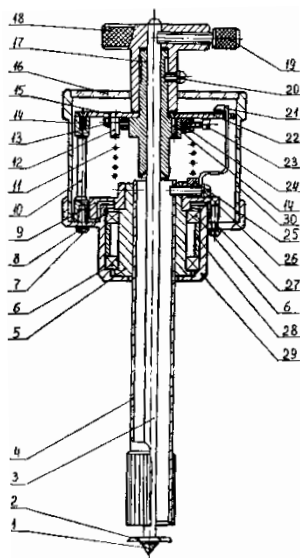


Рис. 2.26. Сдвигометр

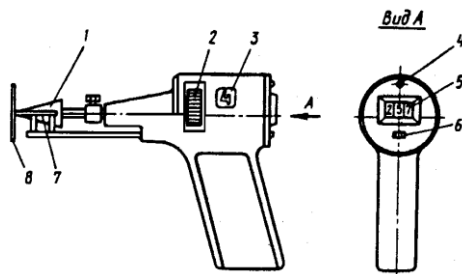


Рис. 2.27. Пенетромтр ППМ – 4

Список рекомендуемой литературы

1. Арет В.А., Забодалова Л.А., Россамахина И.С. Инженерная реология: Метод. указания к практическим занятиям с применением персонального компьютера для студентов спец. 271100 и 271500. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2005. – 22 с.
2. Доня, Д. В. Реология вязкопластичных сред в одношнековых экструдерах : монография / Д. В. Доня, К. Б. Плотников. — Кемерово : КемГУ, 2018. — 165 с. — ISBN 978-5-8353-2382-1. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система.
3. Мачихин Ю.А. Инженерная реология пищевых материалов / Ю.А. Мачихин, С.А. Мачихин. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981 – 216с.
4. Инженерная реология. Физико-механические свойства и методы обработки пищевого сырья / Ю. М. Березовский, С. А. Бредихин, В. Н. Андреев, А. Н. Мартеха. – Санкт-Петербург : Издательство "Лань", 2021. – 192 с. – ISBN 978-5-8114-7069-3.
5. Мачихин Ю.А. Реометрия пищевого сырья и продуктов. Справочник / Под. ред. Ю.А. Мачихина. – М.: Агропромиздат. 1990. – 271 с.
6. Крусъ Г.Н. Методы исследования молока и молочных продуктов / Г.Н. Крусъ, А.М. Шалыгина, З.В. Волокитина – М.: Колос, 2000. – 368 с.
7. Косой В.Д. Инженерная реология. Пособие для лабораторных и практических занятий / В.Д. Косой. – СПб.: ГИОРД, 2007. – 664 с.: ил.
8. Малкин А.Я. Реология: концепции, методы, приложения / Пер. с англ. / А.Я. Малкин, А.И. Исаев. – СПб.: Профессия, 2007. – 560 стр., ил.
9. Никитин, В. В. Реология : учебно-методическое пособие / В. В. Никитин. — Брянск : Брянский ГАУ, 2018. — 125 с. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система.