Федеральное агентство по образованию

Государственное образовательное учреждение высшего
профессионального образования
Ивановский государственный химико-технологический университет

Институт химии растворов РАН

В.А. ПАДОХИН, Н.Р. КОКИНА

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СЫРЬЯ И ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

Учебное пособие

Иваново 2007

УДК [621.1.016 + 536.2]
Падохин В.А., Кокина Н.Р. Физико-механические свойства сырья и пищевых продуктов: Учеб. пособие / Иван. гос. хим.-технол. ун-т., Институт химии растворов РАН. – Иваново, 2007. – 128 с. ISBN 5-9616-0220-6

В учебном пособии изложены основы теории деформирования и течения пищевых продуктов и сырья. Описаны методы измерения структурно-механических характеристик пищевых продуктов и приборы для их реализации. Изложены современные представления об адгезии, аутогезии и когезии пищевых масс. Приведены данные об основных свойствах сыпучих пищевых материалов.

Пособие предназначено для студентов всех форм обучения специальности «Машины и аппараты пищевых производств».

Табл.: 11. Ил.: 45. Библиогр.: 44 назв.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Ивановского государственного химико-технологического университета

Рецензенты:

кафедра производств строительных материалов Ивановского государственного архитектурно-строительного университета;

доктор технических наук П.П. Гуюмджян (Ивановский государственный архитектурно-строительный университет)

ISBN 5-9616-0220-6

©ГОУВПО «Ивановский государственный химико-технологический университет», Институт химии растворов РАН 2007

ВВЕДЕНИЕ

При проектировании машин и аппаратов необходимо учитывать важнейшие физические свойства пищевых продуктов. Для научно обоснованного учета этих свойств в различных областях техники и технологии пищевых производств необходима систематизация данных о физико-механических характеристиках продуктов.

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

Любой процесс, как непрерывную смену явлений во времени, следует рассматривать не только комплексно, но и по наиболее характерным признакам. При этом описания явлений, которые выражают внешнюю форму внутренней природы материала, должны объективно отражать характерные внутренние связи. Для получения уравнений, применяемых в технических расчетах, в большинстве исследований, как правило, используют гипотезы, рассматривающие материал с макроскопической точки зрения в качестве сплошной деформируемой среды.

Такой подход позволяет не рассматривать сложные молекулярные движения в телах и использовать для описания свойств материалов аппарат математического анализа, применяемого к непрерывным функциям. Однако, феноменологический способ описания свойств пищевых продуктов и сырья в ряде случаев должен быть дополнен учетом молекулярных взаимодействий в реальных системах. Например, классификация пищевых дисперсных систем учитывает ряд основных факторов, связанных с молекулярными взаимодействиями в сырье и продуктах: дисперсность, агрегатное состояние и тип контактов между дисперсными фазами. Большую роль при этом играют фундаментальные положения органической, физической и коллоидной, биологической химии.

1. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И ТЕЧЕНИЯ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ И СЫРЬЯ. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

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

Упрощенная классификация дисперсных пищевых продуктов, не учитывающая дисперсности и типа контактов между фазами, приведена в табл. 1-1. При этом характер взаимодействия между элементами структуры рассмотрен отдельно (см. ниже). При определении реологического поведения продукта приведенные в таблице данные позволяют отнести его к той или иной группе: сыпучим, жидко- и твердообразным (в зависимости от концентрации дисперсной фазы) или твердым.

Таблица 1.1

Классификация пищевых дисперсных систем

Дисперсионная среда	Дисперсная фаза	Название системы	Примеры
Газ	Твердая	Пыль, дым, порошок	Сухой порошок (молоко, мука, какао) в воздухе
	Жидкая	Туман	Дисперсия крови, молока в распылительной сушилке
	Газообразная	-	-
Жидкость	Твердая	Суспензия	Плодоовощные соки с мякотью, бульон, расплавленный жир с белковыми частицами, колбасный фарш, сырковая масса
	Жидкая	Эмульсия	Масло в воде, молоко при высоких температурах
	Газообразная	Пена	Крем, взбитые сливки
Твердое тело	Твердая	Твердая суспензия, сплав	Замороженная мышечная ткань
	Жидкая	Твердая эмульсия	Сливочное масло, нативная мышечная ткань
	Газообразная	Пористое тело	Сыр, взбитый и коагулированный меланж, кость

В качестве примеров в таблице приведены только некоторые продукты. Причем продукт отнесен к той или иной дисперсной системе по главнейшим признакам. Например, колбасный фарш после куттерования представляет собой суспензию, насыщенную воздушными пузырьками, т.е. трехфазную систему. Один и тот же продукт (животный жир, сливочное масло), в зависимости от температуры, может быть отнесен к разным системам. Механическое воздействие (резание, взбивание, перемешивание) также может вызвать переход из одного вида дисперсий в другой.

Классификация структур дисперсных систем. Структура, т.е. внутреннее строение продукта, и характер взаимодействия между отдельными ее элементами (частицами) определяются химическим составом, биохимическими показателями, температурой, дисперсностью, агрегатным состоянием и рядом технологических факторов.

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

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

При наибольшей степени уплотнения структуры и наименьшей толщине прослоек жидкой среды восстанавливаемость и пластичность исчезают, кривая прочности в зависимости от влажности дает излом. Такая предельная влажность была определена для некоторых видов колбасного

фарша. При этом контакты частиц остаются еще точечными; они могут переходить в фазовые путем спекания или срастания при значительном повышении температур.

Для описания долговечности структуры, например, желатина, альбумина под нагрузкой П. А. Ребиндер с сотрудниками использовали экспоненциальную зависимость С. Н. Журкова. Процесс разрушения рассматривается как термомеханический, когда благодаря тепловому воздействию преодолевается энергетический барьер, ослабленный действием механического напряжения.

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

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

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

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

химическую, физико-химическую и физико-механическую.

Химическая связь обусловлена ионными или молекулярными взаимодействиями в точных количественных соотношениях; удаляется эта влага из продукта прокаливанием или в результате химических реакций. Она резко отличается по своим свойствам от свободной.

Физико-химическая связь обусловлена адсорбцией влаги в гидратных оболочках или осмотическим удерживанием в клетках в нестрого определенных соотношениях; удаляется из материала испарением, десорбцией (адсорбционная) или вследствие разности концентраций (осмотическая). Адсорбционная влага может иметь иные, чем вода, свойства и способствует диспергированию частиц и пластификации системы, она присуща обычно структурам коагуляционного типа, хотя может существовать и в структурах других типов. Осмотическая влага вызывает набухание тела и присуща нативным и дисперсным клеточным структурам.

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

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

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

Основные уравнения напряжений и деформаций реальных тел

Структурно-механические свойства (СМС) характеризуют поведение продукта в условиях напряженного состояния и позволяют связать между собой напряжения, деформации или скорости деформации в процессе приложения усилий. Они не являются «чистыми» константами материала и существенно зависят от формы и размеров тела, скорости нагружения, состояния поверхности, влияния окружающей среды, температуры, структуры и множества других факторов.

При известных характеристиках можно вычислить значения напряжений или деформаций и в итоге получить необходимые параметры процесса или аппарата, т.е. выполнить прочностные и технологические расчеты. Кроме того, свойство продукта как объективная реальность позволяет охарактеризовать его качество. Поэтому особое значение в

реологии имеет вид уравнения, которое связывает между собой посредством постоянных величин - свойств - напряжения и деформации для каждого конкретного продукта. Выбор такого уравнения из множества других обусловлен соответствием теоретической или эмпирической дифференциальной или интегральной зависимости течения продукта реальной кривой течения, т.е. реальным условиям. Нередко ошибки при определении свойств и их использовании для расчета заключаются в том, что для обобщения опытных данных принимают модели, не соответствующие течению реального объекта.

По виду приложения усилия или напряжения к продукту реологические свойства можно разделить на три связанные между собой группы. Сдвиговые свойства характеризуют поведение объема продукта при воздействии на него сдвиговых, касательных напряжений. Изучение их занимает основное место в реологии - внутренней механике потоков жидкостей или дисперсий. Компрессионные свойства характеризуют поведение объема продукта при воздействии на него нормальных напряжений в замкнутой форме, между двумя пластинами или при каком-либо другом способе растяжения - сжатия образца продукта. Поверхностные свойства характеризуют поведение поверхности продукта на границе раздела с другим твердым материалом при воздействии нормальных (адгезия или липкость) и касательных (внешнее трение) напряжений. В отличие от распространенного понятия «поверхностные явления», которое рассматривает явления на межфазных границах внутри всего объема системы, поверхностные свойства в принятой интерпретации учитывают только один аспект взаимодействий, рассмотренный выше.

В последнее время в связи с попытками объективно оценить качество изделий, в частности нежность, консистенцию, определяют самые разнообразные механические характеристики: сопротивление резанию струной или лезвием, продавливаемость через отверстие, растяжимость, разжевываемость и т.п.

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

Деформация — это изменение формы или линейных размеров тела под действием внешних сил при изменении, — влажности, температуры и пр., при котором частицы или молекулы смещаются одна относительно другой без нарушения сплошности тела. Относительная деформация ε при одноосном растяжении — сжатии (свободном или в форме) представляет собой отношение абсолютной Δl (в м) к первоначальным размерам тела l (в м), т.е.:

$$\varepsilon = \Delta l / l . \qquad (1.1)$$

Относительная деформация γ при сдвиге — отношение абсолютной величины сдвигового смещения слоя под действием касательных сил к его

толщине.

Скорость деформации (градиент скорости) учитывают, если деформации изменяются во времени τ (в с) при неустановившемся процессе; при установившемся процессе деформирования изменение деформации в единицу времени постоянно. Все это описывается понятием «скорость деформации» - ε (в $с^{-1}$) при растяжении-сжатии и γ (в $с^{-1}$) при сдвиге:

$$\varepsilon = d\varepsilon / d\tau \; ; \qquad \dot{\gamma} = d\gamma / d\tau \; . \qquad (1.2)$$

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

$$\gamma = du / dz \, , \qquad (1.3)$$

где u — линейная скорость элементарного слоя, м/с; z — координата по нормали к вектору скорости, м.

В зависимости (1.3) не конкретизировано понятие «градиент скорости». Это может быть средний градиент - консистентная переменная, например:

при ламинарном движении в прямой трубе

$$\dot{\gamma} = 8\omega / d = 4\omega / R = 32V_c / \left(\pi d^3\right) = 4V_c / \left(\pi R^3\right), \qquad (1.3а)$$

где $\omega = 4V_c/(\pi d^2) = V_c/(\pi R^2)$ – среднеобъемная скорость, м/с; V_c - объемная подача жидкости через живое сечение трубы, $м^3с$; $d = 2R$ - внутренний диаметр и радиус трубы, м;

при ламинарном движении в коаксиальном зазоре ротационного вискозиметра

$$\dot{\gamma} = 2\Omega / \left[1 - \left(R_в / R_н\right)^2\right], \qquad (1.3б)$$

где $\Omega = \omega/R_в = 2\pi N$ - угловая скорость вращения ротора, рад/с;
$R_в$, $R_н$ - внутренний и наружный радиусы кольцевого зазора вискозиметра, м; ω - окружная скорость ротора вискозиметра, м/с; N - частота вращения ротора вискозиметра, об/с.

В общем случае градиент скорости и скорость связаны соотношением:

$$\dot{\gamma} = a\omega \, , \qquad (1.3в)$$

где a — коэффициент, зависящий от толщины градиентного слоя и способа вычисления градиента скорости, 1/м.

При описании процессов течения в дифференциальной форме обычно учитывают значение градиента скорости для какого-либо слоя, находящегося на расстоянии r от оси ротора вискозиметра или трубы. Тогда истинное значение градиента скорости будет

$$\dot{\gamma}_{ист} = -du / dr \, . \qquad (1.3г)$$

Наибольшее значение градиент скорости приобретает на стенке трубы или у поверхности вращающегося ротора.

Напряжение σ (в Па) - мера внутренних сил P (в Н), возникающих в теле под влиянием внешних воздействий на единицу площади S (в м^2), нормальной к вектору приложения силы:

$$\sigma = P / S. \qquad (1.4)$$

Напряжение в точке

$$\sigma = \lim_{\Delta S \to 0} \left(\Delta P / \Delta S \right). \qquad (1.4а)$$

Формально сдвиговые или касательные напряжения (θ), нормальные напряжения (σ), давление, или гидростатическое давление *(p)*. и адгезия. или давление прилипания *(p_o),* описываются зависимостью (1.4), где сила и площадь будут иметь соответствующий физический смысл.

Гидростатическое давление (давление) представляет собой отношение силы, равномерно распределенной по нормальной к ней поверхности, к площади этой поверхности. Давление в точке в истинно-вязких жидкостях или в жидкообразных системах не зависит от ориентации площадки, в пластично-вязких системах, имеющих структурный каркас, - зависит. Если на тело, заключенное в определенном объеме, действует гидростатическое давление p (в Па), то в нормальном направлении будет действовать меньшее давление p_r (в Па). Их отношение характеризуется коэффициентом бокового давления ξ:

$$\zeta = p_r / p, \qquad (1.5)$$

который для истинно-вязкой жидкости равен единице, для абсолютно жесткого тела - нулю.

В случае, когда неидеальное тело, у которого $0<\xi<1$, не заключено в жесткую обойму и подвергается действию одноосно растягивающего или сжимающего напряжения, происходит изменение его формы. При условии постоянства объема, например при одноосном сжатии, происходит уменьшение высоты тела и увеличение его поперечные размеров, что характеризуется соответственно относительными деформациями ε и ε_r. Они связаны между собой посредством коэффициента Пуассона μ:

$$\mu = \varepsilon_r / \varepsilon. \qquad (1.6)$$

При одноосном сжатии пластично-вязких тел, не заключенных в жесткую форму, наряду с упругими деформациями возможны необратимые пластические, связанные с уменьшением объема; тогда объемная деформация ε_v будет представлять собой отношение изменение объема тела ($\Delta V = V - V_к$) к его первоначальному объему *(V)*:

$$\varepsilon_V = \Delta V / V. \qquad (1.7)$$

Она с точностью до бесконечно малых высшего порядка представляет собой сумму относительных деформаций по трем перпендикулярным осям:

$$\varepsilon_V = \varepsilon - 2\varepsilon_r = \varepsilon(1 - 2\mu), \qquad (1.8)$$

что наглядно видно при рассмотрении одноосного сжатия цилиндра или параллелепипеда.

Начальное и конечное состояние системы при объемном сжатии в форме можно связать первым каналом термодинамики:

$$\Delta Q = \Delta U + \Delta A, \qquad (1.9)$$

где ΔQ - количество тепла, подведенное к системе или отведенное от нее, Дж: ΔU – изменение внутренней энергии системы, Дж; ΔA - механическая работа, совершаемая системой против внешних сил, Дж.

Для адиабатического процесса $\Delta Q = 0$: $\Delta U = -\Delta A$, а работа внешних сил равна работе внутренних с обратным знаком, т.е.

$$\Delta A = p\,\Delta V + V\,\Delta p, \qquad (1.9а)$$

где p—давление, Па; V—объем продукта, м^3.

При постоянном давлении (Δp==0) получается зависимость для расчета удельной (на единицу объема) работы $A_{уд}$ (в Дж/м^3):

$$A_{уд} = \frac{\Delta A}{V} = p\frac{\Delta V}{V} = p\frac{V - V(p,\tau)}{V} = p\varepsilon(p,\tau), \qquad (1.10)$$

где V - начальный объем системы, м^3; $V(\rho, \tau)$ - объем при воздействии давления p (в Па) в любой момент времени τ (в с), $\varepsilon(\rho, \tau)$ - относительная объемная деформация в любой момент времени.

Для ряда пластично-вязких тел применимо кинетическое уравнение деформации:

$$\varepsilon(p,\tau) = a_\varepsilon p^{a_1}(1 + a_2 \lg\tau), \qquad (1.11)$$

где a_ε, a_1, a_2 - коэффициенты, зависящие от геометрических и механических факторов, физико-химического состояния продукта, его состава и особенностей исходного сырья.

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

Уравнение (1.11) применимо также и для описания процессов сдвигового деформирования:

$$\gamma(\theta,\tau) = a_\gamma \theta^{a_1}(1 + a_2\, lg\,\tau). \qquad (1.11а)$$

Гидростатическое давление при одноосном сжатии продукта по высоте формы или трубы изменяется. Это явление необходимо учитывать, например, при набивке в гильзу пластично-вязкого продукта, при прессовании порошкообразных материалов и т.д.

При сжатии продукта поршнем с одного торца в узкой трубке диаметром d приложенное к поверхности давление p по высоте будет уменьшаться и на расстоянии h будет иметь значение p_h,. Для расчета осевого и бокового (горизонтального) давлений уравнения имеют вид:

$$p_h = p\,exp\left(-a_1 d^{-a_2} h\right); \quad p_{rh} = \zeta p_h, \qquad (1.12)$$

где a_1 и a_2 - эмпирические коэффициенты (для мясного фарша a_1=0,115, a_2=0,33).

Для порошкообразных материалов:

$$p_h = p\,exp\left(-4\zeta d^{-1} fh\right), \qquad (1.12а)$$

где f - коэффициент трения.

Эти уравнения подобны по форме записи и показывают, что чем больше диаметр цилиндра, тем меньше уменьшение давления по высоте.

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

$$\sigma = \varepsilon E, \qquad \theta = \gamma G. \qquad (1.13)$$

Физическую модель Гукова тела как при растяжении - сжатии, так и при сдвиге представляет собой пружина (рис 1.1, а).

При объемном сжатии напряжения и деформации связаны посредством объемного модуля упругости K (в Па):

$$\sigma = K\varepsilon_V, \qquad (1.14)$$

где ε_V вычисляется по зависимости (1.7), модуль объемной упругости - по выражению

$$K = E/\left[a(1-2\mu)\right]. \qquad (1.14а)$$

При одноосном деформировании тела в замкнутом объеме a=1, при трехосном деформировании с приложением одинаковых напряжений a=3. Если в уравнение (1.14) подставить значения по уравнениям (1.8) и (1.14а), то оно превращается в (1.13). Объемный модуль упругости может быть вычислен также по формуле:

$$K = EG/(E+G). \qquad (1.14б)$$

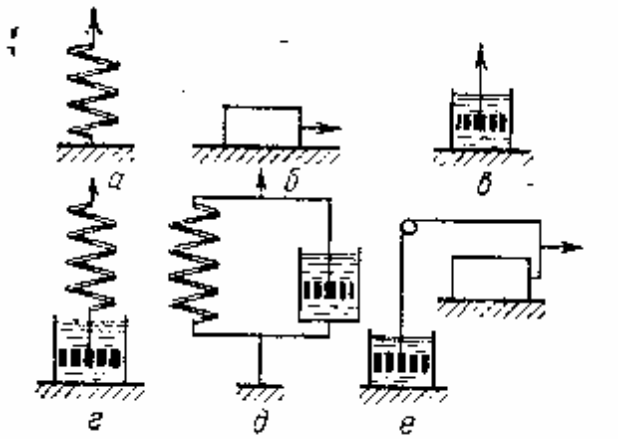

Рис. 1.1. Механические модели простейших реологических тел:
а - упругого (пружина); *б* - пластичного (пара трения скольжения);
в - вязкого (цилиндр и поршень с отверстиями); *г* - упруговязкого с релаксацией деформаций; *д* - то же, с релаксацией напряжений;
е - пластично-вязкого

Часто для описания упругих свойств продуктов в различных зонах деформирования оказывается недостаточно классических понятий о модулях упругости. Тогда могут быть использованы модули упругости, получившие распространение в реологии: условно-мгновенный, эластический и др.

Коэффициент объемного сжатия β (в 1/Па) может быть использован как некая интегральная характеристика сжатия продукта в форме:

$$\beta(p,\tau) = \Delta V / (V\Delta p) = \varepsilon(p,\tau) / \Delta p, \qquad (1.14в)$$

где Δp - изменение давления, Па.

Коэффициент характеризует относительное изменение объема продукта при изменении давления на единицу его измерения. Для ньютоновских жидкостей он практически не зависит от величины давления и времени его действия; для пластично-вязких систем с увеличением давления он уменьшается.

Адгезия P_0 (в Па) - слипание разнородных твердых или жидких тел, соприкасающихся своими поверхностями. Аутогезия - самопроизвольное слипание однородных тел. Формально, адгезия (липкость) определяется по уравнению (1.4), как удельная сила нормального отрыва пластины от продукта:

$$P_0 = P_0 / S_0, \qquad (1.15)$$

где P_0 - сила отрыва, Н; S_0 - геометрическая площадь пластины, м^2.

Отрыв может быть трех видов: по границе контакта – адгезионный, по слою продукта - когезионный и смешанный - адгезионно-когезионный. Часто адгезионного отрыва не происходит, поэтому удельную силу при любом виде отрыва называют липкостью, адгезионным давлением или давлением прилипания.

Внешнее трение - взаимодействие между телами на границе их соприкосновения, препятствующее относительному их перемещению вдоль поверхности соприкосновения. Оно зависит от усилия нормального контакта и липкости, определяется по двучленному закону Б. В. Дерягина:

$$P_{тр} = f(P_к + p_0 F_0), \qquad (1.15а)$$

где f - истинный коэффициент внешнего трения; $P_к$ - сила, нормальная поверхности сдвига (усилие контакта).

Если величины в уравнении (1.15а) разделить на площадь, то можно получить:

$$p_{тр} = f(p_к + p_0), \text{ или } p_{тр} = f p_к + \theta_0^*. \qquad (1.15б)$$

В ряде случаев удобнее оперировать эффективным коэффициентом внешнего трения, который вычисляется по зависимости:

$$f_{эф} = \frac{p_{тр}}{p_к} \qquad (1.15в)$$

и может быть связан с величиной истинного коэффициента трения:

$$f_{эф} = f(1 + p_0 / p_к). \qquad (1.15г)$$

Уравнение (1.15б) можно применить для вычисления как чисто внешнего трения, так и трения в поверхностной пленке материала. Тогда θ_0* можно отождествить с предельным напряжением сдвига в пленке, $fp_к$ представляет собой касательное напряжение, вызванное внешним давлением $p_к$; коэффициент трения характеризует скольжение в сдвигаемой пленке.

Пластичность - способность тела под действием внешних сил необратимо деформироваться без нарушения сплошности. Пластическое течение начинается при величине напряжения, равной пределу текучести. В реологии в этом смысле при сдвиговых деформациях используется понятие «предельное напряжение сдвига», обозначенное θ_0. Модель этого, Сен-Венанова тела, в виде пары трения скольжения показана на рис. 1.1, *б*.

Вязкость - способность тела оказывать сопротивление относительному смещению его слоев. Вязкое течение реализуется в истинно-вязких, ньютоновских жидкостях при любых, сколь угодно малых напряжениях сдвига θ. Это течение описывается уравнением Ньютона

$$\theta = \eta\dot{\gamma}\text{, или } P = \eta S du / dz, \qquad (1.16)$$

где η - коэффициент динамической, или абсолютной, вязкости, Па·с; характеризует величину усилий, возникающих между двумя элементарными слоями жидкости при их относительном смещении; γ - скорость деформации, $с^{-1}$; P - сила сопротивления между двумя элементарными слоями, Н; S - площадь поверхности соприкосновения этих слоев, $м^2$; du/dz - градиент скорости, т.е. интенсивность изменения скорости по нормали к ее вектору,$с^{-1}$.

Модель Ньютонова тела в виде поршня с отверстиями показана на рис.1.1, *в*.

Полная вязкость движущейся жидкости складывается из ламинарной (ньютоновской), турбулентной и объемной вязкостей.

При течении неньютоновских (аномально вязких) жидкостей вязкость не остается величиной постоянной; она зависит от напряжения сдвига и градиента скорости. Тогда пользуются понятием «эффективная вязкость», которая вычисляется по зависимости (1.16) для фиксированных значений напряжения и градиента скорости:

$$\eta_{эф} = \theta / \dot{\gamma}, \qquad (1.16а)$$

где напряжение сдвига и скорость деформации могут быть представлены в дифференциальной или интегральной форме, например как консистентные переменные для цилиндрической трубы, кольцевого зазора коаксиального вискозиметра и др.

Эффективная вязкость является итоговой характеристикой, которая описывает равновесное состояние между процессами восстановления и разрушения структуры в установившемся потоке.

Комбинируя названные выше три основные модели, можно получить уравнения напряжений и деформаций для различных реальных тел, причем количество таких комбинаций практически не ограничено. Однако

полученные уравнения, часто имея линейный характер, недостаточно точно описывают течение и деформирование пищевых продуктов.

Линейные уравнения напряжений и деформаций для моделей, представленных на рис. 1.1, широко используются для описания деформационного поведения пищевых продуктов как при сдвиговых, так и при нормальных напряжениях.

Процессы в релаксирующей жидкообразной среде (Максвеллова вязко-упругая жидкость), когда вызванные внешним воздействием напряжения уменьшаются во времени (рис. 1.1, г), описываются уравнением Максвелла. Под действием напряжения θ в теле возникает деформация γ, имеющая во времени определенную скорость $\dot{\gamma} = d\gamma / d\tau$, которая складывается из упругой $\dot{\gamma}_{упр}$ и вязкой $\dot{\gamma}_{вяз}$ составляющих. Упругую составляющую находят дифференцированием по времени закона Гука:

$$\left(d\gamma / d\tau\right)_{упр} = d\theta / \left(Gd\tau\right) = \dot{\theta} / G. \qquad (1.17)$$

Вязкую составляющую определяют из уравнения Ньютона:

$$\left(d\gamma / d\tau\right)_{вяз} = \theta / \eta. \qquad (1.17а)$$

Суммируя две составляющие, получают уравнение Максвелла:

$$d\gamma / d\tau = d\theta / \left(Gd\tau\right) + \theta / \eta, \qquad \eta\dot{\gamma} = \eta\dot{\theta} / G + \theta, \qquad (1.18)$$

которое можно проинтегрировать для частных случаев.

Если предположить, что деформация постоянна, т.е. $\dot{\gamma} = 0$, то можно наблюдать процесс рассасывания, релаксации напряжений, причем при $\tau = 0$ напряжение равно какому-то начальному значению $\theta = \theta_1$. При интегрировании в пределах от θ_1 до θ и от 0 до τ получают уравнение:

$$\theta = \theta_1 \, exp\left(-G\tau / \eta\right), \qquad (1.19)$$

называемое экспоненциальным законом релаксации напряжений. Если в этом уравнении η/G обозначить через τ_p, то уравнение примет вид

$$\theta = \theta_1 \, exp\left(-\tau / \tau_p\right), \qquad (1.20)$$

где τ_p - период релаксации, с.

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

В многофазной реальной системе может протекать одновременно несколько процессов с различными периодами релаксации. После завершения процессов с наименьшим периодом наступает неполное статическое равновесие. Поведение тела можно описать кривой распределения периодов релаксаций.

При сложении упругих и вязких напряжений для упруговязкого твердого тела Фойгта-Кельвина (рис. 1.1, *д*) получают следующее уравнение:

$$\theta = \gamma G + \eta d\gamma / d\tau \quad \text{или} \quad \theta = G\left[\gamma + \left(\eta / G\right)\dot{\gamma}\right]. \qquad (1.21)$$

При снятии напряжения (θ=0) и интегрировании в пределах от γ_{max} до γ и от 0 до τ получают экспоненциальную функцию для релаксации деформации:

$$\gamma = \gamma_{max}\, exp\left(-G\tau/\eta\right) \quad \text{или} \quad \gamma = \gamma_{max}\, exp\left(-\tau/\tau_p\right). \qquad (1.22)$$

Если среду, подчиняющуюся уравнению Фойгта - Кельвина, нагрузить постоянным напряжением θ_2 при τ>0, то интегрирование дает:

$$\gamma = \left(\theta_2/G\right)\left[1 - exp\left(-\tau/\tau_p\right)\right], \qquad (1.22а)$$

т.е. деформация во времени постепенно увеличивается, стремясь к значению $\gamma_\infty = \theta_2/G$ при $\tau \to \infty$.

Комбинация уравнений для моделей Максвелла и Фойгта - Кельвина, выполненная в определенной мере произвольным приравниванием правых частей (1.18) и (1.21), приводит к математической зависимости для модели стандартного линейного тела:

$$\theta + \tau_\gamma \dot{\theta} = G_R\left(\gamma + \tau_\theta \dot{\gamma}\right), \qquad (1.23)$$

где G_R - релаксационный модуль упругости, определяемый соотношением между упругими и пластичными характеристиками продукта; τ_γ -период релаксации напряжения при постоянной деформации; τ_θ - период релаксации деформации при постоянном напряжении.

Модификация уравнения (1.23) для малых скоростей сдвига была получена Фрелихом и Заком, а также Олдроидом. В качестве модели они приняли упруговязкое тело, которое представили в виде упругих шариков, взвешенных в вязкой жидкости. При течении системы форма шариков изменяется, и в них накапливается энергия упругих деформаций. Это уравнение имеет вид:

$$\theta + \tau_\gamma \dot{\theta} = \eta_0\left(\dot{\gamma} + \tau_\theta \ddot{\gamma}\right), \qquad (1.24)$$

где η_0 - наибольшая вязкость практически неразрушенной структуры, Па·с, $\ddot{\gamma} = d^2\gamma/d\tau^2$ - вторая производная относительной деформации по времени, $1/с^2$.

При сложении напряжений, соответствующих пластическому и вязкому течениям (рис. 1.1, е), получают уравнение Шведова - Бингама для пластично-вязкой среды

$$\theta = \theta_0 + \eta d\gamma/d\tau\,. \qquad (1.25)$$

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

В большинство приведенных уравнений входит величина периода релаксации, которая имеет большое значение при исследовании физико-механических свойств, особенно при малых напряжениях и времени действия напряжения того же порядка, как период релаксации.

Из уравнений релаксации видно, что при бесконечном времени после

разгрузки тела напряжения или деформации полностью релаксируют. Однако для рассматриваемых тиксотропных систем напряжения обычно не релаксируют до нуля. Поэтому Д С. Великовский считает, что процессы старения, которые являются следствием коагуляции и упрочнения структурной сетки в результате слипания близрасположенных частиц, увеличивают прочность структурного каркаса во времени. Длительное измерение развития процесса релаксации невозможно, так как конечные условия не будут соответствовать начальным.

В отечественной и зарубежной литературе по реологии довольно длительный период наблюдалось увлечение составлением механических моделей. Для большего приближения к реальным продуктам они непрерывно усложнялись, что делало их практически непригодными для расчета деформационного поведения реальных тел. С критикой такого направления в реологии неоднократно выступали академик П.А. Ребиндер, профессор М.П. Воларович и др.

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

Уравнение Шульмана:

$$\left(\theta^{1/a} - \theta_0^{1/a}\right)^b = \eta\dot{\gamma}\,, \qquad (1.26)$$

где *a, b* - экспериментально определяемые коэффициенты, при *a*=*b*=2 это уравнение превращается в уравнение Кэссона:

$$\theta^{1/2} = \theta_0^{1/2} + \left(\eta_K\dot{\gamma}\right)^{1/2} \quad \text{или} \quad \theta^{1/2} = a_0 + a_1\dot{\gamma}^{1/2}. \qquad (1.26а)$$

Уравнение Гершеля – Балкли:

$$\theta - \theta_0 = B_1^*\dot{\gamma}^n\,, \qquad (1.27)$$

где B_1* - коэффициент, пропорциональный вязкости при градиенте скорости, равном единице, Па·с; *n* - индекс течения.

При θ_0=0 уравнение приобретает вид степенного уравнения Оствальда-де Вале:

$$\theta = B_1^*\dot{\gamma}^n\,, \qquad (1.27а)$$

при *n*=1 – Шведова-Бингама, тогда B_1* представляет собой пластическую вязкость.

Таким образом, приведенные математические зависимости позволяют описать поведение пищевых продуктов в различных условиях деформирования при приложении нормальных и касательных напряжений.

Реологическая классификация пищевых продуктов и их основные структурно-механические свойства

Классификация реальных тел. Место реологии как одного из разделов технической механики сплошной среды среди других ее разделов видно из табл. 1.2.

Таблица 1.2

Классификация реальных тел

Идеально твердое тело, Эвклидово	Упругое тело, Гуково	Пластичное тело, Сен-Венаново	Реологическое тело	Истинно-вязкая жидкость, ньютоновская	Идеальная жидкость, паскалевская
1	2	3	4	5	6
При любых нормальных и касательных напряжениях деформация равна нулю	Напряжение пропорционально деформации	При достижении предельного напряжения сдвига начинаются пластические деформации	Линейные - составные из тел по по графам 2, 3, 5, нелинейные-эмпирические	Напряжение пропорционально градиенту скорости в первой степени	Вязкость и сжимаемость равны нулю
Теоретическая механика	Теория упругости	Теория пластичности	Реология	Гидравлика	

С помощью основных, «первичных» тел - упругого (модель - пружина), пластичного (модель - пара трения скольжения) и вязкого (модель - поршень с отверстиями и цилиндр) - в различных сочетаниях и комбинациях можно моделировать деформационные характеристики множества реальных пищевых продуктов. При этом обычно деформации и скорости деформаций связаны линейно. Группа нелинейных реологических тел описывается по преимуществу эмпирическими зависимостями, в которых деформации и скорости деформаций связаны степенными или более сложными закономерностями.

Реологические уравнения, как видно из предыдущего, по своему характеру являются наиболее общими. Большинство уравнений теории

упругости, пластичности, гидравлики могут быть получены в виде частных случаев из реологических.

Принадлежность реального тела к тому или иному виду «идеального» реологического тела, выявленная на основе предварительных экспериментов, позволяет верно выбрать прибор для исследования и определить свойства, подлежащие изучению. Феноменологическая классификация пищевых продуктов при сдвиговых деформациях, основанная на уравнениях Максвелла, Фойгта-Кельвина, Бингама и др., обращает внимание на различие в макроскопических свойствах материалов, но может оставить в тени характерные особенности, общие для многих тел. Эти особенности становятся часто несущественными, если придерживаться классификации, основанной на молекулярном строении. Однако применение такой классификации ограничено для реологических исследований гипотезами сплошности и непрерывности. Кроме того, многие пищевые продукты имеют сложное строение и в процессе измерения или перемещения могут разделяться по фазам и следовать тому или иному закону в зависимости от уровня напряжений и деформаций, температуры и давлений.

Феноменологический способ классификации на основе математических моделей дан в предыдущем подразделе. Если взять упругое и истинно-вязкое тела в качестве крайних, то все остальные, описанные выше, будут располагаться между ними.

Сдвиговые свойства. Сдвиговые свойства представляют собой основную группу свойств, которые широко используют 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.

Классификация реальных тел по величине отношения $\theta_c/(\rho g)$ (ρ - плотность продукта, кг/м^3, g - ускорение свободного падения, 9,8м/с^2), которое представляет собой меру способности вещества сохранять свою форму, представлена ниже:

$\theta_c/(\rho g)$, м	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 предлагает обобщенную классификацию (от твердого до истинно-вязкого состояния) по величине механических свойств: модулей упругости, вязкости и пр. К первой группе относятся твердые и твердообразные тела (твердый жир, целые ткани мяса, сухари, печенье и пр.), ко второй - твердожидкие (мясной фарш, творог, студни, мучное тесто и пр.), к третьей - жидкообразные и жидкости (расплавленный жир, бульоны, молоко, мед, вода и пр.).

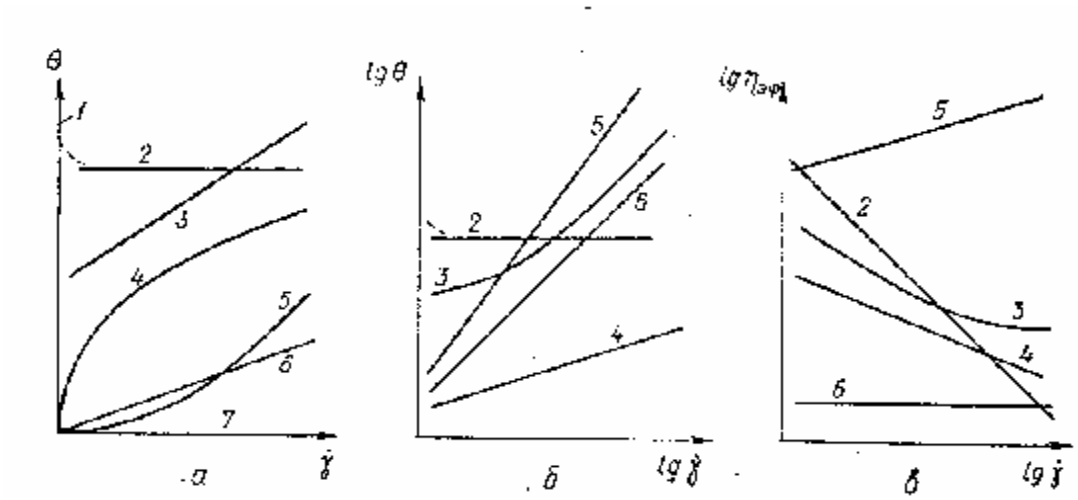

Рис. 1.2. Зависимости для различных реологических тел:
а - между напряжением сдвига и градиентом скорости в равномерных шкалах; *б* - то же, в логарифмических шкалах; *в* - между эффективной вязкостью и градиентом скорости в логарифмических шкалах: 1 - упругое (Гуково); 2 - пластичное (Сен-Венаново); 3 - пластично-вязкое (Бингамово); 4 - псевдопластичное; 5 - дилатантное; 6 - истинно-вязкое (Ньютоновское); 7 - идеальная жидкость (Паскалевская)

Представляет интерес классификация (рис. 1.2) реальных тел с помощью степенного уравнения (1.27). Для этого преобразуем правую часть уравнения (1.27) так, чтобы коэффициенту B_1* придать вполне определенный физический смысл - эффективной вязкости B_0* при градиенте скорости, равном единице, т.е. при $\dot{\gamma}_1 = 1\,\text{с}^{-1}$:

$$\theta - \theta_0 = B_0^* \dot{\gamma}^n \dot{\gamma}_1^{1-n} = B^* (\dot{\gamma} / \dot{\gamma}_1)^n \dot{\gamma}_1 = B_0^* (\dot{\gamma} / \dot{\gamma}_1)^{n-1} (\dot{\gamma} / \dot{\gamma}_1) \dot{\gamma}_1 . \quad (1.28)$$

Обозначив m=1-n скорость разрушения структуры и $\dot{\gamma} / \dot{\gamma}_1 = \dot{\gamma}_*$ безразмерный градиент скорости, получим:

$$\theta - \theta_0 = B \dot{\gamma}_*^{-m} \dot{\gamma} = \eta_{эф} \dot{\gamma} , \quad (1.29)$$

откуда

$$\eta_{эф} = B \dot{\gamma}_*^{-m} , \quad (1.29а)$$

где $\eta_{эф}$ эффективная вязкость, Па·с.

В общем случае $\dot{\gamma}_1$ может иметь любое фиксированное значение, однако для удобства вычислений и расчетов ему придают значение, равное единице.

Ранее для вычисления эффективной вязкости по результатам измерений с помощью ротационного вискозиметра была предложена формула для случая, когда неизвестен закон изменения градиента скорости:

$$\eta_{эф} = B (\omega / \omega_1)^{-m} = B \omega_*^{-m} , \quad (1.30)$$

где B - эффективная вязкость при единичном значении окружной скорости Па·с; ω - окружная скорость боковой поверхности ротора коаксиально-

цилиндрического вискозиметра, м/с; ω_1 - окружная скорость, равная единице ее измерения, т.е. 1м/с; ω_* - безразмерная окружная скорость (ее числовое значение).

Эта же формула может быть использована для интерпретации результатов капиллярной вискозиметрии, тогда ω - среднеобъемная скорость или консистентная переменная [см. формулу (1.3а)].

Для пересчета эффективной вязкости, полученной с помощью ротационно-цилиндрических вискозиметров, при единичных значениях градиента скорости и окружной скорости предложена формула:

$$B_0^* = B\left\{\frac{\dot{\gamma}_1 R_в\left[1-\left(R_в / R_н\right)^2\right]}{2\omega_1}\right\}^{-m}, \qquad (1.31)$$

где $R_в$ и $R_н$ - соответственно внутренний и наружный радиус кольцевого зазора вискозиметра, м.

При этом градиент скорости вычисляется по формуле (1.36). Если в уравнении (1.27) θ_0 =0 и n =1, то оно описывает течение истинно-вязкой, ньютоновской жидкости, коэффициент B_1* принимает при этом значение ньютоновской вязкости (угол наклона на рис. 1.2, *б* 45°). При θ_0 =0 и n>1 уравнение соответствует дилатантным жидкостям, при θ_0 =0 и n<1 - псевдопластичным. Для пластично-вязких тел Бингама θ_0 >0 и n=1. В исходной форме записи уравнение описывает поведение «степенных» жидкостей, обладающих истинным или кажущимся предельным напряжением сдвига. Кроме названных четырех видов тел на графике показаны: упругое тело, у которого при любых напряжениях течение отсутствует, следовательно, вязкость бесконечна; пластичное тело, эффективная вязкость которого характеризуется линией с углом наклона 45° (см. рис. 1.2, в); идеальная жидкость, при течении которой внутренние сопротивления равны нулю.

Перечисленные в таблице системы не меняют своих свойств во времени. Выделяют еще группу систем с переменными во времени свойствами: тиксотропные, у которых напряжение сдвига и эффективная вязкость уменьшаются во время сдвига, и реопексные, у которых напряжение сдвига и эффективная вязкость увеличиваются со временем в случае воздействия на систему касательных напряжений при постоянном градиенте скорости.

Кривые течения названных выше «степенных» жидкостей в равномерных шкалах (см. рис. 1.2, а) спрямляются в логарифмических (см. рис. 1.2, б). Исключение составляет кривая течения Бингамова тела, которая выходит в прямую при высоких напряжениях (градиентах скорости), значительно превышающих предельное напряжение сдвига. Показатель степени - индекс течения - в уравнении (1.27) определяется выражением:

$$n = \left(d\,lg\,\theta\right)/\left(d\,lg\,\dot{\gamma}\right). \qquad (1.32)$$

Если эффективную вязкость вычислить по уравнению Ньютона (1.16а) для определенных напряжений и градиентов скорости, то темп разрушения структуры по уравнению (1.29а), характеризующий угол наклона линии эффективной вязкости на рис. 1.2, *в*, будет вычисляться по зависимости:

$$m_1 = \frac{d\,lg\,\eta_{эф}}{d\,lg\,\dot{\gamma}} = \frac{d\left(lg\,\theta - lg\,\dot{\gamma}\right)}{d\,lg\,\dot{\gamma}} = \frac{d\,lg\,\theta}{d\,lg\,\dot{\gamma}} - 1 = n - 1. \qquad (1.33)$$

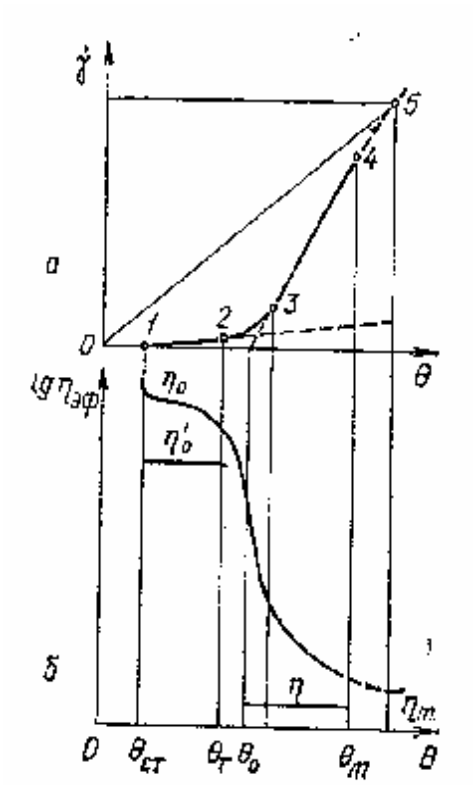

Рис. 1.3. Реологические кривые для твердообразных систем:
а - зависимость градиента скорости от напряжения сдвига; *б* - зависимость логарифма эффективной вязкости от напряжения сдвига: *0-1* - зона упругих деформаций; *1-2* - зона начала течения с наибольшей эффективной и пластической вязкостью; *2-3* - начало зоны лавинного разрушения структуры; *3-4* - зона лавинного разрушения структуры (течение с наименьшей пластической вязкостью); 5 и выше - зона ньютоновского течения с постоянной вязкостью предельно разрушенной структуры

Для псевдопластичных систем $0<n<1$, следовательно, $-1<m_1<0$. Для удобства преобразований, как принято выше [см. формулы (1.28) и (1.29)], обозначим $m=m_1$. Таким образом, изменение эффективной вязкости в зависимости от скорости деформации в логарифмических шкалах следует прямой линии, угол наклона которой определяется темпом разрушения структуры.

При рассмотрении графиков *б* и *в* на рис. 1.2 следует учитывать, что в логарифмических шкалах нулевые значения величин лежат в бесконечности вниз и влево относительно нанесенных осей ординат. Логарифмы числовых значений величин равны нулю, когда сами величины равны единице.

Поэтому на графиках рис. 1.2, б и 1.2, *в* кривые течения тел 1 и 7 не показаны.

П. А. Ребиндер и Н. В. Михайлов делят реологические тела на жидкообразные и твердообразные (рис. 1.3) в зависимости от характера кривой $\eta_{эф}(\theta)$ и периода релаксации [см. формулу (1. 19)].

К жидкообразным телам относятся ньютоновские жидкости и структурированные системы, не имеющие статического предельного напряжения сдвига, т. е. $\theta_{ост}=0$ (см. рис 1.3). К твердообразным относятся упругопластичные и другие тела, обладающие статическим и динамическим предельным напряжением сдвига. Зависимость эффективной вязкости от напряжения или скорости сдвига считают основной характеристикой структурно-механических свойств дисперсных систем, так как эффективная вязкость является итоговой характеристикой, описывающей равновесное состояние между процессами восстановления и разрушения структуры в установившемся потоке.

В общем виде кривая течения $\dot{\gamma}(\theta)$ (см. рис. 1.3) имеет S-образный характер и отсекает на оси абсцисс отрезок, в пределах которого воздействующие на тело напряжения вызывают только упругие или эластические деформации.

Важнейшими сдвиговыми свойствами структурированных систем являются пластическая и эффективная вязкость $\eta_{эф}(\theta)$ и период релаксации $\tau_p(\theta)$; наибольшая вязкость (η_0) неразрушенной структуры при «скольжении» мест контакта и вязкость предельно разрушенной структуры (η_m); модули упругости сдвига *(G),* пределы текучести условно-статический ($\theta_{ст}$) и динамический - предельное напряжение сдвига (θ_0); прочность структуры при упругохрупком или эластичном разрыве (θ_r) и при пластично-вязком разрушении (θ_m). Эти характеристики показаны на рис. 1.3. В ряде случаев при исследовании и расчете конкретных явлений оказывается возможным игнорировать одни существенные свойства тел и, напротив, учитывать другие.

Важное значение для характеристики дисперсных систем имеют модули упругости и периоды релаксации. Условно-мгновенный модуль упругости представляет собой отношение напряжения к мгновенно-упругой составляющей деформации сдвига γ_0; эластичный модуль - отношение напряжения к упругой (эластической) деформации за вычетом мгновенно-упругой γ_m - γ_0; равновесный модуль вычисляют как отношение напряжения к общей деформации γ_m, когда нельзя разграничить упругую и эластическую деформацию.

Периоды релаксации могут быть определены и для случая осевого или объемного деформирования продукта; для этого могут быть использованы уравнение (1.23), а также уравнения, названные выше. Релаксационные характеристики и модуль упругости при объемном и осевом растяжении -

сжатии нередко описываются в различных комбинациях теми же уравнениями и моделями, которые используют для изучения сдвиговых свойств (см. рис. 1.1). В связи с этим компрессионные характеристики в этом разделе специально не рассмотрены.

При обработке экспериментальных данных часто не удается всю кривую течения описать одним уравнением, тогда реологические характеристики вычисляются для определенных интервалов напряжений или деформаций. В тех случаях, когда опытная кривая не «спрямляется», ее либо разбивают на участки (см. рис. 1.3, *а*), либо аппроксимируют одной линией.

Для вычисления значений величин структурно-механических характеристик при сдвиговых и нормальных деформациях по экспериментальным данным строят основные реологические зависимости: деформация - время; напряжение - деформация; градиент скорости - напряжение (см. рис. 1.2, *а* и 1.3, а) и др.

Г. М. Бартенев и Н. В. Ермилова классифицируют дисперсные системы на твердо- и жидкообразные по характеру изменения эффективной вязкости с увеличением градиента скорости (см. рис. 1.4). Для тиксотропно-коагуляционных дисперсных структур они вводят понятие о двух типах реологических кривых течения. К первому типу относят кривые течения, у которых вязкость и градиент скорости являются однозначными функциями напряжения (см. рис. 1.2 и 1.3). Эти кривые характерны для многих исследованных пищевых продуктов: мясных фаршей, конфетных масс и т.п. Ко второму типу относят кривые течения, у которых зависимость вязкости или скорости деформации представляется неоднозначными функциями от напряжения сдвига (см. рис. 1.4). Для них характерно наличие некоторой области уменьшения напряжения сдвига при увеличении градиента скорости. Такие кривые были получены для некоторых концентрированных суспензий глин, консистентных смазок, полимерных дисперсий; применительно к пищевым продуктам изучены они недостаточно.

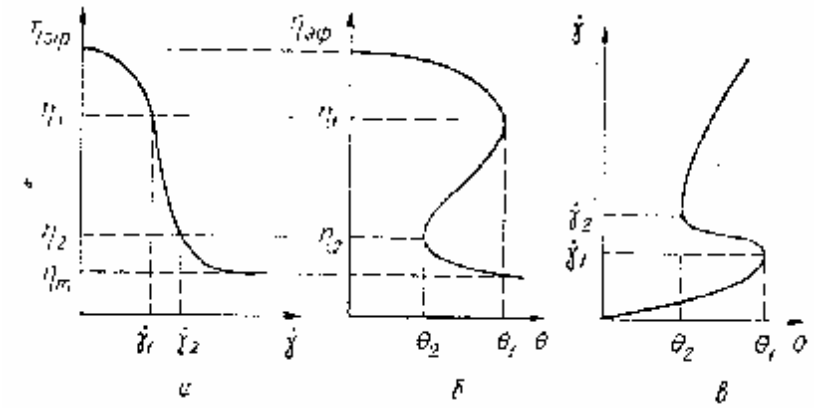

Рис. 1.4. Кривые течения второго типа:
а - зависимость эффективной вязкости от градиента скорости;
б - зависимость эффективной вязкости от напряжения сдвига;
в - зависимость градиента скорости от напряжения сдвига

Существенный интерес для реологии представляют продукты, характеристики течения которых зависят от длительности воздействия напряжения: тиксотропные и реопексные (см. рис 1.5). По своему поведению они взаимно противоположны, так же как взаимно противоположны псевдопластичные и дилатантные.

У псевдопластичных и дилатантных систем изменение эффективной вязкости с увеличением градиента скорости происходит достаточно быстро, и влияние продолжительности деформирования на вязкость не может быть обнаружено при обычных измерениях. Уменьшение эффективной вязкости псевдопластичных систем обусловлено в основном разрушением структурной сетки и агрегатов частиц и ориентацией частиц вдоль вектора скорости. Увеличение эффективной вязкости дилатантных систем обусловлено их «расширением» (набуханием частиц), что вызывает уменьшение толщины прослоек дисперсионной среды и увеличение силы сопротивления.

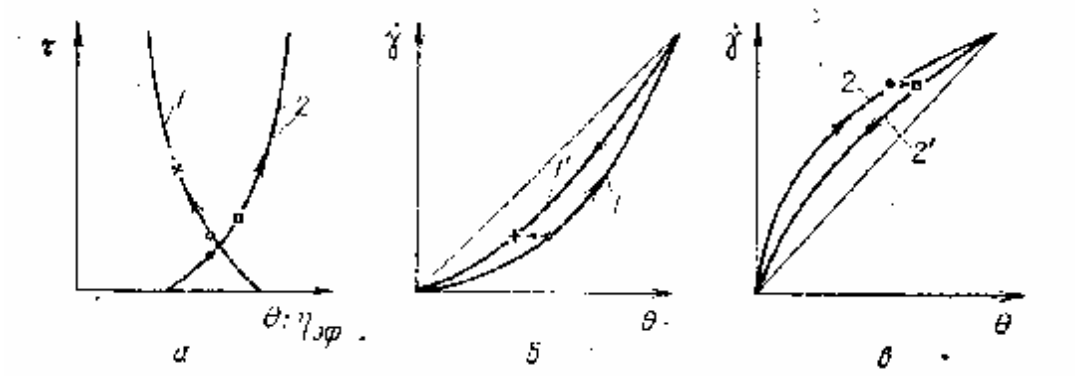

Рис. 1.5. Кривые течения, характеризующие:
а - зависимость напряжения сдвига и эффективной вязкости от длительности действия напряжения при постоянном градиенте скорости для систем:
1 - тиксотропные; 2 – реопексные;
б - реограммы тиксотропных систем: 1 - при нагрузке; 1’ - при разгрузке;
в - реограммы реопексных систем: 2 - при нагрузке; 2’ - при разгрузке

Тиксотропным системам присущи восстановление структуры после разрушения и непрерывное ее разрушение (до определенного предела) при деформировании (рис. 1.5, *а, б*) Реопексные системы способны структурироваться, т.е. образовывать контакты между частицами в результате ориентации или слабой турбулизации при механическом воздействии с небольшими градиентами скорости (рис. 1.5, *а, в).* По сравнению с тиксотропными они встречаются редко. Если за основу принять график на рис. 1.5, *а,* характерный для тиксотропных и реопексных систем, то эти два свойства могут проявляться у псевдопластичных и дилатантных систем. Тогда соответственно на рис. 1.5, *б, в* направления всех стрелок меняются на обратные.

Наглядное представление о виде течения продуктов дают точки одинаковой конфигурации, нанесенные на рис. 1.5, *а, б, в.* При этом следует иметь в виду, что кривые на рис. 1.5, *а* построены для постоянного значения градиента скорости, который на рис 1.5, *б, в* выражается горизонтальным отрезком между кривыми *1—1'* и *2—2'.*

Особенностью многих псевдопластичных и пластично-вязких структурированных дисперсных систем коагуляционного типа является наличие петель гистерезиса при нагрузке и разгрузке (см. рис. 1.5). Материал начинает течь, когда напряжение достигает величины предельного или условно-предельного. В дальнейшем с увеличением напряжения, повышается градиент скорости и разрушается структурная сетка, разрушаются агрегаты и ориентируются частицы.

Каждому значению градиента скорости соответствует определенное равновесное состояние системы, которое достигается при медленных изменениях градиента скорости. В действительности опыт протекает быстро, возможны местные накопления деформаций или напряжений, которые не успевают релаксировать при переходе к следующему измерению, когда накладываются новые напряжения. Неоднократное прохождение зоны исследуемых напряжений в прямом и обратном направлениях позволяет добиться равновесного состояния продукта, при котором петли гистерезиса практически исчезают. Для тиксотропных псевдопластичных систем каждая последующая кривая располагается левее и выше предыдущей (см рис. 1.5, б), в пространственной системе координат $\eta_{эф}(\tau, \theta)$ все экспериментальные точки образуют криволинейную поверхность.

Площадь реограммы (см рис. 1.3, *а* и 1.5, б) между кривой $\gamma(\theta)$ и осью ординат представляет собой (в соответствующем масштабе) удельную мощность (на единицу объема в Вт/м^3). Она складывается из мощности ньютоновского течения (площадь между осью ординат и линией *0 – 5* на рис. 1.3, *а*) и мощности, требующейся при том же градиенте скорости для достижения данной степени разрушения структуры. Мощность, пропорциональная площади между двумя кривыми, образующими петли гистерезиса (см. рис 1.5. б), характеризует степень приближения системы к равновесному состоянию.

Во многих процессах продукт подвергается интенсивным механическим воздействиям (в насосах, мешалках и пр.), т.е. его структура достигает частичного или практически предельного разрушения. Поэтому при использовании результатов вискозиметрических исследований для практических расчетов следует хотя бы приближенно выбирать ту кривую течения, которая соответствует данной степени разрушения структуры. 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.

Компрессионные свойства. Эти свойства используются для расчета рабочих органов машин и аппаратов и для оценки качества продукта, например, при растяжении - сжатии. К ним относятся коэффициент бокового давления, коэффициент Пуассона, модули упругости и др. [см. формулы (1.4) - (1.14)]. Кроме того, ряд приведенных выше моделей – Максвелла, Кельвина и др. [см. формулы (1.17) - (1.23)] - могут описывать поведение продуктов 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 (в кг/м^3) для сравнительно небольшого объема определяют из соотношения:

$$\rho = M/V, \qquad (1.34)$$

где M - масса продукта, кг; V - объем продукта, м^3.

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

Между плотностью и удельным весом γ (в Н/м^3) существует простая зависимость:

$$\gamma = \rho g\,. \qquad (1.34а)$$

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

$$\rho = \sum_i c_i \rho_i \quad \text{или} \quad \rho = 1/\sum_i (c_i \rho_i), \qquad (1.34б)$$

где c_i - концентрация одного из компонентов в смеси, кг на 1кг смеси; ρ_i - плотность компонента, кг/м^3; i - число компонентов.

Поверхностные свойства (адгезия, липкость, коэффициент трения). Эти свойства занимают особое место среди структурно-механических свойств. Они характеризуют усилие взаимодействия между поверхностями конструкционного материала и продуктом при нормальном отрыве или сдвиге [см. уравнение (1.15)]. При этом для большинства продуктов пищевой промышленности липкость (адгезия) обусловливает величину усилия внешнего трения [см. уравнение (1.15а)].

Теоретически, особенно на молекулярном уровне, вопросы адгезии и внешнего трения не имеют еще должного завершения, а для пищевых продуктов такие разработки практически отсутствуют. Для объяснения адгезии существует несколько теорий: адсорбционная, электрическая, электромагнитная, диффузионная, термодинамическая и др.

В ряде случаев для двух- или многофазных систем установить границу разрушения затруднительно. Поверхность пластины после отрыва может быть смочена дисперсионной средой, либо на поверхности может находиться тончайшая пленка тонкодисперсной фракции исследуемого продукта.

В явлениях адгезии, как видно из предыдущего, участвует целый ряд

механизмов на молекулярном и надмолекулярном уровне, поэтому их детальный учет весьма затруднителен. Для практических целей достаточно описать общие макроскопические закономерности явления. Для этого можно провести расчеты на заранее выбранной модели, которая представляет собой образец «сложной жидкости» между двумя жесткими цилиндрическими пластинами, она обладает одинаковой с продуктом адгезией. Математически процесс отрыва пластины от продукта описывается следующим уравнением, если p_0 (в Па) представляет собой адгезию (липкость):

$$1 / p_0 = h / 2\alpha + C / \omega_c, \qquad (1.35)$$

где h - толщина слоя продукта между пластинами, м; α - коэффициент, аналогичный коэффициенту поверхностного натяжения, Н/м; C - коэффициент пропорциональности, зависящий от состава продукта, активности контактирующих групп, размера частиц, характеризующий темп убывания площади контакта, м^2/с; ω_c - скорость увеличения силы отрыва, Н/с, которая представляет собой отношение текущего значения силы к времени ее действия.

Уравнение (1.35) линейно и хорошо описывает адгезионное взаимодействие достаточно концентрированных дисперсных систем, дисперсионная среда которых состоит из водных прослоек (в пролойках могут быть растворены белки, соли и т. п.).

Внешнее трение пищевых продуктов зависит от липкости и ряда других факторов. Трение может быть статическим - до начала смещения и динамическим - при движении продукта по поверхности.

Для теоретического обоснования внешнего трения предложены молекулярно-кинетическая, механическая, физическая и другие теории, аналогичные теориям, объясняющим адгезию. Однако имеющиеся теоретические разработки пока не нашли воплощения для анализа внешнего трения пищевых продуктов.

Влияние технологических факторов (температуры, влажности и др.) на структурно-механические характеристики. Влияние этих факторов весьма существенно. Обобщение в теоретическом плане сделано для описания изменения в зависимости от температуры и влажности (содержания сухих веществ) двух фундаментальных свойств, плотности и вязкости.

Плотность жидкообразных систем при изменении температуры можно вычислить с помощью коэффициента температурного расширения β_t; (в 1/К), который показывает, на какую величину от первоначальной изменится объем системы V (в м^3) при изменении температуры на 1К:

$$\beta_t = (1/V)(dV/dt). \qquad (1.36)$$

Если считать коэффициент температурного расширения величиной постоянной в определенном интервале температур, то приведенная зависимость преобразуется в следующие расчетные формулы:

$$\beta_t = \frac{1}{\rho_t}\frac{\rho_c - \rho_t}{t - t_c} \text{ или } \qquad \rho_t = \frac{\rho_c}{1 + \beta_t(t - t_c)}, \qquad (1.36а)$$

где ρ_c - плотность при температуре t_c; кг/м^3; ρ_t - плотность при более высокой температуре t, кг/м^3.

Среднее значение коэффициента температурного расширения для многих водно-белковых систем в интервале температур 40-95°С такое же, как и для воды: $56 \cdot 10^{-5}$ 1/К.

Плотность жидкообразных белковых систем ρ_c (в кг/м^3) (мясной бульон, кровь, молоко, соки и т.п.), содержащих большое количество воды, может быть вычислена по зависимости:

$$\rho_c = \rho_{0t} + ac, \qquad (1.36б)$$

где ρ_c - плотность при фиксированной температуре t_c (в К) и концентрации c, килограмм сухого вещества на килограмм продукта; ρ_{0t} - плотность при концентрации, равной нулю, и той же температуре, кг/м^3; a - эмпирический коэффициент, кг/м^3.

Вязкость жидкообразных систем при изменении температуры описывают уравнением Френкеля - Эйринга, имеющим теоретическое обоснование:

$$\eta = A exp[E/(RT)], \qquad (1.37)$$

где A - постоянная, Па·с; E - энергия активации, кДж/кмоль; R - универсальная газовая постоянная, 8,32 кДж/(кмоль·К); T - абсолютная температура жидкости, К.

Для неньютоновских степенных жидкостей уравнение (1.37) принимает вид, аналогичный (1.29а):

$$\eta_{эф} = A\{exp[E/(RT)]\}(\dot{\gamma}/\dot{\gamma}_1)^{-m}. \qquad (1.37а)$$

Уравнение Бачинского имеет некоторые теоретические обоснования, сделанные А.С. Предводителевым, М.Ф. Широковым и др. Уравнение связывает температурные изменения вязкости с изменением удельного объема:

$$\eta = v/(v - \omega), \qquad (1.38)$$

где v - удельный объем жидкости, $v=1/\rho$, м^3/кг; ω и v предельный объем и модуль вязкости, зависящие от свойств жидкости, м^3/кг и м^2/с соответственно; предельный объем лежит в пределах между удельным объемом жидкости и твердого тела.

Хорошие результаты при обобщении экспериментальных данных дают простые эмпирические зависимости:

$$\eta = a_1 t^{-a_2} \text{ или } \qquad \eta = a_1 (t/t_{пр})^{-a_2}, \qquad (1.39)$$

где a_1 и a_2 - эмпирические коэффициенты, в первом уравнении a_1 имеет размерность Па·с·К^{a2}, во втором - Па·с; коэффициент a_2 безразмерный; t - температура жидкости, К; $t_{пр}$ - температура приведения, К.

Температурно-инвариантные характеристики вязкости по предложению А.М. Маслова широко используют для некоторых пищевых продуктов:

$$lg\frac{B_0^* T_{пр}\rho_{пр}}{B_{0\,пр}^* T\rho} = -\frac{a\left(T - T_{пр}\right)}{b + \left(T - T_{пр}\right)}, \qquad (1.40)$$

где B_0*, $B_{0пр}$* - эффективная вязкость при единичном значении градиента скорости [см. уравнение (1.29а)] или ньютоновская вязкость, Па·с; T, $T_{пр}$ - абсолютная температура жидкости, К; ρ, $\rho_{пр}$ - плотность жидкости, кг/м^3; a, b - эмпирические коэффициенты; a=1,975, b=162К; индекс «*пр*» означает, что вязкость и плотность отнесены к некоторой температуре приведения, которая подбирается эмпирически.

Для выполнения расчетов уравнение (1.40) можно представить в виде:

$$a_T = \frac{B_0^* T_{пр}\rho_{пр}}{B_{0\,пр}^* T\rho}; \quad lg\, a_T = -\frac{a\left(T - T_{пр}\right)}{b + \left(T - T_{пр}\right)}, \qquad (1.40а)$$

затем вычислить lga_T, определить антилогарифм, т.е. найти a_T, и далее - вязкость при заданной температуре.

Уравнение (1.40) в широком температурном диапазоне может не быть линейным, тогда для определения вязкости следует пользоваться графическими зависимостями или аппроксимировать отдельные участки кривой прямолинейными отрезками. Температурные изменения предельного напряжения сдвига иногда можно описать аналогичными зависимостями, а в малом диапазоне температур оказываются справедливы линейные уравнения.

Температурные зависимости других реологических характеристик иногда могут не иметь монотонного изменения и описываются для каждого продукта своими уравнениями. Например, при повышении температуры липкость колбасного фарша увеличивается, достигает максимума и затем начинает уменьшаться.

Увеличение влажности *(W,* кг влаги на 1кг продукта) или, что то же самое, уменьшение концентрации сухих веществ (с, кг сухих веществ на 1кг продукта) приводит к монотонному уменьшению сдвиговых свойств, однако липкость при определенной влажности может иметь максимальное значение. Эти изменения могут быть описаны экспоненциальными, степенными или линейными зависимостями и др.

Существенный интерес представляют формулы Эйнштейна – Гатчека, имеющие теоретическое обоснование:

$$\eta = \eta_{д.с}\left(1 + 4{,}5 v_{д.ф}\right); \qquad (1.41)$$

$$\eta = \eta_{д.с}\frac{\left(1/v_{д.ф}\right)^{1/3}}{\left[\left(1/v_{д.ф}\right) - 1\right]^{1/3}} = \frac{\eta_{д.с}}{\left(1 - v_{д.ф}\right)^{1/3}}, \qquad (1.42)$$

где $\eta_{д.с}$ - вязкость дисперсионной среды, Па·с; $V_ф/V=v_{д.ф}$ - объемная

концентрация дисперсной фазы в системе, $м^3/м^3$: $V_ф$ - объем дисперсной фазы, включая объем сольватных оболочек, $м^3$; V - объем системы, $м^3$.

Применимость формул для того или иного продукта определяется экспериментально; например, формула (1.41) хорошо описывает зависимость вязкости молока от количества дисперсной белково-жировой фазы.

Влияние влажности на другие структурно-механические свойства может быть неоднозначным. Например, при увеличении влажности мучного теста, колбасного фарша значения липкости проходят через максимум.

Влияние на структурно-механические свойства различных технологических факторов, например продолжительности хранения, степени механической обработки дисперсности и кислотности, специфично для каждого продукта и будет рассмотрено в соответствующих разделах.

ВОПРОСЫ К ГЛАВЕ 1

1. Какие принципы положены в основу классификации реальных тел?
2. На какие группы подразделяют дисперсные пищевые продукты и сырье?
3. Назовите основные формы связи влаги с сырьем и продуктами.
4. Проведите классификацию продуктов и сырья, основанную на специфических особенностях формы связи влаги с продуктом.
5. Изобразите механические модели простейших реологических тел.
6. Какова специфика закономерностей релаксации напряжений в многофазных системах?
7. Проанализируйте модель твердого тела Фойгта - Кельвина.
8. В чем сущность обобщенной классификации реальных тел (по величине механических свойств)?
9. Проанализируйте реологические кривые для твердообразных дисперсных систем.
10. В чем особенность изменения эффективной вязкости у псевдопластичных и дилатантных систем?
11. Каким уравнением описывают зависимость вязкости жидкообразных систем от температуры?
12. Какой вид принимает эта зависимость для неньтоновских степенных жидкостей?

2. МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

Классификация методов и приборов для измерения структурно-механических характеристик

Приборы для измерения значений каждой группы свойств (сдвиговых, компрессионных и поверхностных), имеют свою специфику. В соответствии с ней, механические измерительные приборы для измерения структурно-механических свойств пищевых продуктов содержат устройства для регистрации усилий, деформаций, времени и энергии.

По виду измеряемой величины реологические приборы делят на четыре группы (табл. 2.1). Эта классификация в определенной мере условна, так как некоторые приборы позволяют варьировать две величины при постоянной третьей.

Таблица 2.1

Классификация методов измерения реологических характеристик

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

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

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

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

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

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

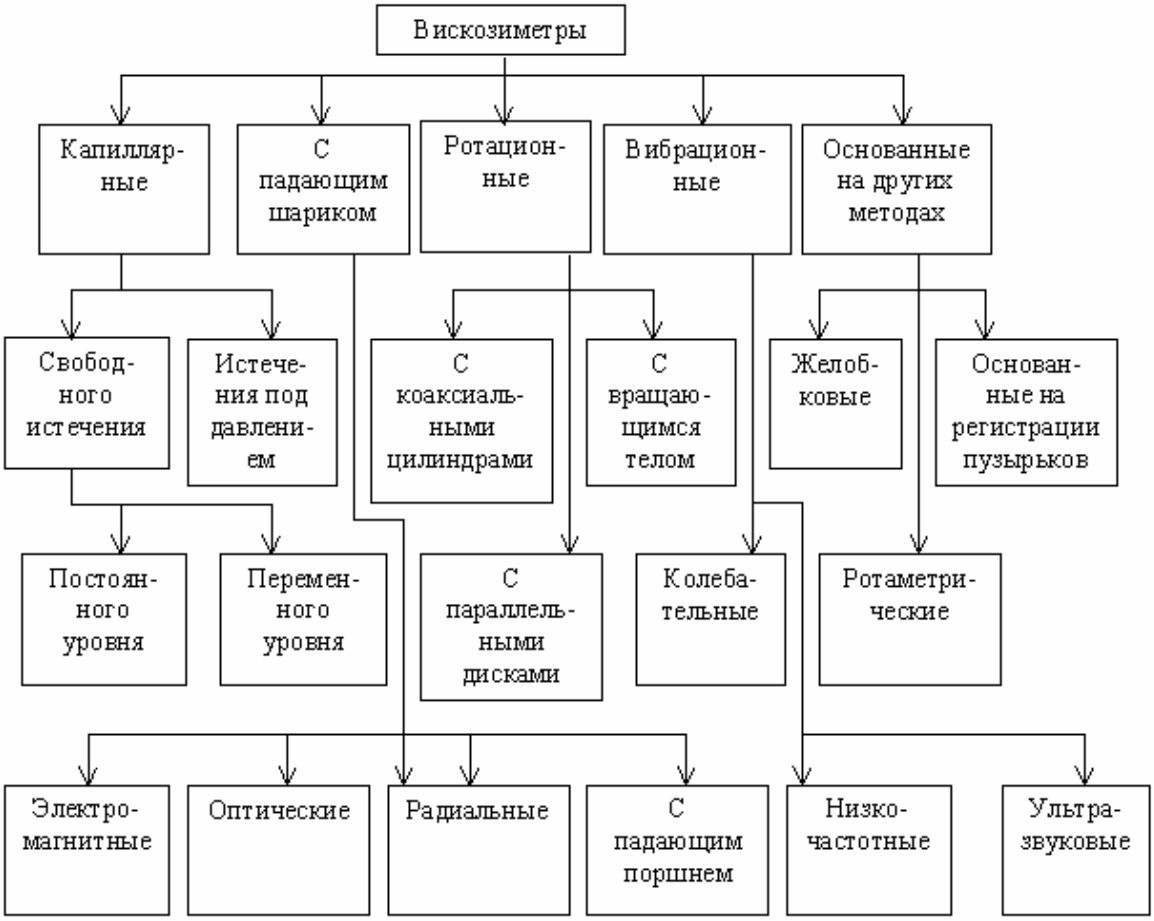

Рис. 2.1. Классификация вискозиметров

Классификация вискозиметров представлена на рис. 2.1. Наибольшее распространение в исследованиях пищевых продуктов получили следующие вискозиметры: ротационные, капиллярные и с падающим шариком.

Методы и приборы для измерения сдвиговых характеристик

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

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

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

Ротационные вискозиметры

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

Принципиальные схемы ротационных вискозиметров показаны на рис.2.2. Они могут иметь одну геометрическую форму: коаксиальные цилиндры (рис. 2.2, *а*), сферы или полусферы (рис.2.2, *б*), два конуса (рис.2.2, *б*), две плоскопараллельные пластины (рис.2.2, *г*), два плоских кольца (рис.2.2, *д*) или два конических кольца (рис.2.2, *к*). Рабочий зазор или рабочий орган может быть комбинированным, т. е. состоять из двух различных поверхностей: цилиндр - диск (рис.2.2, *е*), цилиндр - полусфера (рис. 2.2, *ж*), конус - диск (рис. 2.2, *з*), цилиндр - конус (рис.2.2, *и*), цилиндр – конус - диск (рис.2.2, *л*) и др. Между рабочими поверхностями находится исследуемый продукт, сила сопротивления внутри которого при вращении одной из поверхностей измеряется. Момент сопротивления можно измерять двумя способами: на вращающейся поверхности, тогда вторая поверхность закрепляется жестко, и, вращая одну поверхность, тогда другая соединяется с

динамометром.

Наибольшее распространение в пищевой промышленности получили коаксиально-цилиндрические комбинированные поверхности для измерения характеристик вязких и пластично-вязких продуктов (см. рис.2.2, *о, ж, л*).

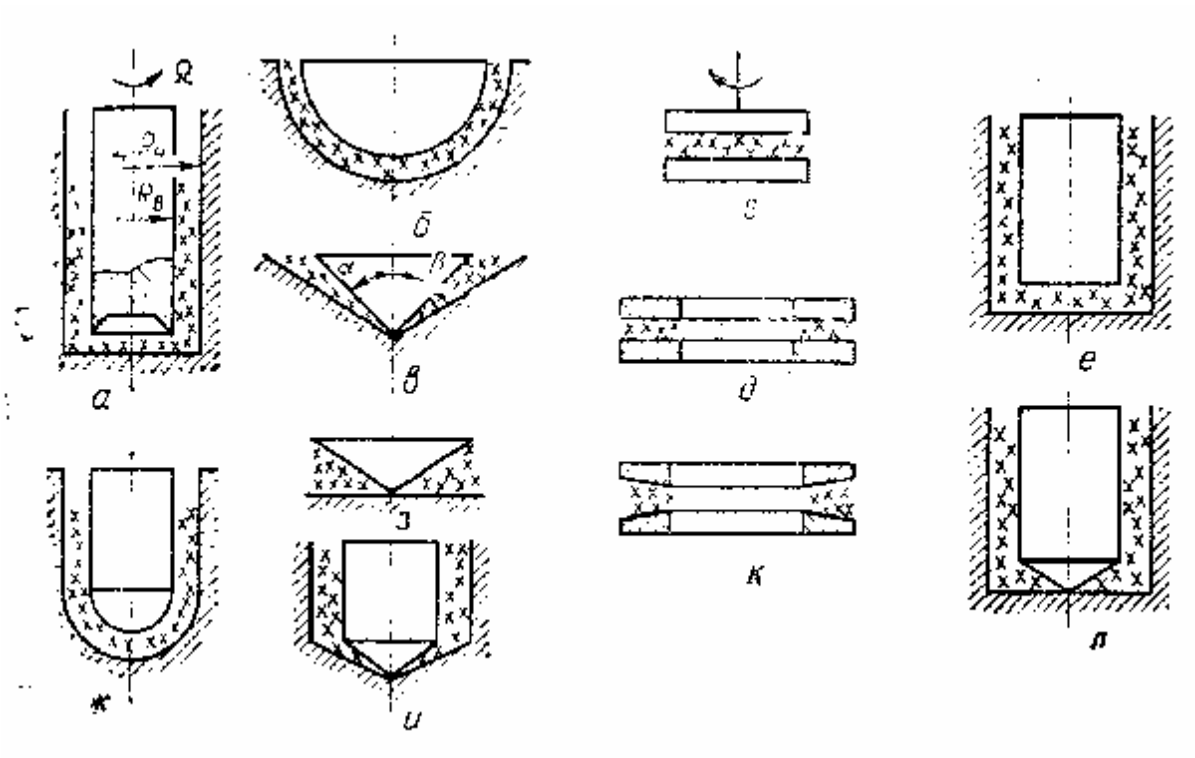

Рис. 2.2. Принципиальные схемы ротационных вискозиметров

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

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

При исследовании пищевых масс часто применяют ротационные вискозиметры РВ-4, РВ-7, РВ-8, разработанные М. П. Воларовичем (рис.2.3).

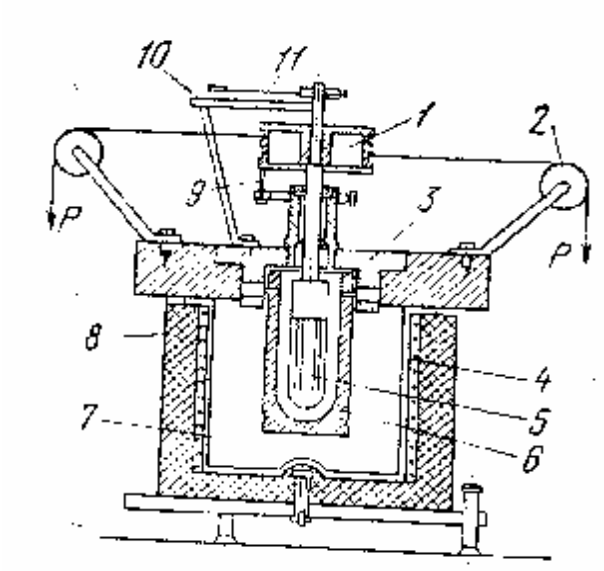

Рис. 2.3. Вискозиметр РВ-8 системы М. П. Воларовича: 1 - шкив; 2 — блоки; 3 - установочная гайка; 4 - стакан для термостатирующей жидкости; 5 - ротор, 6 - стакан; 7 - спираль электронагрева; 8 - изоляция; 9 - стопор; 10 - шкала; 11 - стрелка

Для случая, когда сдвиг распространяется на всю толщину исследуемой массы, заключенной между двумя цилиндрами, М.П. Воларовичем предложены формулы для определения квазиньютоновской (эффективной) вязкости $\eta_{эф}$ (в Па·с) и предельного напряжения сдвига θ_0 (в Па) по модели Шведова - Бингама (1-25):

$$\eta_{эф} = KM/N,\ \theta_0 = K_0 M_0 \quad , \qquad (2.1)$$

где K и K_0 - константы прибора, зависящие от его геометрических размеров и высоты, на которую загружается исследуемый продукт, $м^{-1}с^{-2}$, $м^{-1}с^{-2}$; M - масса вращающих ротор грузов, кг (за вычетом величины, компенсирующей трение в подшипниках); N - частота вращения ротора, об/с, M_0 - масса грузов, при которой начинается сдвиг, кг.

Постоянные в приведенных формулах определяют по зависимостям, в которые входит поправка на сферический торец ротора:

$$K = \frac{gR_{шк}}{8\pi^2\left(\dfrac{R_н^2 R_в^2}{R_н^2 - R_в^2}h + \dfrac{R_н^3 R_в^3}{R_н^3 - R_в^3}\right)}; \qquad (2.2)$$

$$K_0 = \frac{gR_{шк}}{2\pi R_в^2\left(h + \pi R_в / 4\right)} \quad , \qquad (2.2а)$$

где $R_{шк}$ радиус шкива, м ($R_{шк}$=0,02235 м); $R_н$—внутренний радиус стакана, м ($R_н$ =0,019 м); $R_в$ - радиус ротора, м ($R_в$ =0,01605 м); h - глубина погружения ротора в продукт, м; g - ускорение свободного падения, $м/с^2$.

В скобках даны размеры деталей РВ-8; для различных выпусков прибора возможны некоторые изменения размеров.

Для комбинированных измерительных поверхностей, например для полусферо-цилиндрической, вязкостную константу R можно считать по цилиндрической поверхности:

$$K = \frac{gR_{шк}}{8\pi^2 \dfrac{R_н^2 R_в^2}{R_н^2 - R_в^2} h_{пр}}, \qquad (2.3)$$

где $h_{пр} = h + h_{экв}$; $h_{экв} = (R_в + R_н)/3$.

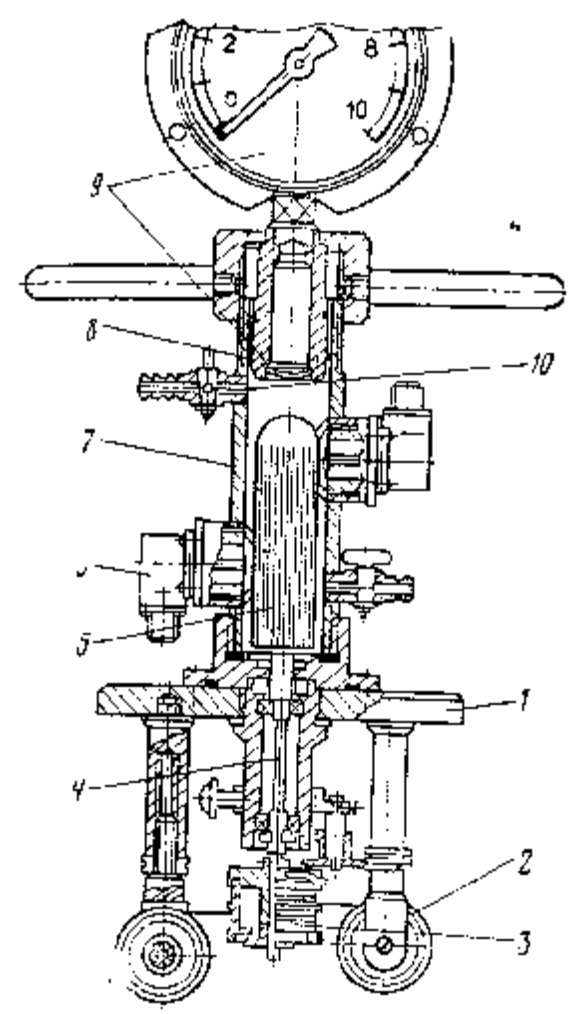

Рис. 2.4. Ротационный вискозиметр МТИММПа для измерения реологических свойств при повышенном давлении:
1 – станина; 2 – шкивы; 3 – барабан;
4 - хвостовик ротора; 5 – ротор;
6 - тензодатчики давления;
7 - неподвижный стакан; 8 – поршень;
9 - мембрана с манометром;
10 - контрольный краник

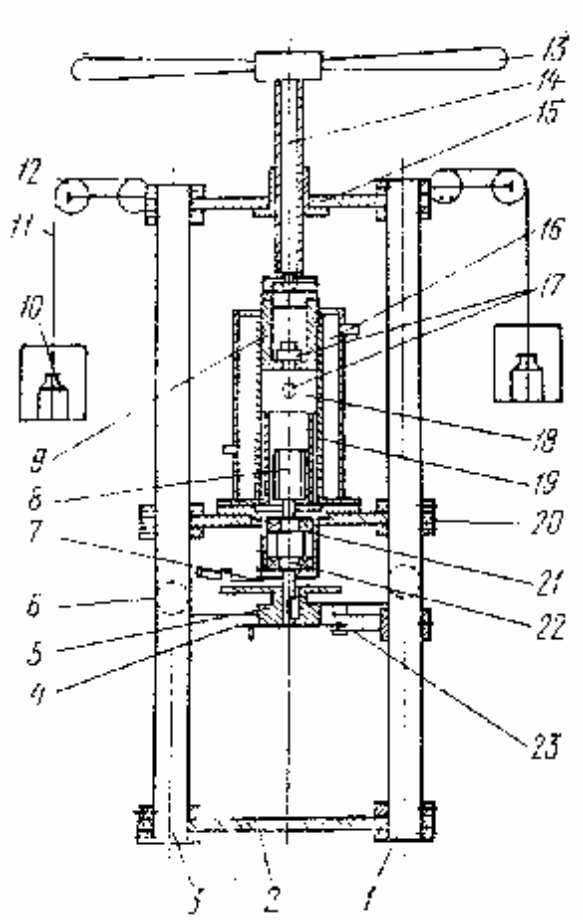

Рис. 2.5. Вискозиметр МТИПП РМ-1
1 -стоика, 2 - плита; 3 – стойка;
4 - перфорированный диск;
5 – шкив; 6 – блок; 7 – фиксатор;
8 - ротор, 9 – поршень; 10 – груз;
11 – нить; 12 – блок; 13 – рукоятка;
14 – винт; 15 – плита;
16 - термостатирующая рубашка;
17 - тензометрические датчики давления; 18 - рабочая камера;
19 - рифленая втулка;
20 – основание; 21 - опорный узел;
22 - приводной валик;
23 – кронштейн

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

Для исследования структурно-механических свойств при повышенных давлениях в МТИММПе на базе вискозиметра РВ-4 (рис. 2.4, позиции 1, 2, 3) сконструирован -новый измерительный узел (позиции 4 - 10). Размеры вискозиметра - диаметр ротора 32мм, внутренний диаметр стакана 38мм. Новый измерительный узел отличается от РВ-4 следующим. Стакан (статор) неподвижен, вращается рифленый ротор, который выточен вместе с хвостовиком из одной заготовки.

Давление в стакане создается за счет ввинчивания поршня, который снабжен упругой мембраной и манометром для измерения давления. В рабочем зазоре давление измеряется тензометрическими датчиками. Для измерения при высокой частоте вращения прибор может подключаться к гидроприводу.

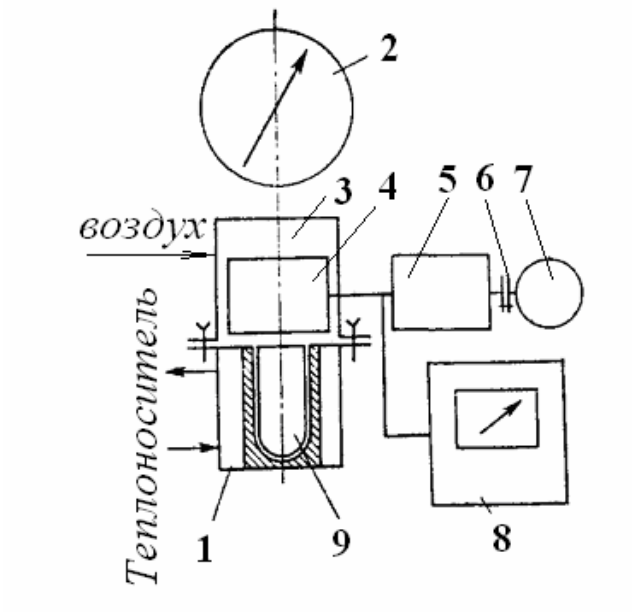

Рис. 2.6. Вискозиметр МТИППа РМ-2:
1 - наружный цилиндр; 2 – манометр;
3 - герметичный кожух;
4 - измерительный сельсин;
5 - силовой сельсин; 6 - муфта;
7 - двигатель; 8 - измерительный блок, 9 - внутренний цилиндр

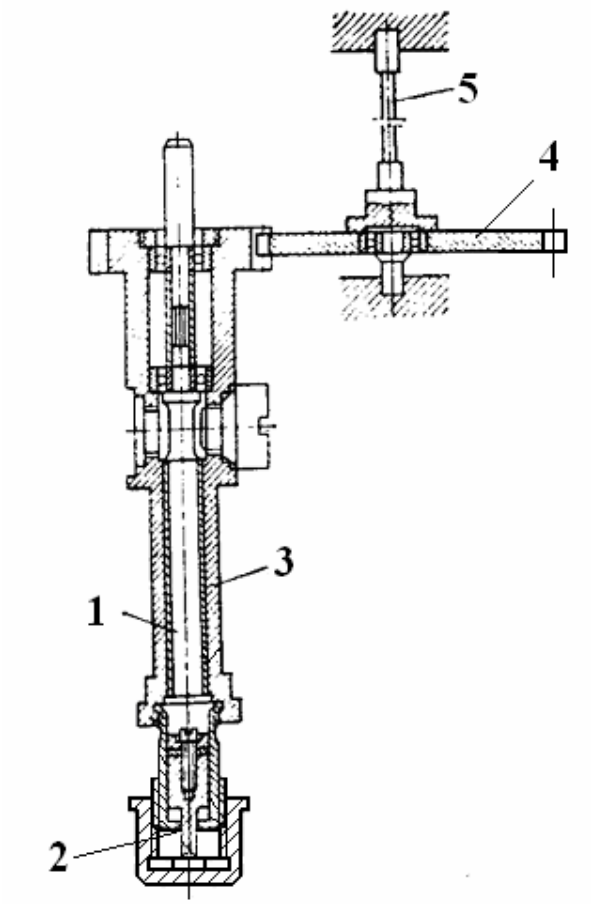

Рис. 2.7. Рабочая головка вискозиметра В. П. Павлова:
1 - внутренний ротор; 2 - ручной пресс; 3 - внешний цилиндр; 4 – шестерня; 5 - торсионный подвес

В МТИППе создан ротационный вискозиметр РМ-1 (рис. 2.5) На основании установлены рабочая камера и опорный узел. Внутри камеры запрессована рифленая втулка 19 ($R_н$ = 22·10^{-3}м), наличие которой устраняет возможность проскальзывания продукта. Сменный ротор 8 [$R_в$=(10; 12,5; 15; 18) ·10^{-3} м, h = 0,05м] установлен на приводном валике. Давление в исследуемой массе создается посредством поршня с уплотнительными кольцами. Регистрация избыточного давления осуществляется тензометрическими датчиками. Угол поворота ротора измеряется при помощи фотоэлектрического датчика.

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

Техническая характеристика - пределы измерения - эффективная вязкость 10^2 - 10^7 Па·с; напряжение сдвига 10 - 4·10^4 Па; скорость сдвига 0 - 100с$^{-1}$, избыточное давление 0 - 1·10^5 Па, габаритные размеры, м: 0,53х0,255х0,69.

Для исследования реологических свойств маловязких пищевых материалов под давлением или вакуумом в МТИППе создан ротационный вискозиметр РМ-2 (рис. 2.6), который состоит из наружного неподвижного цилиндра ($R_н$=0,03м) с рубашкой для поддержания необходимой температуры и внутреннего цилиндра (ротора) ($R_в$=0,025м, h=0,09м), связанного с валом измерительного сельсина. Вращение измерительного сельсина происходит благодаря электромагнитной связи с силовым сельсином, жестко через муфту связанным с двигателем. Напряжение, возникающее при торможении измерительного сельсина, пропорционально углу рассогласования сельсинов, т.е. пропорционально моменту сопротивления, приложенному к внутреннему цилиндру от исследуемого материала, находящегося в зазоре между цилиндрами 1 и 9. Сигнал рассогласования поступает в измерительный блок 8. Измерительный сельсин крепится в кожухе, который герметично соединен с наружным цилиндром. В герметическую камеру поступает сжатый воздух или газ под давлением, которое контролируется манометром. Если подключить камеру к вакуум-насосу, то можно создавать в ней разрежение.

Техническая характеристика: пределы измерения — эффективная вязкость 10 - 2·10^{2}Па·с; напряжение сдвига 5 - 50Па; скорость сдвига 0 – 100с$^{-1}$; габаритные размеры, м: 0,25х0,4х0,6.

На рис. 2.7 представлена схема вискозиметра системы В.П. Павлова. Вискозиметр имеет постоянную скорость вращения, ступенчато изменяемую при помощи коробки передач. Вращение от синхронного электродвигателя передается внутреннему ротору вискозиметра. В зазор шириной 0,25 мм, образованный ротором и внешним цилиндром, подается при помощи ручного пресса исследуемая масса. Цилиндр 3 посредством шестерни 4 связан с торсионным проволочным подвесом 5; напряжение, создаваемое крутящим

моментом, уравновешивает напряжение, возникающее в деформируемом материале. Скорость сдвига может изменяться от 0,4 до 3000 $с^{-1}$.

Кроме отечественных приборов в пищевой промышленности для исследовательских целей все более широко применяют ротационные вискозиметры производства Германии. Одной из моделей является «Реотест КУ», выпускавшийся фирмой «Прюфгеретеверке». Схема этого ротационного прибора представлена на рис. 2.8.

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

Показания прибора 8 прямо пропорциональны измеряемому моменту, а также напряжению сдвига и вязкости исследуемого материала. Частота вращения синхронного электродвигателя зависит от напряжения тока в сети и ее нагрузки. Отклонения от номинальной частоты 50Гц фиксируются прибором 7. Методика расчета приведена в паспорте.

Техническая характеристика: пределы измерения - вязкость 10^{-2} - 10^{4}Па·с; скорость деформации (0,1667—1,458)$10^{3}с^{-1}$; напряжение сдвига 12 - $3{\cdot}10^{3}$Па; температура –30 - +150°С; погрешность измерений ±3% (для ньютоновских жидкостей).

Эффективную вязкость определяют как отношение напряжения к скорости деформации [см. формулу (1.16а)].

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

Эта же фирма выпускает ротационный вискозиметр типа КМ (рис. 2.9). Вискозиметр состоит из измерительного прибора, измерительной головки с вращающимся ротором и термостатирующего сосуда. Рукоятка 14 служит для установки требуемой частоты вращения ротора. Изменение скорости может производиться как при остановке, так и во время работы вискозиметра. Температура контролируется по термометру.

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

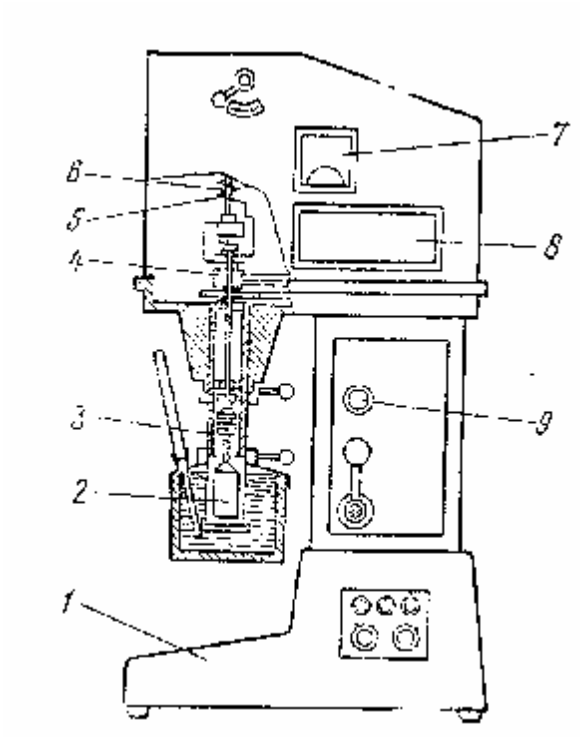

Рис. 2.8. Вискозиметр «Реотест КУ»:
1 - станина; 2 - внутренний цилиндр; 3 - наружный цилиндр; 4 - ведомый вал; 5 - спиральная пружина;
6 - ведущий вал; 7 - измеритель частоты; 8 - измеритель крутящего момента; 9 - указатель скорости вращения

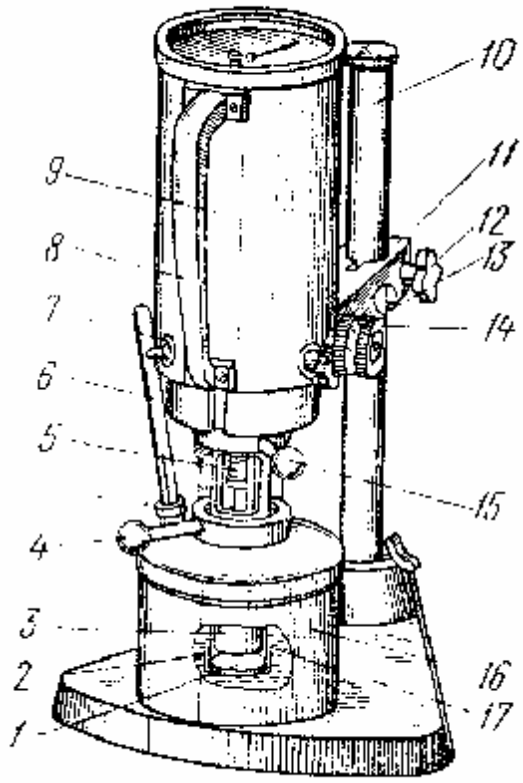

Рис. 2.9. Вискозиметр типа КХ:
1 - крышка; 2 - запорная гайка;
3 - вращающийся ротор; 4 – рычаг;
5 – муфта; 6 - термометр;
7 - выключатель; 8 - рукоятка;
9 - измерительный прибор;
10 – штатив; 11 - кронштейн;
12 - зажимной винт; 13 - упор;
14 - рукоятка изменения скорости вращения; 15 - зажимной рычаг;
16 - термостатирующий сосуд;
17 - неподвижный цилиндр

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

Техническая характеристика: пределы измерения - вязкость от 10^{-2} до 420Па·с (включая применение свободно вращающегося ротора), напряжение 5,0 - 1500Па; скорость сдвига 5 - 492$с^{-1}$; частота вращения ротора 16, 40, 80 и 160об/мин; температура от -30 до +120°С, погрешность (для ньютоновской жидкости) - измерительные устройства N и M: ±3%; H: ±5%; габаритные размеры со штативом, м: 0,25х0,28х0,44.

Вискозиметры капиллярные и с падающим шариком

Принципиальные схемы капиллярных вискозиметров для ньютоновских и неньютоновских продуктов показаны на рис. 2.10. Общим для всех приборов этого типа является наличие капилляра, устройства для измерения расхода или объема жидкости и системы, обеспечивающей создание гидростатического давления. В качестве капилляра может быть использована трубка диаметром от долей миллиметра до 2 - 3мм для измерения вязкости ньютоновских и маловязких неньютоновских жидкостей. Получаемые результаты, как правило, инвариантны, т.е. не зависят от диаметра трубки. Для неньютоновских жидкостей с более высокой вязкостью и пластично-вязких систем диаметр капилляра может достигать нескольких десятков миллиметров, а результаты измерений часто зависят от диаметра, т.е. неинвариантны. Диаметр капилляра входит в теоретически полученные формулы для соответствующих моделей тел.

Наиболее простые, традиционные и вместе с тем универсальные капиллярные вискозиметры Оствальда (рис. 2.10, а) и Уббелоде (рис. 2.10, б) имеют капилляр и два полых шарика для жидкости. Движущая сила процесса истечения - перепад давлений - в вискозиметре Оствальда обусловлена разностью высот жидкости, в вискозиметре Уббелоде — вакуумом или давлением в одном колене трубки. При измерениях приборы помещают и водяную баню.

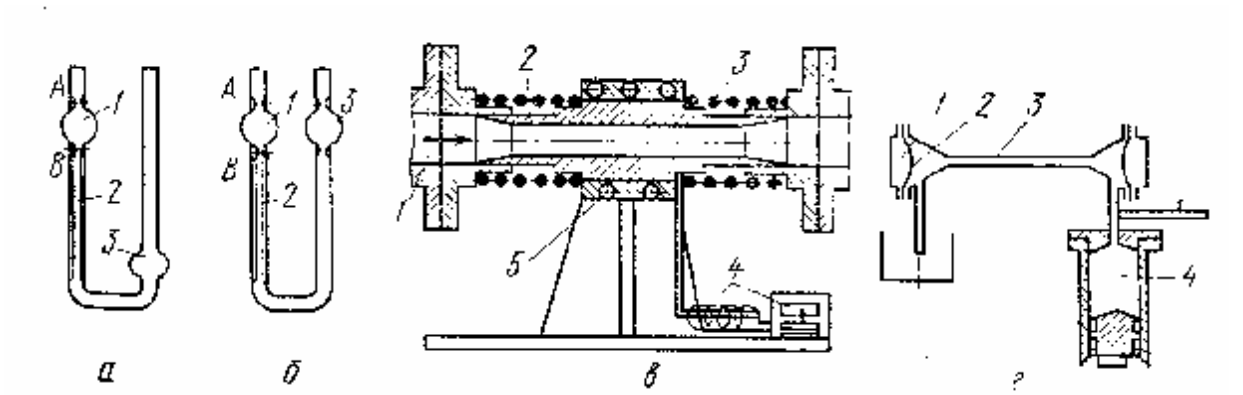

Рис. 2.10. Принципиальная схема капиллярных вискозиметров для вязких жидкообразных продуктов:

а - Оствальда; *б* – Уббелоде: 1- шарик для измерения объема протекающей через капилляр жидкости; 2 - капилляр; 3 - шарик для сбора жидкости для пластично-вязких (неньютоновских) продуктов; *в* - вискозиметр Горбатова, Сухановой и др.: 1 - магистральный трубопровод; 2 - подвижный капилляр;

3 - упругие элементы (сильфоны, пружины); 4 - индукционный датчик перемещения капилляра с регистрирующим прибором; 5 - импульсный подогреватель для удаления жировой пленки; *г* - вискозиметр постоянного расхода Г.В. Виноградова и др.: 1 - буферная жидкость для измерения перепада давления; 2 - мембрана; 3 - капилляр; 4 - цилиндр с поршнем для продукта

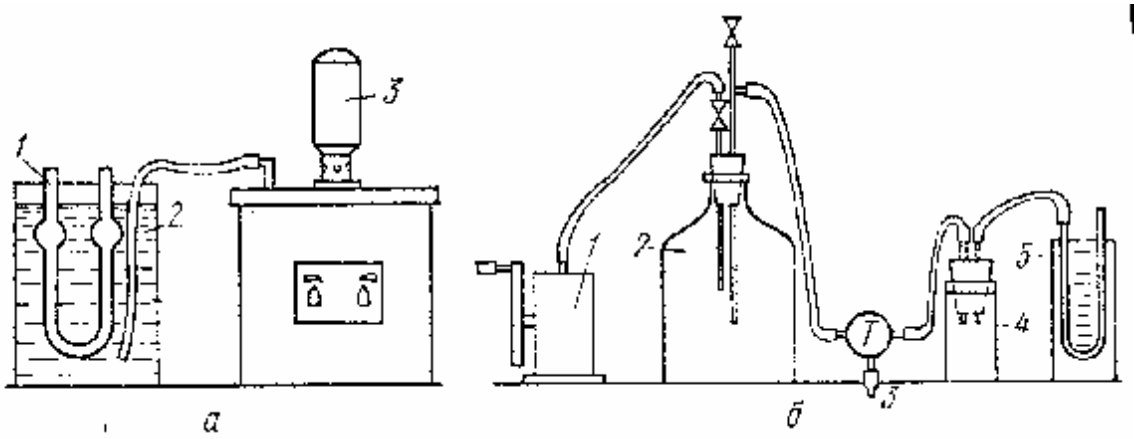

Рис. 2.11. Стенды для измерения вязкости:
а - при различных температурах: 1 - вискозиметр; 2 - сосуд для термостатирующей жидкости; 3 - ультратермостат; *б* - при различных напряжениях сдвига: 1 - воздушный насос; 2 - бутыль-моностат; 3 - трубка к вискозиметру; 4 - ловушка для жидкости; 5 - жидкостный манометр

Вискозиметр А. В. Горбатова, С. И. Сухановой и др. (рис. 2.10, *в*) встраивается в технологический трубопровод для пластично-вязких продуктов. При прохождении продукта через капилляр под действием сил внутреннего трения — напряжения на стенке трубы — происходит его осевое смещение, которое регистрируется датчиком перемещений и записывается прибором Внутренняя сила, вызывающая перемещение, компенсируется пружинами или сильфонами, которые могут иметь разную жесткость.

Вискозиметр постоянного давления Г.В. Виноградова и др. (рис. 2.10, *г*) обеспечивает протекание жидкости по капилляру при постоянном давлении с помощью буферной жидкости, отделенной от исследуемого продукта упругой мембраной. Продукт в капилляр подается из цилиндра с поршнем.

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

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

Измерительный стенд (рис. 2.11, *а*) состоит из вискозиметра, помещенного в открытый или герметический сосуд, и ультратермостата. Термостатирование исследуемой жидкости в приборе занимает 10 - 30мин, что определяется ее объемом. За это время ее температура достигает температуры жидкости в термостате и одновременно восстанавливается структура. При кратковременном термостатировании температурные ошибки дают существенные отклонения вязкости от истинных ее значений.

При измерениях вискозиметрами Уббелоде необходимо с одной стороны капилляра создавать давление или вакуум. Для этого используют установку (рис. 2.11, *б*), состоящую из воздушного насоса, который может работать как компрессор или вакуум-насос; бутыли-моностата объемом 8 - 10л с пробкой; U-образного жидкостного манометра или микроманометра; сосуда, который является ловушкой жидкости, выбрасываемой из манометра, и трехходового крана для регулирования подачи воздуха. Перед началом измерения давление во всех емкостях должно быть выравнено. Использование избыточного давления при течении жидкости по капилляру создает возможность турбулизации потока, поэтому необходимо проводить проверку на ламинарность по критерию Рейнольдса.

При вычислении констант прибора по уравнению Пуазейля

$$Pd / (4l) = \eta 8w / d, \qquad (2.4)$$

где p - гидростатическое давление, Па; d - внутренний диаметр капилляра, м; l - длина капилляра, м; η - динамическая вязкость, Па·с; w - средняя скорость жидкости, м/с, следует иметь в виду, что геометрические измерения необходимо проводить с чрезвычайно высокой точностью. Поэтому предпочтительнее капиллярные вискозиметры градуировать по эталонной жидкости.

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

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

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

$$\eta = K_t \rho \tau, \qquad (2.5)$$

где K_t - водная константа прибора при температуре измерения, $м^2с^2$; ρ - плотность жидкости при температуре заливки, $кг/м^3$; τ - время истечения, с.

Вискозиметр Уббелоде можно использовать как относительный и абсолютный. В первом случае его градуируют по эталонной жидкости; во втором - в соответствии с уравнением Пуазейля определяют константы; их можно определить комплексно, исходя из данных предварительной градуировки и непосредственных геометрических измерений. Для вычисления вязкости используют формулы (2.4) и (1.3а) или:

$$\eta = \eta_в p \tau / (p_в \tau_в), \qquad (2.6)$$

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

Меняя давление истечения $p_в$, можно построить градуировочные реограммы, которые позволяют вычислить константы для рабочих

измерений. Аналогичные графики строят для результатов измерений исследуемой жидкости. Существенное значение имеют графики $p\tau=f(p)$, 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.

Горизонтальный вискозиметр ВК-4 в работе и градуировке подобен вискозиметру Уббелоде. Он предназначен для измерения вязкости крови и имеет две калиброванные трубки. Каждая трубка состоит из двух широких капилляров с миллиметровой шкалой, которые служат резервуарами для жидкости. Между ними помещен узкий измерительный капилляр. Для термостатирования исследуемой жидкости обе трубки помещают в широкую стеклянную трубу, закрытую с торцов пробками, через которые выходят трубки. В трубу подается термостатирующая жидкость. Преимущество такой конструкции: малое количество жидкости и поэтому небольшое время термостатирования; отсутствие поправок на изменение гидростатического давления и объема; устойчивый ламинарный режим в широком диапазоне давлений; сравнительно большое время истечения жидкости. Так же как у вискозиметра Уббелоде, измерения можно проводить при прямом и обратном движении жидкости в капилляре. Это очень существенно для белковых структурированных жидкостей (кровь, молоко, бульон и др.), так как позволяет избежать разрушений структурных связей при холостом ходе.

Для измерения предельного напряжения сдвига может быть использован прибор А. А. Симоняна, у которого вдвигание поршня в трубу с одной стороны вызывает свободное истечение продукта с другой стороны, а усилие, необходимое для истечения, воспринимается мембраной и определяется по ее деформации. Пластическое течение начинается, когда усилие на поршень равно сопротивлению цилиндрического слоя вдоль стенки трубы. Устойчивость показаний прибора обеспечена достаточной площадью поверхности сдвига (около 170см^2).

В момент начала движения градиент скорости равен нулю, тогда условие равновесия продукта в цилиндре запишется в виде равенства сил - вдоль стенки поверхности трубы и движущей силы давления, прикладываемой к поршню [левая часть уравнения (2.6)]:

$$\theta_0 = pd/(4l) = K\delta\ , \qquad (2.7)$$

где K - константа прибора, учитывающая его размеры и градуировочные показатели мембраны, Па/м; δ - величина прогиба мембраны, м.

Общая ошибка измерений не превышает 10%.

Широкое распространение получили автоматические вискозиметры АКВ-3 и АКВ-5. Прибор (рис. 2.12) состоит из камеры, заполняемой исследуемой массой и заканчивающейся капилляром. В камеру входит шток,

проталкивающий массу через капилляр; шток движется вниз под давлением пружины. В шток вставляется держатель карандаша, последний производит запись перемещения штока на барабане, который приводится в движение от синхронного двигателя. При записи получают кривые, по которым определяют пластично-вязкие характеристики исследуемой массы. Методика экспериментов и обработки данных приведена в описании, прилагаемом к прибору.

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

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

Из шариковых вискозиметров, выпускаемых промышленностью, наиболее распространены вискозиметры Гепплера (рис. 2.13). Хотя закон Стокса, которым описывается движение шарика, здесь соблюдается частично, они позволяют довольно точно измерять вязкость. Шарик движется в наклонной трубке, образуя узкую щель со стенкой. У структурированной жидкости при проходе через щель структурные связи разрушаются, поэтому точного воспроизведения результатов в двух последовательных замерах может и не быть. Прибор проградуирован для измерения вязкости ньютоновских или слабоструктурированных жидкостей в диапазоне от $3 \cdot 10^{-4}$ до 60Па·с. Паспортная ошибка измерения не превышает 0,5% для лабораторной модели. Прибор неприменим для систем, имеющих предельное напряжение сдвига.

Расчетная формула для вычисления вязкости:

$$\eta = K(\rho_ш - \rho)\tau , \qquad (2.8)$$

где K – константа прибора, м^2/с^2; $\rho_ш$ – плотность материала шарика, кг/м^3; ρ - плотность жидкости при температуре измерения, кг/м^3; τ - время перемещения шарика на участке h, с.

Расчет проводят с учетом данных, приведенных в литературе.

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

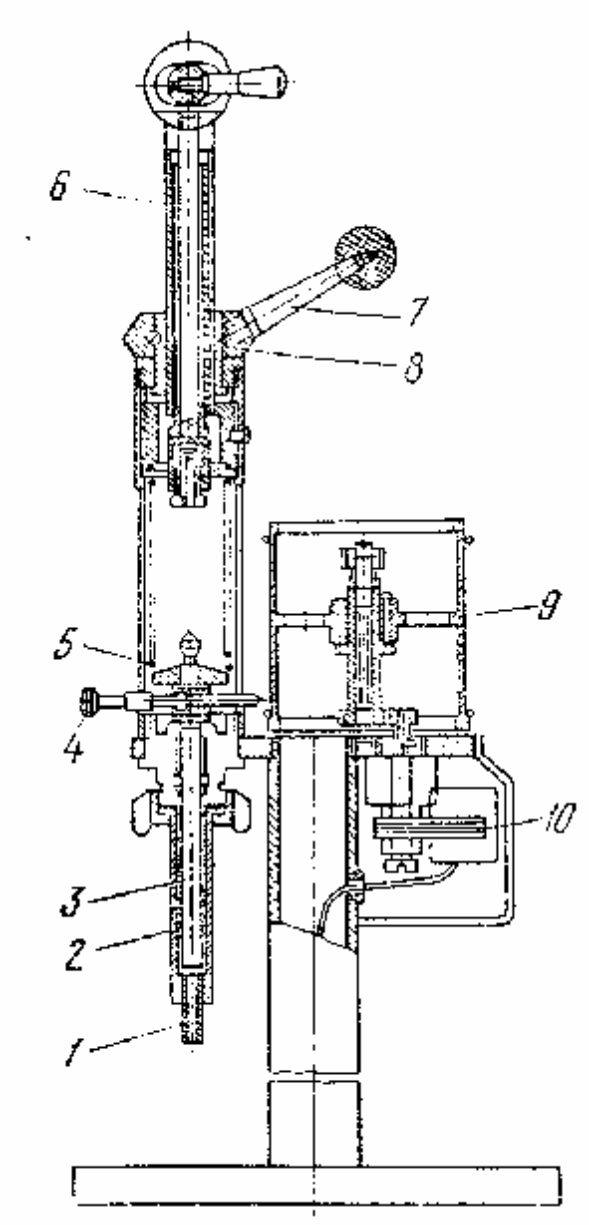

Рис. 2.12. Вискозиметр АКБ 5
1 – капилляр; 2 – камера; 3 – шток;
4 - держатель карандаша;
5 – пружина; 6 – винт; 7 – ручка;
8 – втулка; 9 – барабан;
10 – синхронный электродвигатель

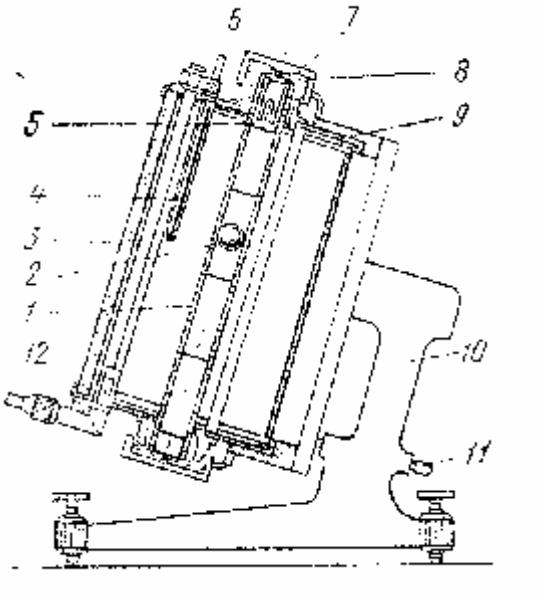

Рис. 2.13. Шариковый вискозиметр Гепплера
1 - стеклянная трубка; 2 – шарик;
3 - цилиндр для термостатирующей жидкости; 4 – термометр;
5 – резиновый колпачок для отвода избытка жидкости из трубки;
6 - прижимная гайка; 7 - полость для сбора излишней жидкости;
8 - уплотнительное кольцо;
9 – крышка; 10 – подставка;
11 - установочный винт; 12 - штуцер для подвода жидкости

ВОПРОСЫ К ГЛАВЕ 2

1. На какие группы подразделяют приборы для измерения реологических свойств?
2. На какие группы по принципу действия подразделяют приборы для измерения сдвиговых характеристик?
3. В чем специфические особенности работы ротационных вискозиметров?
4. Опишите наиболее характерные особенности принципиальных схем ротационных вискозиметров.
5. Опишите принципиальное устройство капиллярных вискозиметров.
6. Какова методика измерения вязкости на капиллярных вискозиметрах?
7. Приведите расчетную формулу для определения вязкости с помощью вискозиметров Гепплера.

3. АДГЕЗИЯ, АУТОГЕЗИЯ И КОГЕЗИЯ ПИЩЕВЫХ МАСС

Общие представления об адгезии пищевых масс

В связи с отсутствием общепринятой терминологии остановимся на основополагающих определениях адгезии.

Адгезией, или прилипанием, называют явление, которое возникает при контакте двух разнородных тел. Этот контакт происходит на границе раздела фаз. Адгезия относится к поверхностным явлениям. Она характеризует связь между двумя телами; для нарушения этой связи необходимо внешнее воздействие. Адгезия возникает при контакте двух твердых тел, а также при контакте жидкостей с твердыми телами. Она определяет связь пищевых масс с поверхностями технологического оборудования (емкости, транспортеры, трубопроводы, арматура и т. д.) и выступает как сопутствующее явление по отношению практически ко всем пищевым массам.

С учетом методов оценки и особенностей различных видов адгезии, способов определения величины адгезии и свойств пищевых масс нам представляется целесообразным различать адгезию сыпучих, упруго-пластических и жидких продуктов (табл. 3.1).

В табл. 3.1 перечислены только некоторые основные пищевые массы. Адгезия наблюдается на всех стадиях технологического процесса: при транспортировке и переработке сырья, на промежуточных стадиях, при упаковке и хранении готового продукта и т. д.

Наша классификация адгезии в зависимости от свойств пищевых масс основана на следующих представлениях. Адгезия как поверхностное явление возникает на границе раздела фаз разнородных конденсированных тел: пищевые массы – одна фаза, поверхность контакта – вторая фаза. Следовательно, речь идет о границе раздела жидкость – твердое тело (Ж - Т)

и твердое тело – твердое тело (T_1 - T_2).

Поверхностные свойства пищевых масс, в том числе адгезия, зависят от объемных свойств самих масс. Последние определяют площадь контакта двух тел, которая влияет на величину адгезии. Кроме того, объемные свойства пищевых масс обусловливают способы количественной оценки величины адгезии и ее последствие, которое в данном случае характеризует состояние поверхности после удаления прилипшей массы.

Адгезия жидкости осуществляется на границе раздела с твердым телом. Жидкость может находиться в емкости, образовывать на твердой поверхности капли или пленки. При любом контакте жидкости с твердой поверхностью возникает адгезия, но не во всех случаях она будет определять поведение жидкости на границе раздела фаз. Особенности этого вида адгезии обусловлены способностью жидкости копировать рельеф твердой поверхности и образовывать довольно значительную площадь контакта.

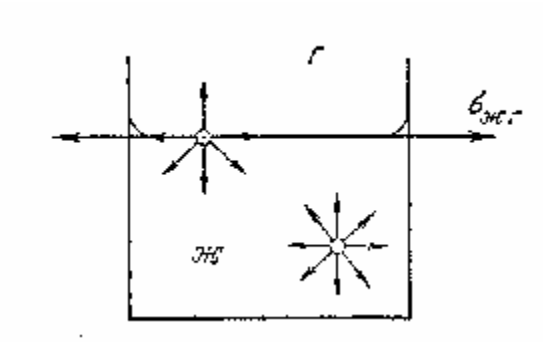

Рис. 3.1. Схема образования поверхностного натяжения жидкости

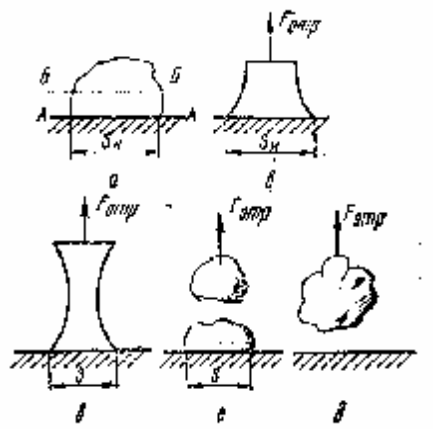

Рис. 3.2. Адгезия структурированной пищевой массы (*а*) и стадии отрыва: вытягивание образца и возникновение шейки (*б*); сокращение площади контакта (*в*); когезионный (*г*) и адгезионный (*д*) отрыв

Рис. 3.3. Адгезия и аутогезия частиц

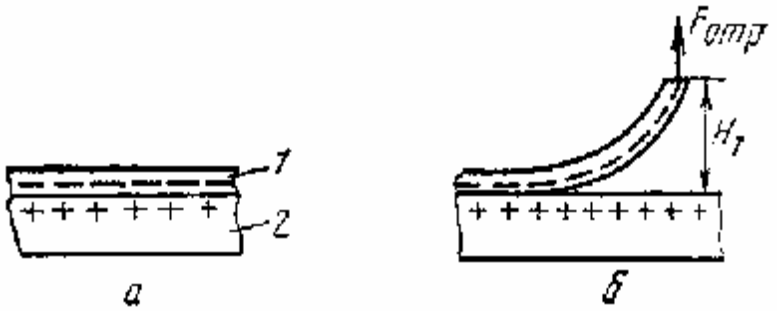

Рис. 3.4. Адгезия (*а*) и отрыв пленок (*б*)

Таблица 3.1

Классификация пищевых масс с учетом особенностей их адгезии

Пищевые массы	Граница фаз	Площадь контакта	Родственные явления	Представители
Жидкие (рис.1.1)	Ж – T_2	Сплошная	Когезия	Масло растительное, винно-водочные изделия, безалкогольные напитки, соки, молоко, пищевые эмульсии (майонез), растворы, жидкие добавки
Упруго-пластические (рис.1.2)	T_1 – T_2	»	»	Тесто, конфетные массы, кремы, пасты, мясо и мясные изделия, рыба и рыбные изделия, творог, сливочное масло, сыр, маргарин, джемы, варенье, овощи, фрукты
Сыпучие (рис.1.3.)	T_1 – T_2	Прерывис-тая	Аутогезия	Мука, крупа, сахар, крахмал, соль, кофе, чай, какао, яичный порошок, сухое молоко, детское питание
В виде пленок (рис.1.4)	T_1 – T_2	Сплошная	Когезия	Сыр, колбасные изделия, молочные продукты и др.

Адгезия упруго-пластических пищевых масс реализуется на границе раздела двух твердых тел. Упруго-пластические тела обладают аномальной вязкостью. Вязкость подобных тел изменяется в зависимости от напряжения сдвига, свойств массы и других факторов. Причина непостоянства вязкости заключается в особенностях структуры упруго-пластических тел.

Пищевые массы рассматриваемой группы являются сложными структурированными системами, сочетающими свойства упругих, пластических и вязких тел. Наиболее часто эти массы соответствуют модели упруго-пластических тел: вязкоупругих и вязкопластических. В связи с этим данную группу пищевых масс в дальнейшем будем относить к упруго-пластическим телам.

Упругопластические тела способны противодействовать до определенного предела внешней нагрузке. Они начинают течь только в том случае, когда внешнее воздействие превышает определенную величину. Течение упругопластических тел существенно отличается от течения жидкости.

Особенности упругопластических пищевых масс как

структурированных систем проявляются в их реологии. Реология определяет деформацию и течение подобных систем и влияет на контакт упруго-пластических тел с поверхностью и их адгезию. Упругопластические пищевые массы (см. табл. 3.1), как и жидкие, образуют на гладких твердых поверхностях сплошную площадь контакта. Для формирования площади контакта этих масс в отличие от жидкости потребуется более значительное время. Кроме того, упругопластические массы не растекаются по поверхности, сохраняя при этом довольно компактную форму.

Адгезия сыпучих пищевых масс (см. рис. 3.3) осуществляется по границе раздела двух твердых тел (см. табл. 3.1). Сыпучие материалы, как и вязкопластические, способны противодействовать внешнему давлению. Они могут течь, но течение этих материалов существенно отличается от такового сплошных тел, к которым относятся жидкость и упругопластические тела. Частицы, составляющие сыпучие тела, перемещаются друг относительно друга.

В отличие от жидкости и упругопластических тел сыпучие пищевые массы не имеют сплошной площади контакта с твердой поверхностью. Площадь контакта реализуется по отношению к частицам, составляющим сыпучий материал.

Есть еще один вид адгезии, который связан как с технологией получения некоторых пищевых продуктов, так и с борьбой против повышенной адгезии пищевых масс. Речь идет об адгезии пленок (см. рис. 3.4). Прилипшую пленку обычно называют адгезивом, а основу, к которой она прилипла, – субстратом.

Адгезия пленок в пищевой промышленности проявляется в двух аспектах. Первый из них связан с особенностями некоторых пищевых продуктов и технологии их изготовления. Так, адгезия пленок широко используется в сыроварении. Пленка не только сохраняет сыр, но и активно участвует в процессе его созревания. Пленка образуется на внутренней поверхности емкостей для тепловой обработки молока, для варки мясных изделий, в сахарном, дрожжевом и других производствах. Прилипший слой муки со временем может сцементироваться и превратиться в сплошную пленку.

Второй аспект адгезии пленок связан с применением антиадгезионных полимерных материалов. Их используют для борьбы с адгезией сыпучих и особенно упругопластических пищевых масс. Полимерный материал выполняет роль адгезива. Адгезия его к субстрату, т. е. к поверхности технологического оборудования, определяет возможность практического использования полимерных антиадгезионных материалов.

Связь адгезии с когезией и аутогезией

У адгезии имеются сопутствующие явления. Эти явления характеризуют объемные свойства пищевых масс и порой существенным образом влияют на адгезионное взаимодействие. Без рассмотрения сопутствующих явлений невозможно уяснить суть адгезии.

Влияние объемных свойств пищевых масс на поверхностные свойства можно проследить, рассматривая соотношение адгезии и когезии. Когезия означает связь внутри данного тела, т.е. в пределах одной фазы; связь пищевой массы с твердой поверхностью по плоскости *АА* (см. рис. 3.2) характеризуется адгезией. Одновременно существует связь внутри самой пищевой массы, которая на рис. 3.2, *а* проходит по плоскости *ББ* и характеризует когезию этой массы.

В случае адгезии имеет место граница раздела фаз, для когезии подобная граница отсутствует. В этом одна из характерных особенностей когезии, ее принципиальное отличие от адгезии. Соотношение адгезии и когезии определяет условие удаления жидких и, в большой степени, упруго-пластических пищевых масс при нарушении их контакта с твердой поверхностью.

При слабой адгезии по отношению к когезии происходит нарушение взаимодействия по плоскости *АА* и адгезионный отрыв (см. рис. 3.2, *д*). При незначительной когезии, уступающей адгезии, осуществляется когезионное удаление массы (см. рис. 3.2, *г*).

Соотношение адгезии и когезии и тип отрыва можно определить количественно. Адгезию оценивают с помощью работы – $W_{ад}$ или силы – $F_{ад}$, необходимой для разъединения контактирующих между собой разнородных тел, а когезию, соответственно, с помощью работы – $W_{ког}$ или силы – $F_{ког}$, необходимой для разрушения однородных тел.

При нарушении границы раздела по плоскости *АА* (см. рис. 3.2), в случае адгезионного удаления, соотношение между адгезией и когезией будет следующим:

$$W_{ад} < W_{ког}, \; F_{ад} < F_{ког} . \qquad (3.1)$$

Условия нарушения когезии одного и того же тела можно представить в виде:

$$W_{ад} > W_{ког}, \; F_{ад} > F_{ког} . \qquad (3.2)$$

Когезионное удаление теста - реализация соотношения (3.2) и условия, показанного на рис. 3.2, *г* - означает прилипание части теста к внутренним поверхностям различных емкостей, к деталям технологического оборудования и лентам транспортеров. Повышенная по сравнению с когезией адгезия теста приводит к потерям пищевого сырья и снижению производительности технологического оборудования. На практике приходится применять дополнительные меры для уменьшения адгезии, чтобы обеспечить выполнение условия (3.1). В дальнейшем будут более

подробно рассмотрены способы снижения адгезии.

Соотношения (3.1) и (3.2) можно применять к адгезии тех пищевых масс, для которых характерна сплошная площадь контакта, т. е. для жидких и упругопластических (см. табл. 3.1). Предпочтение в смысле использования на практике этих соотношений следует отдать упруго-пластическим пищевым массам, обладающим определенной прочностью.

Адгезия сыпучих пищевых масс неразрывно связана с таким явлением, как аутогезия (связь однородных по форме или природе тел). В данном случае речь идет об аутогезии частиц, т.е. связи между собой частиц сыпучих пищевых масс. Адгезия слоя частиц, составляющих сыпучий материал, осуществляется между частицами и поверхностью по плоскости *АА* (см. рис. 3.3). Адгезия отдельной частицы показана в левой верхней части рисунка.

Частицы прилипшего слоя связаны между собой силами аутогезии. Аутогезия пары соседних частиц показана в верхней правой части рис. 3.3. Аутогезия слоя частиц проходит по границе раздела (линия ББ) внутри сыпучей массы.

Соотношения (3.1) и (3.2) можно использовать для сопоставления адгезии и аутогезии сыпучих пищевых масс. В этом случае вместо $F_{ког}$ следует подразумевать силу аутогезии, т. е. $F_{аут}$. При реализации условия (3.2) будет происходить нарушение относительно слабой аутогезии, что соответствует аутогезионному отрыву сыпучего материала. Часть прилипшего слоя ниже плоскости *ББ* останется на поверхности (рис. 3.3).

Аутогезия, как и когезия, имеет место и может быть использована независимо от адгезии. Незначительная когезия или аутогезия оказывают влияние на прочность и компактность самой пищевой массы, особенно в процессе ее формования.

Термодинамический аспект адгезии

Адгезия как поверхностное явление обусловлена свойствами границы раздела фаз, в частности, поверхностной энергией. Представления о поверхностной энергии являются основополагающими. Они относятся к любым поверхностным явлениям, в том числе и адгезии пищевых масс. Подобные представления в дальнейшем будут широко использоваться. В связи с этим кратко рассмотрим термодинамические аспекты адгезии. Это необходимо еще и в связи с тем, что в технической литературе по адгезии пищевых масс суть поверхностной энергии трактуется не всегда точно. Адгезия связана с образованием новой границы раздела фаз взамен ранее существовавшей. Представим этот процесс схематически. Два тела 1 и 2 (рис. 3.5) находятся до адгезии в среде 3. Подобными телами могут быть две жидкости, жидкость и твердое тело, два твердых тела. В результате адгезии образуется непосредственный контакт первого и второго тел. На

формирование связи двух тел в расчете на единицу площади контакта потребуется определенная работа адгезии $W_{ад}$. В условиях изобарно-изотермического равновесного процесса адгезия вызовет изменение свободной поверхностной энергии (энергии Гиббса) ΔG на величину, равную работе адгезии. В условиях равновесия можно написать:

$$W_{ад} + \Delta G = 0\,, \qquad W_{ад} = -\,\Delta G\ . \qquad (3.3)$$

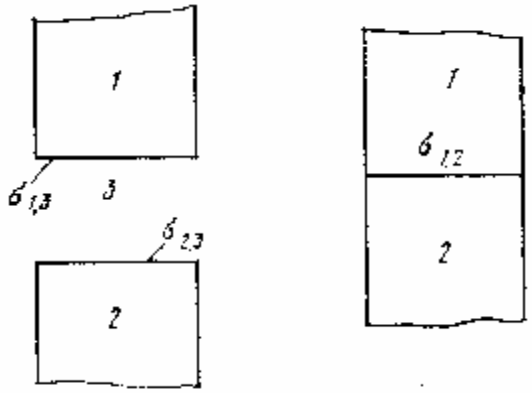

Рис. 3.5. Схема адгезии

В результате адгезии свободная поверхностная энергия уменьшится на величину ΔG. Снижение свободной поверхностной энергии означает, что процесс адгезии идет самопроизвольно. Работа адгезии тем значительнее, чем больше абсолютная величина ΔG.

Работа адгезии связана с удельной свободной поверхностной энергией. Для прослеживания этой связи, а также особенностей поверхностного натяжения по сравнению с удельной свободной поверхностной энергией рассмотрим молекулярное взаимодействие в жидкой среде.

Молекулы взаимодействуют между собой, как это показано на рис. 3.1. Молекулы в глубине жидкости окружены со всех сторон себе подобными, их действие взаимно компенсируется. Молекулы на границе раздела жидкости с газом взаимодействуют в полной мере лишь с молекулами со стороны жидкости. Взаимодействие молекул газа с молекулами жидкости значительно меньше, чем взаимодействие молекул жидкости между собой. В связи с этим молекулы, находящиеся на поверхности жидкости, испытывают большее взаимодействие со стороны жидкой фазы и втягиваются внутрь жидкости. В результате особенностей молекулярного взаимодействия поверхность жидкости стремится сократиться до минимального значения в данных условиях. Это происходит за счет силы поверхностного натяжения $\sigma_{жг}$, которая действует на единицу длины границы раздела (см. рис 3.1).

Поверхностное натяжение вызвано особенностями взаимодействия молекул в поверхностном слое и действует тангенциально к поверхности жидкости. В результате слой жидкости на границе раздела с газовой средой будет всегда ровный и гладкий. Поверхностное натяжение имеет размерность

Н/м или дин/см (1 дин/см $=10^{-3}$ Н/м=1 мН/м).

Жидкость может находиться в равновесии со своим паром. Когда воздействие на молекулы в поверхностном слое жидкости со стороны молекул будет таким же, как со стороны жидкости, поверхностное натяжение исчезнет, т.е. станет равным нулю. Молекулы на поверхности будут испытывать равное воздействие соседних молекул со стороны пара и жидкости. Это означает, что границы раздела между фазами не существует и система из гетерогенной, имеющей в данном случае две фазы, превратится в гомогенную. В этом смысле величина поверхностного натяжения может служить мерой гетерогенности, причем не только системы газ - жидкость, но и жидкость - жидкость.

При увеличении температуры повышается концентрация пара над жидкостью и растет взаимодействие молекул пара с молекулами жидкости. Величина поверхностного натяжения снижается. При достижении температуры кипения поверхностное натяжение падает.

Итак, чем меньше поверхностное натяжение, тем более значительным является взаимодействие поверхностных молекул с газовой средой.

Понятие о поверхностном натяжении неразрывно связано с другим понятием - об удельной свободной поверхностной энергии. Увеличение поверхности жидкости и образование новой поверхности раздела фаз связано с затратой работы на перемещение молекул жидкости из глубины на поверхность. Эта работа в расчете на единицу площади поверхности жидкости и есть удельная свободная поверхностная энергия. Для однокомпонентной жидкости удельная свободная поверхностная энергия численно равна поверхностному натяжению. Обе эти величины обозначаются обычно одинаково - $\sigma_{жг}$.

Когда под величиной σ подразумевают удельную свободную поверхностную энергию, то ее размерность выражают в Дж/м^2 (или эрг/см^2) (1 эрг/см^2 $=10^{-3}$ Дж/м^2 = 1 мДж/м^2).

Для жидкости, состоящей из нескольких компонентов, численное совпадение поверхностного натяжения и удельной свободной поверхностной энергии отсутствует. Однако различие между ними все же не столь велико, поэтому эти понятия в большинстве случаев отождествляют. Если хотят подчеркнуть энергетический аспект в образовании новой поверхности, размерность поверхностного натяжения дают в мДж/м^2.

Помимо удельной различают свободную поверхностную энергию. Термин «удельная» относится к единице площади раздела фаз, а термин «свободная» - ко всей поверхности межфазового контакта. При этом слово «поверхностная» обычно опускают, подразумевая, что свободная энергия относится к поверхности раздела фаз.

Для уяснения сути свободной энергии еще раз обратимся к рис 3.1. Молекула поверхностного слоя взаимодействует со своими соседями, находящимися в нижней половине пространства, которое рассекается

поверхностью жидкости. У этой молекулы в отношении верхней половины пространства сохранилась такая же способность взаимодействия, которая реализована лишь для нижней половины. Для всех молекул поверхностного слоя нереализованная способность к взаимодействию и будет характеризовать свободную энергию. Свободная энергия равна энергии образования поверхностного слоя, которая обусловлена поверхностным натяжением. При увеличении или уменьшении поверхности раздела фаз изменение свободной энергии точно равно произведению удельной свободной поверхностной энергии (поверхностного натяжения) на изменение площади поверхности.

Понятие о поверхностном натяжении справедливо для любых конденсированных тел, в том числе для сыпучих и упругопластичных пищевых масс, граничащих с газом или жидкостью.

Образование новой поверхности можно условно представить в виде двух стадий. На первой стадии, после деления вещества на части, молекулы на поверхности находятся в том же положении, которое они ранее занимали в объеме. В процессе второй стадии происходит перегруппировка молекул на поверхности, после чего они занимают равновесное положение. В жидкости обе стадии идут одновременно и быстро, а в отношении твердого тела вторая стадия реализуется очень медленно и может совсем отсутствовать.

В результате подобных процессов вновь образованная поверхность твердого тела становится неоднородной: возникают неровности и различное расположение молекул на границе раздела фаз. Все это приводит к тому, что работа образования единицы поверхности, т.е. удельная свободная поверхностная энергия, становится неодинаковой по поверхности твердого тела. Неоднородность поверхности твердого тела и ограниченная подвижность молекул этих тел сказываются также на поверхностном натяжении. Для твердых тел удельная свободная поверхностная энергия и поверхностное натяжение усредненные величины, которые численно совпадают. Если в отношении жидкостей существуют доступные и довольно точные методы определения поверхностного натяжения, то для твердых тел применяемые методы довольно сложны и не дают точных результатов.

При помощи удельной свободной поверхностной энергии можно выразить равновесную работу адгезии. Воспользуемся еще раз рис. 3.5. При адгезии, когда еще не нарушен контакт между твердыми телами, взаимодействие между этими телами определяется величиной удельной свободной поверхностной энергии на границе раздела фаз $\sigma_{1,2}$.

В результате внешней работы произойдет разъединение тел и образование новых границ раздела фаз 1 и 2, окруженных средой 3. Величина удельной свободной поверхностной энергии после нарушения адгезии будет равна $\sigma_{1,3}+\sigma_{2,3}$.

Работа, затрачиваемая на преодоление взаимодействия двух тел, соответствует работе адгезии. Она равна разности между удельными

поверхностными энергиями твердых тел на границе со средой после нарушения контакта между ними ($\sigma_{1,3}+\sigma_{2,3}$) и удельной поверхностной энергией, которая была до нарушения контакта $\sigma_{1,2}$:

$$W_{ад} = (\sigma_{1,3}+\sigma_{2,3}) - \sigma_{1,2}\ , \qquad (3.4)$$

где $\sigma_{1,3}, \sigma_{2,3}$ и $\sigma_{1,2}$ – удельные свободные поверхностные энергии или поверхностные натяжения на границе соответствующих фаз.

В случае адгезии жидкости, в том числе и жидких пищевых масс, фазы *1* и 2 соответствуют поверхности жидкости и твердого тела, а фаза 3 относится к газовой среде. Тогда равновесную работу адгезии жидкости можно представить в виде:

$$W_{ад} = (\sigma_{тг}+\sigma_{жг}) - \sigma_{тж}\ , \qquad (3.5)$$

где $\sigma_{тг}$, $\sigma_{жг}$ и $\sigma_{тж}$ – удельные свободные поверхностные энергии или поверхностные натяжения на границе раздела следующих фаз: *Т – Г, Ж – Г, Т – Ж*.

В случае адгезии двух твердых тел (это относится к сыпучим и упруго-пластическим пищевым массам) формулу (3.4) можно представить так:

$$W_{ад} = (\sigma_{T1\text{-}Г}+\sigma_{T2\text{-}Г}) - \sigma_{T1\text{-}T2}\ . \qquad (3.6)$$

Индексы T_1 – *Г*, T_2 – *Г* и T_1 – T_2 обозначают границу раздела двух твердых тел с газовой средой и твердых тел между собой.

Аналогичный процесс имеет место при когезии. В случае разъединения тела нарушается связь между молекулами одного и того же вещества этого тела. При этом образуются две новые границы раздела фаз.

В случае когезии величина $\sigma_{1,2}$ соотношения (3.4) равна нулю, так как для когезии характерно отсутствие границы раздела фаз. После нарушения сплошности тела образуются две новые однотипные границы раздела фаз, имеющие удельную свободную поверхностную энергию $\sigma_{1,}3$. С учетом этого и на основе соотношения (3.4) равновесную работу когезии можно представить в следующем виде:

$$W_{ког} = 2\sigma_{1,3}\ , \qquad (3.7)$$

где $\sigma_{1,3}$ – удельная свободная поверхностная энергия вновь образованных поверхностей.

Рассмотренные представления являются общими для всех видов адгезии, в том числе и адгезии всех пищевых масс. Они позволяют установить связь между поверхностными свойствами контактирующих тел и их адгезии. Применить для расчетов формулы (3.4) - (3.7) нельзя, так как в них входят величины, которые на практике трудно поддаются непосредственному определению. Речь идет о поверхностном натяжении твердых тел. Кроме того, приведенные формулы справедливы для равновесного обратимого процесса, который протекает в определенных условиях и на практике реализуется редко. В связи с этим для перехода к адгезии пищевых масс в реальных условиях необходимо хотя бы в общих чертах рассмотреть причины и следствия адгезии.

Причины адгезии

Адгезия зависит от площади контакта между двумя телами и величины связи между ними, приходящейся на единицу площади контакта. Площадь контакта определяется свойствами пищевых масс.

Причины адгезии и аутогезии рассмотрены подробно в литературе, поэтому остановимся лишь на краткой характеристике причин адгезии применительно к пищевым массам. Акцент сделаем на возможность практического управления адгезионным взаимодействием, т.е. его уменьшение или увеличение в зависимости от требований практики.

Адгезия обусловлена различными по своей природе силами и связями, их можно условно разбить на две группы. Первая группа сил проявляется при сближении двух тел и при отсутствии контакта между ними, когда имеется зазор определенной величины. Эти же силы действуют и после нарушения непосредственного контакта. Вторая группа сил возникает только после возникновения контакта разнородных тел и не может существовать при отсутствии контакта (см. разд. 3.5).

К первой группе относятся межмолекулярное взаимодействие (межмолекулярная сила или межмолекулярная связь) и сила зеркального отображения, или кулоновская. Межмолекулярное взаимодействие проявляется во всех случаях адгезии пищевых масс. Эти случаи можно свести к трем характерным видам взаимодействия (рис. 3.6): двух плоских поверхностей, частицы или сферической поверхности с плоской поверхностью, двух частиц или двух сферических поверхностей. Межмолекулярное взаимодействие применительно к адгезии жидких и упругопластических пищевых масс соответствует случаю, представленному на рис. 3.6, *а*.

Особенности адгезии и аутогезии сыпучих пищевых масс можно проиллюстрировать рис. 3.6*, б, в*.

Величина H_1 характеризует зазор, т.е. расстояние между телами. В случае адгезии этот зазор соизмерим с молекулярными размерами. На рис. 3.6 величина зазора H_1 показана в увеличенном масштабе.

В основе определения молекулярной компоненты сил адгезии лежат представления о взаимодействии пар молекул, принадлежащих различным телам. Молекула *Б* (см. рис. 3.6, *а*) одного из конденсированных тел взаимодействует с молекулами другого тела. Это взаимодействие осуществляется на расстоянии R между молекулой *Б* и молекулами соседнего тела, когда сами тела расположены друг от друга на расстоянии H_1.

Одна молекула тела 1 взаимодействует со многими молекулами соседнего тела. Подобных молекул в самом теле 1 очень много. Аналогичным образом можно рассматривать взаимодействие одной молекулы тела 2 со многими молекулами тела 1. Для определения

межмолекулярного взаимодействия при адгезни двух конденсированных тел суммируют все парные взаимодействия молекул двух контактирующих тел.

Окончательно силу межмолекулярного взаимодействия в случае адгезии различной формы можно определить при помощи следующих аналитических выражений:

для двух плоских поверхностей (см. рис. 3.6, *а*)

$$F = A/\left(6\pi H_1^3\right); \qquad (3.8)$$

для частицы или сферической поверхности с плоскостью (рис. 3.6, *б*)

$$F = \frac{Ar}{\left(6H_1^2\right)}; \qquad (3.9)$$

для двух частиц или двух сферических поверхностей (см. рис. 3.6, *в*)

$$F = \frac{Ar}{\left(12H_1^2\right)}. \qquad (3.10)$$

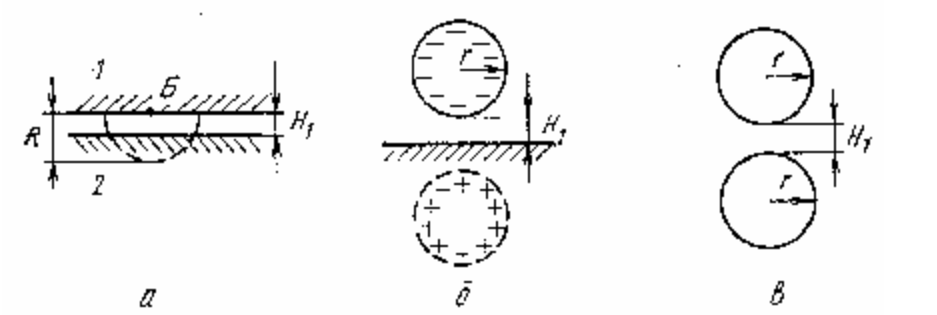

Рис. 3.6. Взаимодействие двух поверхностей (*а*), между частицей и поверхностью (*б*) и двух частиц (*в*)

В формулах (3.9) и (3.10) сила *F* характеризует межмолекулярное взаимодействие в расчете на одну частицу; при помощи формулы (3.8) это взаимодействие определяется в расчете на единицу площади контакта.

Величина *A,* входящая в формулы (3.8 - 3.10), является постоянной и зависит от свойств соприкасающихся поверхностей и среды, окружающей эти поверхности. Эту величину называют константой межмолекулярного взаимодействия или по имени автора константой Гамакера.

Константа *A* учитывает природу контактирующих тел. Численные значения этой константы, которые достаточно точно определены расчетом и при помощи эксперимента, колеблются в довольно широком диапазоне, от $0{,}1\cdot10^{-19}$ до $32\cdot10^{-19}$Дж. Такой диапазон в значении константы означает принципиальную возможность за счет межмолекулярного взаимодействия изменять силу адгезии пищевых масс в 320 раз.

Несмотря на строгость вывода формул для определения сил межмолекулярного взаимодействия и известную точность определения константы А, формулы (3.8 - 3.10) нельзя использовать для практических расчетов. Эти формулы справедливы для межмолекулярного взаимодействия

гладких поверхностей, шероховатость которых соизмерима с размерами молекул. Твердые тела не являются таковыми. Поверхность жидкости можно считать молекулярно гладкой, а при адгезии жидкость контактирует с твердой шероховатой поверхностью.

В настоящее время отсутствуют достоверные способы определения зазора между контактирующими телами в случае их адгезии. К тому же этот зазор неодинаков в зоне контакта двух тел. Константа *A* определена для чистых веществ. Реальные тела имеют примеси, что может быть источником погрешности в расчетах межмолекулярного взаимодействия.

В некоторых случаях, о которых речь пойдет ниже, величина адгезии помимо межмолекулярного взаимодействия может быть вызвана другими причинами.

Из сказанного следует, что формулы (3.8 - 3.10) нельзя использовать для непосредственного расчета величины межмолекулярного взаимодействия. Они могут быть применены только для оценки порядка величины этого взаимодействия и вклада молекулярной составляющей в суммарную адгезию. Использование формул (3.8 - 3.10) и значений константы *A* показывает пути изменения величины межмолекулярного взаимодействия и адгезии в целом, что очень важно для практики.

Межмолекулярное взаимодействие проявляется, когда зазор между двумя телами колеблется от нескольких диаметров до нескольких сотен диаметров молекул, т. е. при наличии и при отсутствии контакта между двумя телами. Естественно, чем ближе расположены поверхности, тем значительнее их адгезия за счет связи между молекулами. Межмолекулярное взаимодействие проявляется во всех видах адгезии пищевых масс. Адгезия может быть вызвана и кулоновской силой. Частицы, составляющие сыпучие пищевые массы, имеют электрический заряд. Подобный заряд, например, возникает при движении и трении частиц муки о поверхность. В некоторых случаях при распылении жидких пищевых масс капли тоже могут приобрести заряд.

При контакте заряженных частиц с поверхностью на ней индуцируются заряды, равные по величине, но противоположные по знаку заряду частиц (рис. 3.6, *б*). Эти заряды будут зеркальным отображением исходного заряда частиц. Между противоположными зарядами возникает сила зеркального отображения, которая в электростатике называется кулоновской.

Если первоначальный заряд частиц, имеющих радиус *r*, равен *Q*, то силу зеркального отображения можно определить по формуле

$$F_з = Q^2 / (2r)^2 . \qquad (3.11)$$

Здесь не учитывается зазор H_1 между частицей и поверхностью (величина его значительно меньше размеров частиц), а также возможное смещение центра заряда по отношению к центру частицы. При помощи

формулы (3.11) можно получить приближенные значения кулоновской компоненты сил адгезии. Для практических целей получаемые значения этих сил вполне приемлемы.

Сила зеркального отображения не всегда оказывает влияние на адгезию частиц. Заряд взвешенных в воздухе частиц муки может колебаться в широких пределах. В обычных условиях его значение не превышает 1000 элементарных зарядов. Если для подобных зарядов по формуле (3.11) подсчитать силу зеркального отображения, то она будет незначительна. При движении и трении о поверхность заряд частиц муки может увеличиваться в сотни раз. Тогда кулоновская сила окажет заметное влияние на адгезию частиц.

Сила зеркального отображения изменяется со временем контакта частиц. Прилипшие к металлической поверхности заряженные частицы муки постепенно разряжаются. Уменьшение заряда частиц ведет к снижению силы зеркального отображения.

Сила зеркального отображения может оказывать влияние на адгезию не только сыпучих, но и в некоторых случаях жидких пищевых масс. Так, после образования слоя из прилипших капель происходит их слияние в результате контакта. Образуется слой жидкости, заряд которого противоположен заряду твердой поверхности. Сила зеркального отображения может оказывать влияние на адгезию и в этом случае.

Итак, кулоновская сила может быть одной из причин адгезии сыпучих и значительно реже – жидких пищевых масс. В отличие от межмолекулярного взаимодействия сила зеркального отображения оказывает влияние на адгезию не во всех случаях. Для реализации этой компоненты адгезионного взаимодействия необходимы определенные условия, к числу которых относится предварительный заряд частиц.

Следствия адгезии

Межмолекулярное взаимодействие во всех случаях и кулоновская сила только в некоторых определяют первоначально формирование связи между двумя поверхностями. Напомним, что эти силы относятся к первой группе и действуют до непосредственного контакта тел и некоторый период при незначительных расстояниях H_1 (см. рис. 3.6) после нарушения контакта и взаимного удаления тел.

Вторая группа сил в отличие от первой проявляется только при контакте двух тел. Эти силы выступают как следствие первоначальной адгезии, становясь затем одной из ее причин. К числу этой группы сил относятся химическая связь, электрическая сила, капиллярная сила и расклинивающее давление тонкого слоя жидкости. Кроме того на величину адгезии могут влиять процессы, которые также являются следствием контакта двух тел. К числу этих процессов относятся адсорбция и диффузия.

При адгезии жидких и упругопластических пищевых масс могут возникнуть химические связи. Пищевые массы содержат высокомолекулярные соединения, производные крахмала и белка. Для подобных соединений характерна не только межмолекулярная, но и химическая связь. Так, при адгезии мясного фарша к стальной поверхности химическая связь определяется наличием в продукте реакционноспособных групп молекул – NH_2, - COOH. Если принять адгезию мясного фарша к стали за 1, то адгезия к стеклу составит 0,95, а к поверхности из полиметилфенилсилоксана - лишь 0,7. Повышение температуры обработки мясного фарша с 40 до 150°С снижает адгезию до 0. Это вызвано денатурацией белков и исчезновением химической связи между мясным фаршем и поверхностями.

Адгезия карамельной патоки в 4 раза превышает адгезию предварительно нагретого и охлажденного концентрированного раствора сахара, несмотря на то, что содержание сухих веществ у них одно и то же (75%). Причиной увеличенной адгезии патоки является наличие декстринов - растворимых в воде продуктов частичного гидролиза крахмала.

Возникновение химической связи определяется наличием на контактирующих поверхностях реакционноспособных групп молекул, что количественно характеризуется соотношением химических потенциалов взаимодействующих тел. Если обозначить через μ_a и μ_c химический потенциал прилипшей массы (адгезива) и поверхности субстрата, то возможность появления химической связи можно представить следующим образом:

$$\Delta\mu = \mu_a - \mu_c; \qquad \Delta\mu \neq 0 . \qquad (3.12)$$

Химическая связь проявляется сравнительно часто, особенно в случае адгезии упругопластических и жидких пищевых масс. Химическая связь может значительно усилить адгезию.

В формировании адгезии помимо силы зеркального отображения может участвовать также электрическая сила, которая возникает после контакта двух тел. Она проявляется при адгезии сыпучих и упруго-пластических пищевых масс. Наибольшее значение, однако, электростатическая сила приобретает при довольно значительной площади контакта между двумя твердыми поверхностями. Это имеет место при адгезии пленок, поэтому рассмотрение электрической силы покажем на примере адгезии пленок.

Допустим, что до адгезии тела не имели заряда. При адгезии (см. рис. 3.4, *а*) в зоне контакта пленки с поверхностью образуется двойной электрический слой. В целом система, в данном случае адгезив и субстрат, представляет собой своеобразный конденсатор, одна обкладка которого принадлежит адгезиву (пленке), другая - субстрату (основанию). В соответствии с рис. 3.4 пленка выполняет функцию акцептора: принимает электроны, приобретая тем самым отрицательный заряд. Основание является

донором, т.е. источником электронов. После отдачи электронов оно заряжается положительно. Наличие двойного электрического слоя на поверхности контактирующих тел и обусловливает возникновение электрической силы за счет донорно-акцепторной связи.

Нетрудно различить силы зеркального отображения и электрическую, которая образуется в результате адгезии. Необходимое условие проявления силы зеркального отображения - наличие предварительного заряда, который должен быть на частице до ее контакта с поверхностью. При контакте подобный заряд и вызывает силу зеркального отображения (см. рис. 3.6, *б*).

Электрическая сила возникает только в результате контакта. Ее можно охарактеризовать как результат взаимодействия обкладок своеобразного конденсатора, который образуется в зоне контакта. При адгезии заряды не проявляются, а система в целом остается нейтральной. Электрическая сила дает о себе знать в процессе преодоления адгезии, например при отрыве пленки от поверхности.

При формировании адгезии за счет электрической силы и нарушения адгезионного взаимодействия прослеживается диалектическая связь между причиной и следствием. Непосредственной причиной возникновения электрической силы служит контакт двух поверхностей и их адгезия. Следствием является усиление адгезии и необходимость затраты дополнительного усилия для нарушения адгезионного взаимодействия.

Электрическая сила практически не оказывает влияния на адгезию жидких и упругопластических пищевых масс. Она может формировать адгезию сыпучих продуктов, но все же ее влияние не столь существенно. Площадь контакта частиц с поверхностью обычно незначительна. Если возникает двойной электрический слой в зоне контакта частиц, то его влияние мало из-за ограниченных размеров площади фактического контакта частиц с поверхностью.

Электрическая сила оказывает определенное влияние на адгезию пленок, особенно полимерных. Подобные пленки, как уже отмечалось, применяются в пищевой промышленности в качестве антиадгезионных материалов.

Причина возникновения двойного электрического слоя заключается в энергетической неоднородности контактирующих поверхностей. При контакте происходят выравнивание энергетических уровней соприкасающихся тел, отдача и прием электронов, донорно-акцепторные процессы, что и определяет образование двойного электрического слоя и появление электрической силы.

Структура двойного электрического слоя нарушается при отрыве пленок. При этом определяется не истинная адгезия, а адгезионная прочность, на которую оказывает влияние электрическая сила. Это влияние зависит не только от плотности заряда двойного слоя, но и от условий его нарушения, т. е. отрыва пленки от поверхности.

Адгезия пищевых масс зависит от влаги. Это влияние в зоне контакта двух тел проявляется в виде капиллярной силы и расклинивающего давления тонкого слоя жидкости. Влага может также изменить свойства пищевых масс и их адгезию.

Капиллярная сила особенно значительно проявляется в отношении адгезии частиц (рис. 3.7, *а*). В зазоре между контактирующими телами возникает мениск жидкости. Он может образовываться в результате конденсации паров воды из воздуха или под действием влаги, находящейся в самом продукте. Мениск оказывает решающее влияние на адгезию. Он как бы стягивает частицу и поверхность. Величина адгезии частиц в этом случае будет определяться капиллярной силой, которая рассчитывается по формуле

$$F_к = 4\pi\sigma_{жг} r, \qquad (3.13)$$

где $\sigma_{жг}$ - поверхностное натяжение жидкости (воды), пары которой сконденсированы между контактирующими телами.

В данном случае подразумевается, что твердые поверхности полностью смачиваются водой.

Капиллярная компонента включается в формирование адгезии при определенной влажности воздуха. Когда относительная влажность воздуха не превышает 50%, капиллярная конденсация отсутствует. При относительной влажности 50 - 70% наблюдается формирование капиллярной прослойки, а при более высокой влажности капиллярные силы обусловливают величину адгезии частиц.

Возникновение капиллярной компоненты сил адгезии связано с величиной зазора между частицей и поверхностью, который в увеличенном масштабе показан на рис. 3.7, *а*. Непосредственно в зоне контакта зазор составляет десятые доли нанометра, а в зоне, обрамляющей контакт, эта величина может увеличиваться до десятков и даже нескольких сотен нанометров. Размеры подобных зазоров будут капиллярными, отсюда и название капиллярных сил.

Пары воды конденсируются в капиллярных зазорах при давлении, величина которого меньше давления насыщенного пара над плоской поверхностью. Поэтому в зазорах прослойка воды образуется при относительной влажности воздуха, меньшей 100 %.

В воздушной среде капиллярные силы формируются не сразу: на это потребуется до 30 мин. Из увлажненной пищевой массы капиллярные силы возникают значительно быстрее.

Жидкая прослойка и среда существенно изменяют адгезию. Капиллярные силы увеличивают адгезию частиц сыпучих пищевых масс. Капиллярная сила, кроме того, может проявиться при наличии слоя жидкости между двумя твердыми поверхностями (рис. 3.7, *б*), что соответствует адгезии упругопластических пищевых масс. Толщина жидкой прослойки в этом случае не превышает 100 нм. Капиллярная сила будет стягивать две поверхности и определять их адгезию. Величину капиллярной компоненты

сил адгезии двух плоских поверхностей, разделенных жидкой прослойкой, можно подсчитать по формуле:

$$F_к = \frac{2\sigma_{жг} S}{H_1} \quad . \qquad (3.14)$$

Капиллярная сила между двумя плоскими поверхностями проявляется при определенных условиях: небольшой толщине прослойки жидкости; параллельности поверхности твердых тел и отсутствии перекосов; отсутствии посторонних включений в слой жидкости и некоторых других.

Рассматривать в качестве жидкой прослойки структурированные упругопластические пищевые массы нет основания. Они не являются жидкостями и для них формула (3.14) теряет смысл.

При оценке роли жидкости в формировании адгезии необходимо различать действие жидкой прослойки (см. рис. 3.7) и жидкой среды (рис. 3.8). Когда жидкости мало, имеет место капиллярная конденсация и возникает капиллярная компонента сил адгезии, которая и обусловливает усиление адгезии. Величина этой компоненты определяется формулой (3.13).

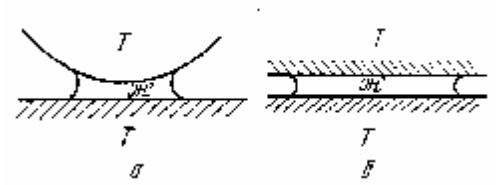

Рис. 3.7. Прослойка воды в случае адгезии частицы (*а*) и двух плоских поверхностей (*б*)

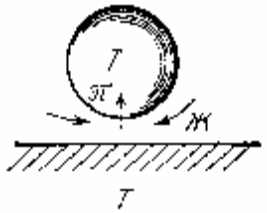

Рис. 3.8. Схема возникновения расклинивающего давления

В жидкой среде прилипшие частицы полностью окружены жидкостью, а не воздухом (см. рис. 3.8) и адгезия этих частиц значительно меньше их адгезии в воздушной среде. В жидкой среде подавляется действие капиллярных сил, не проявляются кулоновские и электрические силы, затруднена непосредственная химическая связь между твердыми поверхностями. Кроме того, возникает сила отталкивания – расклинивающее давление тонкого слоя жидкости, находящегося между поверхностями соприкасающихся тел.

Расклинивающее давление проявляется при толщине слоя жидкости менее 100 нм. Оно вызвано особыми свойствами тонких слоев жидкости: определенной ориентацией растворенных веществ, отталкиванием одноименных зарядов двойных электрических слоев, образующихся на частицах и поверхности, особой структурой граничного слоя жидкости и другими факторами. Суть расклинивающего давления можно уяснить при помощи рис. 3.8. Давление жидкости в зазоре между частицей и поверхностью меньше, чем в объеме Жидкость самопроизвольно способна втекать в этот зазор (течение жидкости показано стрелками). В результате в тонком слое жидкости образуется избыточное давление, которое препятствует адгезии. Когда между сыпучими и упругопластическими

пищевыми массами, с одной стороны, и твердой поверхностью, с другой стороны, будет находиться слой жидкости, то возможно снижение адгезии этих масс за счет расклинивающего давления тонкого слоя жидкости.

Между пищевыми массами и поверхностью, с которой они контактируют, могут протекать процессы, оказывающие существенное влияние на адгезию. Имеется в виду адсорбция и диффузия.

На границе между жидкими и упругопластическими пищевыми массами с твердой поверхностью может происходить концентрирование веществ из объема фазы (адсорбция). Адсорбция связана с транспортировкой молекул из массы продукта к границе раздела фаз. Адсорбция может резко изменять величину адгезии пищевых масс.

Диффузия проявляется при контакте упругопластических и в большей степени жидких пищевых масс с твердыми пористыми поверхностями, в частности с материалами, из которых изготовляют ленточные транспортеры. Диффузия характеризуется проникновением молекул вещества из области высокой концентрации в область более низкой. Часть продукта проникает в поровое пространство твердого тела. В результате диффузии происходит размывание границы раздела фаз и образование своеобразной «спайки» между поверхностями. Площадь контакта между адгезивом и субстратом увеличивается, что обусловливает рост адгезии.

Адсорбционные процессы при адгезии проявляются все же чаще, чем диффузионные. По существу во всех случаях адгезии жидких и в значительном числе случаев адгезии упруго-пластических пищевых масс в той или иной мере проявляется адсорбция. Диффузия как процесс, сопутствующий адгезии пищевых масс и проходящий в зоне контакта, проявляется по отношению к пористым материалам, применение которых в пищевой промышленности ограничено.

Особенности адгезии пищевых масс

Адгезия пищевых масс специфична и имеет ряд особенностей, которые обусловлены прежде всего свойствами этих масс.

Пищевые массы являются биологически сложными и химически активными объектами. Они изменяют свои свойства в процессе переработки и приготовления продуктов питания. Так, при безопарном способе тестоведения в течение 2 - 4 ч меняется содержание кислот и дрожжей, происходит ферментативный гидролиз белков и крахмала, механическое диспергирование клейковины и разрыхление диоксидом углерода. Эти и другие процессы изменяют физико-химические и коллоидно-химические свойства теста, химические связи и межмолекулярное взаимодействие, определяющие адгезию.

На адгезию пищевых масс оказывают влияние особенности используемого сырья и применяемая технология. Адгезия теста, например,

будет определяться способом его приготовления (опарным или безопарным), сортом муки и видом ее помола, присутствием добавок поверхностно-активных веществ, дрожжей и органических кислот.

Пищевые массы являются многофазными дисперсными системами. В ходе производства возможно изменение агрегатного состояния фаз. Так, при получении зефирных масс образуется система, в жидкой дисперсной среде которой находятся одновременно две дисперсные фазы - твердое тело и газ, т.е. образуется система типа Т, Г/Ж. Различные виды теста можно рассматривать как дисперсную систему типа Ж, Г/Т. Дисперсную фазу такой системы могут составлять частички жира и воды, а также пузырьки газа и воздуха.

В результате особенностей технологических процессов при производстве продуктов питания может изменяться вид дисперсной системы. Это легко проследить на примере выпечки хлеба. Технологический цикл хлебопекарного производства с точки зрения дисперсных систем можно представить так: мука (Т/Г) → тесто (Ж, Г/Т) → хлеб (Г/Т).

Изменение фазового состояния пищевых масс в процессе производства меняет не только величину адгезии, но и вид адгезионного взаимодействия. В хлебопекарном производстве адгезия сыпучих масс (муки) переходит в адгезию структурированных систем (тесто и хлеб), при этом изменяется фазовый состав продукта.

Фазовый переход имеет место при формовании кондитерских масс, при производстве сливочного масла, маргарина, сахара и т.д. В некоторых случаях фазовый переход сопровождается изменением температуры пищевых масс. В процессе выпечки хлеба, например, изменение фазового состава теста и образование хлеба связаны с ростом температуры. Формование конфет сопровождается уменьшением температуры масс.

Адгезия пищевых масс изменяется в зависимости от числа их контактов с поверхностями технологического оборудования. Число контактов, в свою очередь, зависит от продолжительности технологического цикла и длительности работы оборудования. Полученные данные по адгезии для чистых поверхностей могут отличаться от таковых для пищевых масс в отношении работающих поверхностей, которые ранее неоднократно соприкасались с пищевыми массами.

Все эти обстоятельства обусловливают сложность и неоднозначность адгезии пищевых масс. Изменение причин и следствий адгезии имеет место в процессе производства продуктов питания. Адгезия одних и тех же пищевых масс к поверхностям на одном предприятии может быть непостоянной и изменяться количественно в некотором диапазоне. Тем более различаются количественные характеристики адгезии однотипных продуктов на предприятиях, которые используют различное сырье и различаются особенностями технологических решений.

Специфика адгезии пищевых масс не означает, однако, отсутствия

закономерностей, определяющих адгезионное взаимодействие, и методов борьбы с отрицательными последствиями этого явления. Сложность и многообразие пищевых масс, напротив, должны способствовать углубленному изучению причин адгезии и разработке необходимых практических рекомендаций с учетом особенностей самих пищевых масс.

Практическое значение адгезии не ограничивается контактом пищевых масс с различными поверхностями. Адгезия может выступать как процесс, сопутствующий производству продуктов питания. Так, адгезия воды и смачивание ею различных поверхностей являются основой таких процессов, как очистка сырья от примесей, удаление загрязнений с поверхности, мойка тары и др.

Адгезия воды и смачивание определяют возможность применения некоторых сыпучих масс. Речь идет о водорастворимых продуктах питания, таких как сухое молоко, кофе и какао. Технология производства сухого молока предусматривает, в частности, получение продукта, который в дальнейшем легко смачивается и растворяется.

Не всегда необходимо снижать величину адгезии. В некоторых случаях, напротив, в связи с особенностями работы узлов машин следует увеличивать адгезию. Так, в процессе производства конфет на основе упругопластических масс (пралиновые массы, сливочные помады и др.) повышенная адгезия к поверхностям валков нагнетателя увеличивает эффективность работы всей машины.

Определенная величина адгезии должна быть между слоями многослойных изделий, например вафель. Некоторые кондитерские изделия обрабатываются сахарной пудрой или кремом. Адгезия в этих условиях способствует их закреплению на поверхности изделия. Адгезия слоя шоколадной глазури определяет форму и товарный вид готового продукта.

И все же на практике чаще приходится сталкиваться с проблемой снижения адгезии пищевых масс.

Особое значение адгезия в связи с трением приобретает в процессе резания пищевых материалов. Острая кромка ножа нарушает целостность материала. По мере проникновения вглубь режущая поверхность соприкасается со вновь образованной. Возникает связь между режущей поверхностью и пищевой массой. Эта связь обусловливает трение режущего инструмента и усилие резания, что, в конечном счете, сказывается на эффективности всего процесса.

Для борьбы с адгезией пищевых масс применяют полимерные материалы, которые в виде пленок закрепляются на поверхностях технологического оборудования. От величины адгезии этих пленок зависит целесообразность их практического применения. Адгезия полимерных пленок, которые обладают антиадгезионными свойствами в отношении пищевых масс, также связана с предметом нашего изложения и будет рассмотрена в аспекте практических мер борьбы с отрицательными

последствиями адгезии.

Оценка величины адгезии пищевых масс

Для уяснения причин и сопоставления различных видов адгезии пищевых масс, определения эффективности методов ее снижения необходимо иметь объективные количественные показатели, характеризующие величину адгезии.

В отношении сыпучих материалов, жидкостей и пленок установились терминология и параметры, при помощи которых можно характеризовать величину адгезии. Эти параметры в известной степени стали общепринятыми. Особенности оценки адгезии различных видов пищевых масс даны в табл. 3.2.

Адгезию жидкости оценивают при помощи равновесной работы адгезии $W_{ад}$, измеряемой в Дж/м^2. Величину адгезии частиц сыпучих материалов, в том числе и пищевых масс, характеризуют при помощи сил адгезии в расчете на одну частицу $F_{ад}$ и удельной силы адгезии для слоя частиц, прилипшего к единице площади поверхности $F_{ад}^N$. Адгезию пленок количественно сравнивают при помощи величины, называемой адгезионной прочностью.

Таблица 3.2

Способы, количественной оценки адгезии пищевых масс

Пищевые массы или вид адгезии	Условия определения	Оценка	Символ	Измеряемые величины
Жидкие	Без нарушения контакта	Работа адгезии, Дж/м^2	$W_{ад}$	Равновесная часть адгезии
Сыпучие	Путем нарушения контакта	Сила и удельная сила адгезии, Н, Па	$F_{ад}$ $F_{ад}^N$	Все компоненты адгезии
Упруго-пластические	Путем нарушения контакта	Прочность адгезии, Па	$F_{отр}$	Адгезия и побочные процессы
Адгезия пленок	Путем нарушения контакта	Адгезионная прочность, Дж/м^2	$W_{отр}$	Адгезия и побочные процессы

В отношении оценки адгезии упругопластических структурированных пищевых масс отсутствует единство в трактовке одних и тех же понятий.

Адгезию подобных масс определяют как «липкость», «адгезионная прочность», «прилипание», «интенсивность прилипания», «сцепление», «адгезионная связь» и т. д. Подобное разночтение одной и той же величины затрудняет сравнение экспериментальных данных. Как в случае адгезии пленок, так и в случае определения адгезии упругопластических пищевых масс измеряется не истинная адгезия, а пропорциональная ей величина. В связи с этим для количественной характеристики адгезии упруго-пластических масс неприемлемы такие понятия, как работа адгезии и сила адгезии. По существу, адгезия пленок и адгезия упругопластических тел экранируются другими побочными процессами, которые протекают при экспериментальном определении величины адгезии.

Термин «адгезионная прочность» уже использован для характеристики адгезии пленок. В связи с этим адгезию упругопластических структурированных пищевых масс будем оценивать при помощи величины, которую назовем «прочность адгезии».

Для обоснования методов количественной оценки адгезии пищевых масс и предлагаемого способа количественной оценки величины адгезии упругопластических тел, еще раз обратимся к табл. 3.2. Величину адгезии можно определить с помощью различных экспериментальных методов. Их можно разбить на две группы: без нарушения контакта; путем нарушения контакта тел и их удаления друг от друга.

Напомним, что адгезия - это связь между двумя конденсированными телами. Необходимым условием адгезии является непосредственный контакт этих тел. Только в случае адгезии жидких пищевых масс можно определить величину связи между двумя конденсированными телами (жидкостью и твердой поверхностью), не нарушая контакта между ними. Собственно, другие методы определения адгезии жидкости практически отсутствуют. Жидкость обладает минимальной прочностью, поэтому невозможно, например, как-то зацепить каплю жидкости и определить усилие, необходимое для преодоления адгезии этой капли.

При оценке адгезии жидкости имеется одна существенная особенность – определяется лишь равновесная работа адгезии. Равновесность адгезии означает, что работа (сила), идущая на образование адгезионной связи, равна, но противоположна работе (силе), необходимой для преодоления адгезии. Процесс формирования и нарушения адгезии, который зависит от расстояния между телами, проходит последовательно ряд равновесных состояний, при этом совершается максимальная работа. При выводе формул (3.4 – 3.6) подразумевалось, что имеет место равновесный процесс.

К равновесному процессу можно отнести лишь межмолекулярное взаимодействие. Между тем, адгезия жидкости формируется под действием других причин. В зоне контакта может возникнуть химическая связь. На границе раздела жидкости с твердой поверхностью обычно имеют место адсорбционные процессы, которые связаны с повышением концентрации

веществ на границе раздела фаз. Эти и другие процессы нарушают равновесный характер адгезии. Равновесная адгезия составляет только часть всего адгезионного взаимодействия, поэтому оценка адгезии по ее равновесной части является неполной и в известной степени относительной.

В отношении твердых тел, т. е. сыпучих и упругопластических пищевых масс и пленок, нельзя определить равновесную работу адгезии и использовать для этого рассмотренные термодинамические представления. Формулы (3.4 – 3.6), которые основаны на равновесном характере процесса, не могут быть использованы для определения адгезии твердых тел по следующим соображениям. Равновесная адгезия твердых тел определяется при помощи поверхностных натяжений. Величину поверхностного натяжения твердых тел определить достоверно довольно трудно. Кроме того, и это является главным, твердые поверхности энергетически неоднородны. Им свойственна шероховатость. Величина поверхностного натяжения для подобных поверхностей неодинакова.

Нельзя признать удачной попытку придать какой-либо другой смысл удельной свободной поверхностной энергии и поверхностному натяжению твердых пищевых масс. Неоправданно, например, представлять мясной фарш не в качестве структурированной системы, а как некую жидкость. Поверхностное натяжение теста на границе с твердой поверхностью и с газообразной средой нельзя связывать с объемом тестовых заготовок и формоудерживающей способностью. Сопоставление несопоставимых видов энергии – поверхностной и потенциальной – противоречит основополагающим представлениям о свободной поверхностной энергии. Подобные взгляды развивались и в отношении теста.

Адгезия сыпучих материалов, упругопластических систем и пленок определяется путем нарушения связи между телами, удаления одного тела от другого и измерения величин внешнего усилия. Несмотря на общность этой группы способов количественной оценки имеется существенное различие между определением адгезии сыпучих масс и упругопластических масс и пленок.

Внешняя сила, действующая на прилипшие частицы (см. рис. 3.3), направлена противоположно силе адгезии. Если величина силы отрыва будет несколько больше сил адгезии, то выполнится условие:

$$F_{отр} \geq F_{ад} \ . \qquad (3.15)$$

Условие (1.15) означает, что внешняя сила в состоянии преодолеть силу адгезии, нарушить контакт между частицей и поверхностью и осуществить отрыв частиц. Таким образом, условие (3.15) позволяет по величине силы отрыва $F_{отр}$ количественно оценивать силу адгезии отдельных частиц $F_{ад}$ с учетом всех компонент адгезионного взаимодействия. Более подробно реализация условия (3.15) будет рассмотрена ниже.

Оценка адгезии путем отрыва пленок и упругопластических масс имеет

ряд особенностей. Под действием внешней силы нарушается контакт пленки с поверхностью и происходит ее отрыв (см. рис. 3.4). В этих условиях адгезионная прочность определяется обычно в виде работы, связанной с перемещением пленки под действием внешней силы $F_{отр}$ на расстояние H_1. Работа внешней силы $W_{отр}$ тратится на преодоление равновесной $W_{ад}$, неравновесной работы адгезии $W_{на}$ и побочных процессов, связанных с деформацией самой пленки в процессе отрыва $W_д$, появлением в ней внутренних напряжений $W_{вн}$ и с другими потерями $W_п$. В общем случае адгезионная прочность пленок равна

$$W_{отр} = W_{ад} + W_{на} + W_д + W_{вн} + W_п \quad . \qquad (3.16)$$

К числу неравновесной части работы адгезии $W_{на}$ можно отнести и работу, связанную с разъединением и разрядом двойного электрического слоя после нарушения контакта между адгезивом и субстратом (см. рис. 3.4, *б*).

Таким образом, при отрыве пленок определяется адгезионная прочность. Равновесная и неравновесная части работы адгезии входят как составляющие в величину адгезионной прочности. Если равновесная и неравновесная части адгезии пленок определяются только природой контактирующих тел, то величина адгезионной прочности будет зависеть также от размеров пленки, скорости ее отрыва, направления внешней силы отрыва и других факторов, которые не связаны с адгезией.

Адгезия упругопластических масс определяется экспериментально путем отрыва от поверхности под действием внешней силы. Силы отрыва в расчете на единицу площади контакта массы с поверхностью и определяют адгезию пищевых масс.

При отрыве пленок адгезия соотносится с когезией, что обусловливает конкуренцию адгезионной прочности с когезионной прочностью самого материала. При отрыве упругопластических структурированных систем от поверхности и определении адгезии происходит деформация подобных систем, которая связана с их течением. Формирование зоны контакта структурированных систем также обусловливается течением упруго-пластических пищевых масс. В отличие от твердых пленок для структурированных систем, к которым принадлежат упругопластические пищевые массы, характерным является связь прочности этих систем с их реологией.

Иногда условия отрыва от поверхности структурированных систем связывают с липкостью. Липкость – это не физико-химическое, а техническое представление. Липкость обычно связывают со свойствами граничных слоев структурированных тел, обладающих повышенной вязкостью. Между тем под действием внешней нагрузки происходит изменение не только поверхностного слоя, но и свойств самой системы.

В результате внешнего усилия, направленного на преодоление адгезии упругопластических пищевых масс, может наблюдаться адгезионный,

когезионный или смешанный (адгезионно-когезионный) отрыв. Последнее означает, что на части поверхности имеет место нарушение связи между этой поверхностью и пищевой массой, а на остальной части в результате повышенной адгезии нарушается целостность самой массы и часть ее остается на поверхности. Порой бывает трудно определить тип отрыва упругопластической пищевой массы.

Все эти обстоятельства позволяют предложить оценивать адгезию упругопластических структурированных пищевых масс при помощи силы отрыва $F_{отр}$, которая собственно и определяет прочность адгезии.

Прочность адгезии равна:

$$F_{отр} = F_{ад} + F_{на} + F_{д} + F_{теч} + F_{п} \quad , \qquad (3.17)$$

где $F_{ад}$, $F_{на}$ – соответственно равновесные и неравновесные части адгезии; $F_{д}$, $F_{теч}$ – часть внешнего усилия, затрачиваемого на деформацию и течение упругопластических пищевых масс; $F_{п}$ – неучтенные потери.

Итак, адгезия упругопластических структурированных пищевых масс оценивается при помощи прочности адгезии, т. е. величиной внешней силы, отнесенной к единице площади контакта и определяющей отрыв пищевой массы от поверхности.

Пути снижения адгезии пищевых масс

Как уже говорилось, на практике часто требуется снизить адгезию пищевых масс, т. е. возникает необходимость реализации условия (3.1). Уменьшение адгезии должно производиться не вообще, а относительно величины аутогезии сыпучих пищевых масс и когезии жидких и особенно упругопластических пищевых масс.

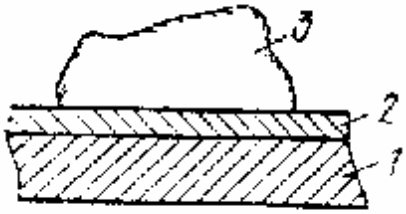

Рис. 3.9. Адгезия массы продукта (3) при наличии на поверхности (1) промежуточного слоя (2)

Снижения адгезии пищевых масс можно достичь путем изменения свойств самих масс, регулированием технологического процесса, применением промежуточного слоя между заготовкой и поверхностью оборудования, при помощи антиадгезионных материалов. Поверхностные и объемные свойства пищевых масс взаимосвязаны. Свойства пищевых масс можно изменять варьированием влажности, введением различных добавок и т. п. В некоторых случаях адгезия зависит от продолжительности контакта

пищевых масс с поверхностью оборудования, их температуры и других технологических параметров. Изменяя в допустимых пределах указанные выше и другие технологические параметры, можно, в известной степени, влиять на величину адгезии пищевых масс.

Эффективным и действенным является снижение адгезии при помощи промежуточного слоя, заключенного между заготовкой пищевого продукта и поверхностью (рис. 3.9). Этот слой должен обладать антиадгезионными свойствами. В качестве промежуточного слоя могут быть использованы нейтральные вещества или сами пищевые массы. Не всегда экономически оправдано применение в качестве антиадгезионных средств пищевых продуктов, которые расходуются не по назначению и в некоторых случаях безвозмездно теряются.

Широкие возможности возникают в связи с использованием полимерных материалов в качестве антиадгезионных. Они являются действенным средством борьбы с отрицательными последствиями адгезии и в настоящее время успешно применяются на практике. Именно этим полимерным материалом в будущем предстоит сыграть ведущую роль в снижении адгезии пищевых масс.

ВОПРОСЫ К ГЛАВЕ 3

1. Приведите классификацию адгезии пищевых масс в зависимости от их свойств.
2. В чем специфика адгезии упругопластических пищевых продуктов и сырья?
3. Каковы особенности адгезии сыпучих пищевых масс?
4. В чем различие между адгезией и когезией пищевых масс?
5. Проведите термодинамический анализ адгезии.
6. Назовите основные причины адгезии.
7. Каковы следствия адгезии пищевых продуктов и сырья?
8. Перечислите особенности адгезии пищевых масс.
9. Как влияют на адгезию изменения фазового состава пищевых продуктов, сырья?
10. Сформулируйте основные способы количественной оценки адгезии пищевых масс.
11. В чем различие между определением адгезии сыпучих упругопластических масс и пленок?
12. Перечислите основные пути снижения адгезии.

4. МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ АДГЕЗИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Приборы и методы измерения адгезии основаны на разрушении адгезионного соединения путем приложения внешнего усилия. По способу приложения усилия различают методы отрыва (равномерного и неравномерного) и сдвига (рис. 4.1). Адгезив (пищевой продукт) на рисунке обозначен темным, субстрат - светлым.

Разделение контактирующих тел в зависимости от их природы и технологических условий может быть по границе контакта (адгезионный отрыв), по слою продукта (когезионный отрыв) и, наконец, смешанным (адгезионно-когезионный отрыв). Это обстоятельство заставляет экспериментаторов перед испытаниями тщательно подготавливать образцы субстрата и адгезива. При адгезионном отрыве нарушаются внешние связи между субстратом и продуктом, которые характеризуют энергию свободной поверхности. При когезионном отрыве нарушаются внутренние связи в продукте, которые зависят от энергии взаимодействия между элементами структуры в условиях объемного напряженного состояния. Для пищевых продуктов чистый адгезионный отрыв наблюдается редко, поэтому в опытах измеряют усилие отрыва субстрата, часто без конкретизации его вида.

На величину адгезии, кроме технологических свойств самого продукта (температуры, влажности, состава и т.д.) и марки конструкционного материала, влияют условия измерения - геометрические, кинематические и динамические параметры прибора. Поэтому к адгезиометрам предъявляются особые требования.

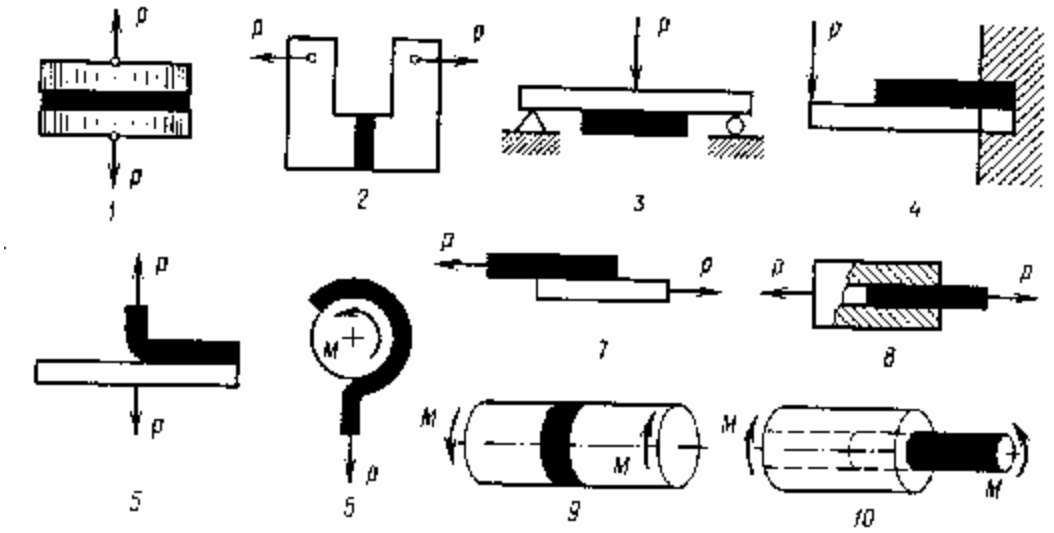

Рис. 4.1. Способы измерения адгезионной прочности:
1 - отрыв нормальной силой при растяжении; 2 - отрыв при внецентренном растяжении (сжатии); 3, 4 - отслаивание материалов при изгибе; 5, 6 - отслаивание при отдирании; 7, 8 - разрушение соединения при сдвиге; 9, 10 - сдвиговое разрушение при кручении

1. Показания приборов должны быть первичными, т. е. не нуждаться в предварительной тарировке на каком-либо эталонном материале и выражаться в абсолютной системе единиц.

2. Перед измерением продукт должен прижиматься к субстрату для установления контакта и удаления из него воздушных пузырьков. Чем больше усилие и продолжительность контакта, тем лучше продукт заполняет микровыступы поверхности. В пределе он контактирует со всей поверхностью, площадь которой может быть больше геометрической. Таким образом, усилие и длительность предварительного контакта должны меняться в широком диапазоне.

3. Измерения, проведенные на пластинах субстрата, имеющих различную площадь при разной толщине слоя, дают различные числовые значения адгезионных характеристик при прочих равных условиях. Поэтому должен быть шаблон для нанесения продукта заданной толщины на пластину.

4. Различные марки материала пластин и степень его обработки влияют на прочность молекулярных контактов. В приборе должна быть предусмотрена возможность замены пластин, которые изготовлены из различного материала при разной шероховатости поверхности.

5. Длительность и кинетика приложения отрывающего усилия различно влияют на распределение деформаций и усилий между пластинами, поэтому приборы должны допускать варьирование скорости приложения силы отрыва или сдвига в широком диапазоне.

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

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

Адгезиометр Б.А. Николаева (рис 4.2, *а*), который сконструирован по

принципу рычажных весов, является простейшим прибором для изучения адгезии вязких пищевых материалов. К рычагу 2 с одной стороны подвешен субстрат в виде диска 1, с другой стороны груз 3. Между диском 1 и основанием 5 намазывается адгезив 4 (в опытах Б.А. Николаева — тесто). Постепенно увеличивая массу груза 3, добиваются отрыва диска 1 от адгезива 4.

Адгезиометр Ю. В. Клаповского (рис 4.2, *б*) предназначен для изучения адгезионных свойств конфетных масс. Он прост по конструкции и надежен в эксплуатации. Массу помещают в емкость 11, имеющую крышку с отверстием, в него с малым зазором входит пластина - субстрат 10. Пластина через упругое измерительное кольцо 9 крепится к штоку 8, скользящему в направляющих. Шток 8 шарнирно крепится к рычагу 7. Усилие отрыва измеряют при помощи тензорезисторов 6, наклеенных на упругий кольцевой элемент 9. Для создания предварительного напряжения контакта используют распорный винт 5 и упор 4.

Перемещение пластины 10 измеряют при помощи фотодиода 3; шторка 2 перекрывает часть светового пучка осветителя 1, тем самым изменяя освещенность фотодиода. Показания тензорезисторов и фотодиода после усиления записываются на шлейфовом осциллографе, позволяя фиксировать изменение во времени усилия отрыва и перемещение субстрата относительно адгезива.

Адгезиометр МТИММПа (рис 4.2, *в*) позволяет изменять геометрические, кинематические и динамические параметры измерения. Прибор имеет подъемный столик 5 для установки пластины - субстрата и пищевого продукта – адгезива. Пластина фиксируется держателем, который смонтирован на тензобалке 4. Для создания предварительного напряжения контакта на тензобалку устанавливают грузы 3. Усилие отрыва пластины 5 прикладывается к поперечине через нить 1. Скорость отрыва пластины от продукта определяется частотой вращения и диаметром шкива, на который намотана нить.

Техническая характеристика прибора

Давление предварительного контакта, Па	От 300 до $3500 \cdot 10^3$
Пределы измерения адгезионного давления, Па	От 300 до 6180
Длительность контакта	Произвольная
Площадь контакта, $см^2$	5; 7; 10; 15
Скорость отрыва субстрата, м/с	1,67; 3,58; 9,3; 19,3

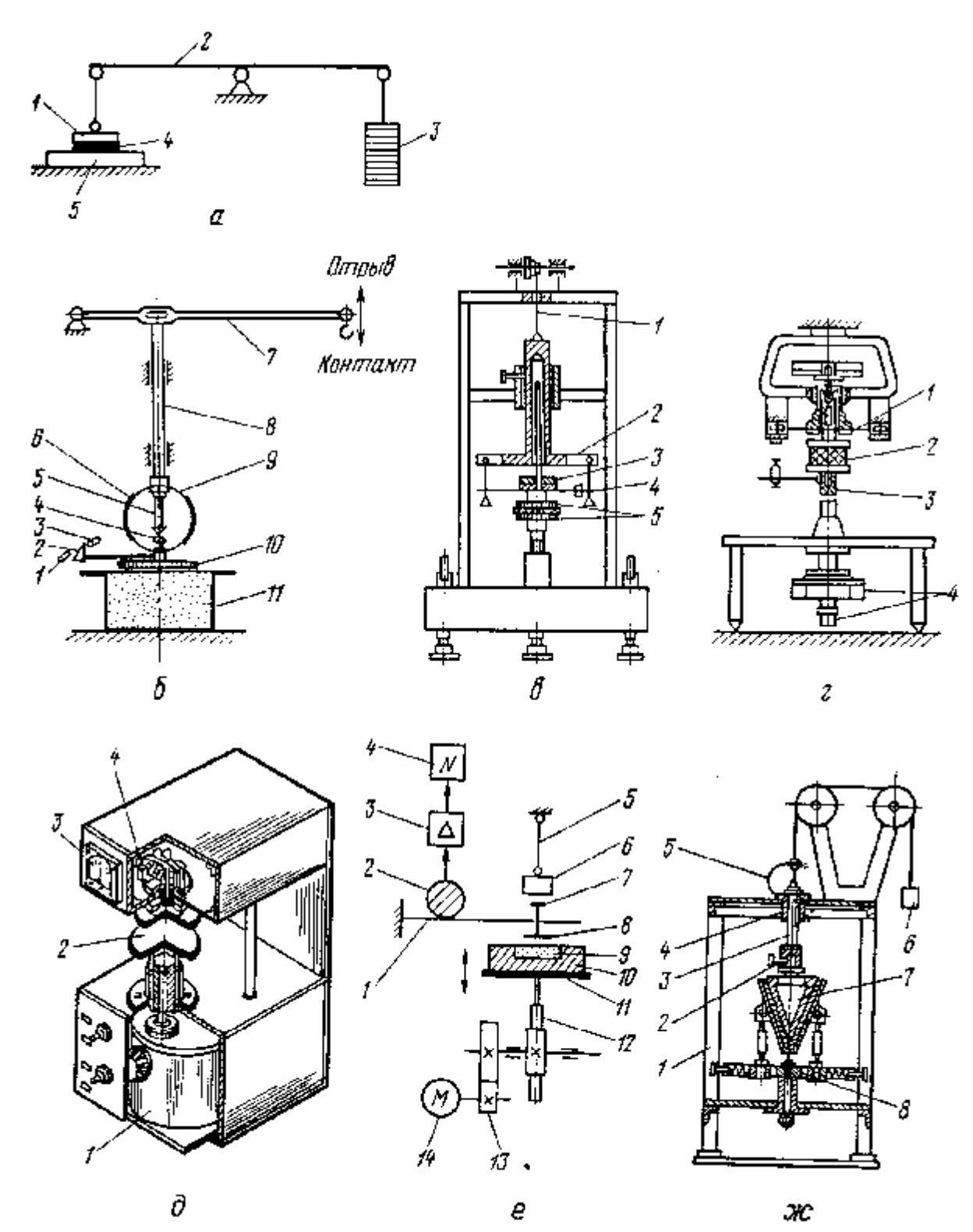

Рис.4.2. Адгезиометры:
а - Б.А. Николаева; *б* – Ю.В. Клаповского; *в* – МТИММПа; *г* – ВНИИМПа;
д – малогабаритный МТИММПа; *е* – МТИППа; *ж* – АМ-1

Адгезиометр ВНИИМПа (рис 4.2, *г*) выпущен малой серией. К основанию прибора прикреплен реверсивный электродвигатель с редуктором

и коробкой скоростей 4. На выходном валу коробки имеется подвижный шток 3 с держателем образца продукта 2. На основании прибора смонтирована также стойка с кронштейном и тензобалкой 1. Держатель образца продукта закрепляется на подвижном штоке, а пластина (субстрат) - в полом патроне, установленном в центре тензобалки.

На описанном адгезиометре, помимо мясопродуктов, испытывали сбивные конфетные массы, тесто для узбекских лепешек и некоторые другие пищевые материалы.

Малогабаритный адгезиометр МТИММПа (рис. 4.2, *д*) позволяет проводить опыты быстро, с повышенной точностью, при постоянных условиях эксперимента. Слой исследуемого продукта наносят на нижнюю пластину 2, которая при помощи электродвигателя 1 подводится к верхней пластине. Продукт между пластинами сжимается, таким образом возникает предварительное напряжение контакта, величину которого можно наблюдать на регистрирующем приборе 3. При достижении заданной величины усилия стрелка прибора 3 замыкает контакт, отключая тем самым электродвигатель и включая реле времени. По истечении времени предварительного контакта (180с) автоматически включается реверсивный двигатель, и шток потенциометрического датчика 4 перемещается в обратном направлении, изменяя сопротивление цепи и вызывая перемещение стрелки прибора 3. Максимальное усилие фиксируется за время, достаточное для того, чтобы записать данную величину, которая пропорциональна адгезионному напряжению.

Адгезиометр нормального отрыва МТИППа (рис. 4.2, *е*) состоит из электродвигателя 14, шестеренной цилиндрической передачи 13, реечной передачи 12, подъемно-опускного столика 11, камеры 10 с термостатирующей рубашкой и полостью для адгезива 9, диска из субстрата или с наклеенным на него субстратом 8, платформы 7 для груза, висящего на нити 5. В тензометрическую измерительную часть прибора входят упругая балочка 1 с наклеенными на нее тензорезисторами 2, усилитель 3 и самописец 4.

Принцип действия адгезиометра заключается в следующем. Исследуемую пищевую массу 9 помещают в камеру 10, которую затем устанавливают на столик 11. В течение определенного времени температура массы при помощи термостата ТС-16 доводится до заданного уровня и поддерживается на нем во время испытаний. Напряжение предварительного контакта субстрата 8 с адгезивом 9 создают сменными грузами 6, для чего столик 11с камерой 10 поднимают до положения, при котором масса груза полностью передается через платформу 7 и стержень диску с субстратом 8. После заданной длительности контакта субстрата с адгезивом реверсивно включается электродвигатель, столик 11 опускается с определенной скоростью, предварительная контактная нагрузка снимается. При этом за счет сил взаимодействия субстрата с адгезивом балочка 1 деформируется

вместе с тензорезисторами 2, что изменяет показания регистрирующего прибора 4.

Перед серией опытов измерительную аппаратуру – упругую балочку 1 с тензорезисторами 2 и усилитель 3 с самописцем 4, тарируют сменными грузами 6, прикладываемыми к платформе 7, с записью показаний на ленте самописца 4. Расшифровка показаний на ленте самописца позволяет определить адгезионное усилие для данных условий эксперимента.

Адгезиометр АМ-1 (рис. 4.2, *ж*) основан на принципе сдвига. Прибор состоит из станины 1, штока 3, втулки 4, фиксатора 2, матрицы 7 с заготовкой, груза 6, тензорезисторов, которые смонтированы на упругом элементе 5. Матрица с выпеченной тестовой заготовкой крепится к вертикальному штоку, затем заготовка обжимается двумя полуконическими колодками. При повороте платформы 8 вокруг вертикальной оси происходит сдвиг заготовки относительно неподвижной матрицы. Подъем матрицы при помощи груза *6* позволяет определить усилие отрыва.

Адгезиометр для изучения адгезии кристаллов сахарозы к различным твердым подложкам (рис. 4.3, *а*) - электромагнитный прибор. Кристалл сахарозы 3 приводится в соприкосновение с подложкой 2, изготовленной из исследуемого материала. К кристаллу прикладывается определенное усилие контакта, которое выдерживается определенное время. Усилие контакта можно варьировать в пределах от 10^{-6} до 10^{-4}Н, время контакта - от 10 до 1000с. Основной элемент адгезиометра - электромагнитная катушка в форме прямоугольной рамки 7, которая может поворачиваться в поле постоянного магнита 6 и возвращаться в положение равновесия под действием спиральной пружины 5 по типу магнитоэлектрической схемы гальванометра. Плавным увеличением силы тока от нуля до заданного значения на рамке 7 создается момент, который передается через ломаный брус 4 кристаллу 3, прижимаемому к подложке 2 с заданным усилием. Уменьшением силы тока до нуля снимается контактное напряжение. При изменении направления тока в цепи рамки на обратное к кристаллу прикладывается плавно нарастающая отрывающая нагрузка. Когда последняя станет равной силе адгезии, кристалл оторвется от пластины, что фиксируется с помощью микроскопа 1. Интервал измеряемых сил сцепления составляет от 10^{-2} до 10^{3}мкН.

Адгезиометр для измерения адгезии формового мармелада (рис. 4.3, *б*) работает по принципу отрыва конструкционного материала от поверхности массы после ее застудневания. Усилие отрыва измеряется вакуумметром. Основной частью прибора является корпус 1 с крышкой 4, на которой имеется штуцер для подсоединения шланга. Корпус соединяется с крышкой гайкой 3. В центральное отверстие вставляется втулка 7. Для предотвращения выскальзывания мармеладной массы стенка корпуса 1 с внутренней стороны выполнена конусообразной. После заполнения массой 2 в корпус вкладывают пластину 6, изготовленную из исследуемого материала.

После окончания процесса студнеобразования втулку 7 вынимают, чтобы образовалось отверстие внутри студня, затем собирают корпус с крышкой, и прибор с помощью шланга 5 подсоединяют к вакуум-насосу и вакуумметру. При достижении определенного разрежения происходит отрыв пластины 6 от мармеладной массы, при этом величина разрежения резко уменьшается. По показаниям вакуумметра в момент отрыва пластины с учетом площади контакта массы с пластиной определяют величину адгезии.

Адгезиометр для изучения адгезии помадных конфетных масс (рис. 4.3, *в*) имеет ходовой винт 1, равномерно перемещающийся по вертикали от электродвигателя через систему передач. Крючок 6 опирается на призму коромысла 7, которое, в свою очередь, призмами передает нагрузку на упругую балку 8, опирающуюся на призмы. Так как между сечениями А и В балка работает в условиях чистого изгиба, то на этом участке установлены тензорезисторы, сигналы от которых записываются на осциллографе. Свободные концы винта 1 и крючка 6 находятся в термостатическом шкафу 2, в котором поддерживаются заданные температура и влажность воздуха.

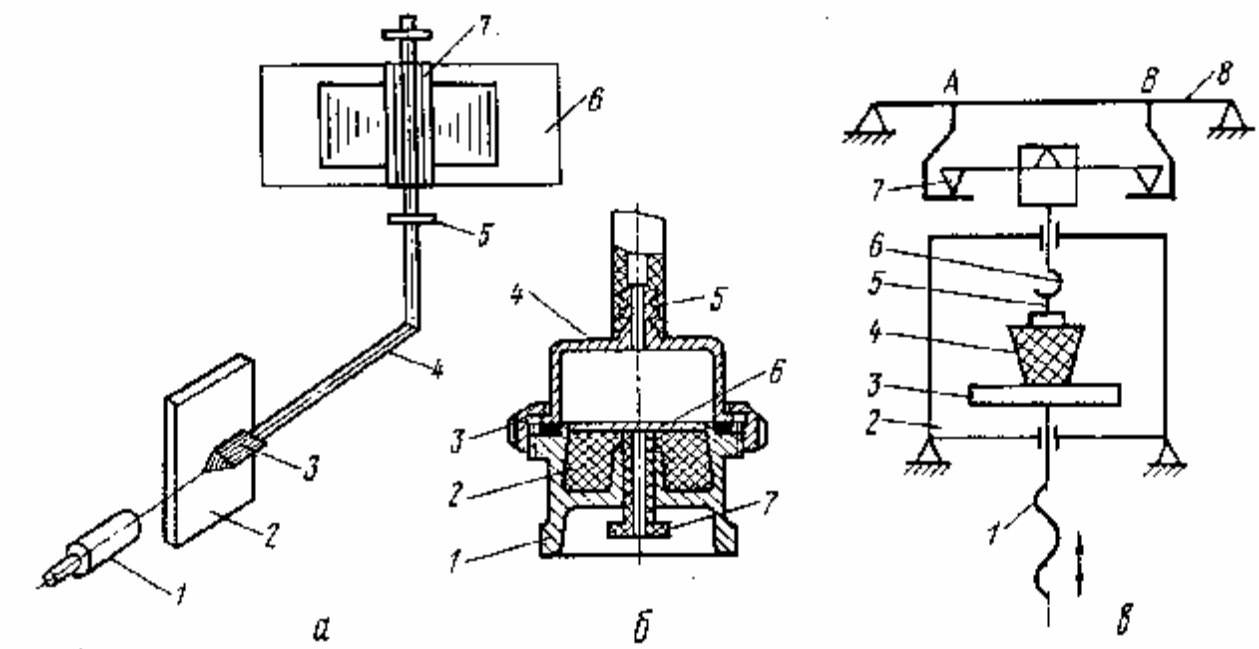

Рис. 4.3. Приборы для изучения адгезии кристаллов сахарозы *(а),* формового мармелада *(б),* конфетной помады *(в)*

На поверхности подложки 3, изготовленной из испытуемого материала и закрепленной в специальном зажиме, при помощи приспособления изготовляется форма из маисового крахмала с полостью в виде усеченного конуса, в которую заливается помадная масса. В жидкую помаду заглубляют жестяной цилиндр с проволочным кольцом 5 для крепления к крючку 6. После затвердения образца крахмал счищают, зажим с подложкой 3 закрепляют на винте /, а кольцо 5 надевают на крючок 6 - образец 4 и подложка 3 оказываются связанными между собой только адгезионной связью.

Образцы готовят при температуре помады 70°С, температура подложки 20 °С, длительность контакта адгезива с субстратом 2ч.

5. АДГЕЗИОННЫЕ И ФРИКЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОДУКТОВ

Физико-механические свойства пищевого сырья и продуктов зависят от таких факторов, как температура, влажность, величина, продолжительность и скорость механического воздействия, а также срок хранения, способ транспортирования, получения и др.

На адгезионные свойства теста оказывают влияние различные факторы, основными из которых являются: продолжительность и напряжение контакта, вид, марка, топография и состояние поверхности субстрата; физическое состояние поверхности адгезива; наличие промежуточного граничного слоя, а также влияние внешнего электрического поля в зоне контакта субстрата с адгезивом.

Адгезию мучного теста к различным твердым поверхностям рассматривают как действие межмолекулярных сил, которые значительно зависят от его реологических свойств: в начальный момент происходит увеличение площади контакта за счет медленной эластичной деформации, затем в основном за счет пластичного течения. При этом с увеличением времени и напряжения контакта адгезионная прочность возрастает (табл. 5.1). На величину адгезионной прочности пищевых материалов влияют не только условия формирования адгезионного шва, но в значительной степени и условия испытаний.

Опыты с пшеничным тестом из муки первого сорта показали, что на адгезию теста существенное влияние оказывают время и напряжение контакта, влажность муки и продолжительность замеса теста, а также материал подложки. При изменении времени контакта от 1 до 5 мин адгезионное напряжение σ_a повышается от 7 до 9кПа; при увеличении напряжения контакта $\sigma_к$ от 5 до 20МПа σ_a повышается от 4 до 9,2кПа; увеличение влажности от 40 до 50% приводит к изменению σ_a от 6,2 до 12,8кПа.

Адгезия теста зависит как от интенсивности, так и от продолжительности замеса. Рост внутренних напряжений в тесте в процессе замеса до полного развития его структуры сопровождается снижением адгезии, а при перемесе (разрушение структуры теста и снижение его прочностных свойств) адгезия теста к твердым поверхностям увеличивается.

Таблица 5.1

Адгезионное напряжение различных пищевых продуктов

Пищевой продукт (адгезив)	Материал субстрата	Параметры предварительного контакта		Адгезионное напряжение, Па
		Время, с	Напряжение, Па	
1	2	3	4	5
Свинина поперек волокон	Сталь Ст3	3 300	4900 4900	2000 4200
Колбасный фарш	Сталь Ст3	3 300	4900 4900	14400 16620
Говядина вдоль волокон	Сталь Ст3	3 300	3430 3430	2980 6700
Фарш докторской колбасы	Сталь Ст3	3 300	4900 4900	12300 15620
	Фторопласт-4	3 300	4900 4900	10400 18500
Конфетная масса пралине	Сталь Ст3	0 0 20 20	1870 3740 1870 3740	1130 1690 1430 1850
Творожная масса	Сталь Ст3	3 600	4910 4910	8300 11200
	Фторопласт-4	3 600	4910 4910	12500 14300
Тесто для батонов первого сорта, влажность 41%, температура 24°С	Сталь Ст3	3 3	1035 3135	1935 4900
	Бельтинг	3 3	1035 3135	900 1650
Тесто для матнакаша высшего сорта, влажность 41%, температура 24°С	Сталь Ст3	3 3 3	1035 3135 1035	3400 5150 1000
	Бельтинг	3	3135	2700
Конфетная масса «Сливочная помадка», температура 24°С	Сталь 1Х18Н9Т	5 5 60 60	1960 9800 1960 9800	1200 3800 2400 4300

Окончание табл. 5.1

1	2	3	4	5
Конфетная масса «Теннис», температура 34°С	Сталь Ст. 3	1 30 1 30	1870 1870 11220 11220	1130 1640 2820 3200
Конфетная масса «Буревестник»	Фторопласт-4	10 60	5450 5450	1700 2335
	Сталь 1Х18Н9Т	10 60	5450 5450	2265 2940

В литературе определено влияние материала субстрата и напряжения контакта на σ_a теста для батонов и теста для армянского матнакаша. Материалом субстрата были: сталь Ст. 3, дюралюминий Д-16, фторопласт-4, органическое стекло и бельтинг. Время контакта 3с. Установлено, что наименьшим σ_a к тесту обладает бельтинг, адгезионное напряжение которого в 2,5 - 3 раза ниже по сравнению с неткаными материалами. При малых напряжениях контакта (1кПа) σ_a теста для батонов заметно зависит от материала субстрата: для стали σ_a = 1,9кПа; дюралюминия - 2,4кПа; органического стекла - 3,3кПа; фторопласта - 2,9кПа и бельтинга - 0,9кПа. При $\sigma_к$ более 2,5кПа наибольшая адгезия наблюдается у стали, наименьшая - у фторопласта.

Зависимость σ_a (в кПа) от $\sigma_к$ (в кПа) при времени контакта 3с и температуре 22 - 24 °С в диапазоне изменения $\sigma_к$ от 1,0 до 3,1кПа имеет линейный вид:

$$\sigma_a = A + B\,\sigma_к\,, \qquad (5.1)$$

где A и B—эмпирические коэффициенты (табл. 5.2).

Таблица 5.2

Коэффициенты уравнения (5.1)

Материал субстрата	А		В	
	Тесто для батонов	Тесто для матнокаша	Тесто для батонов	Тесто для матнокаша
Сталь Ст. 3	0,51	2,57	1,43	0,83
Дюралюминии Д-16	1,55	2,73	0,85	0,57
Фторопласт-4	2,09	3,03	0,81	0,47
Органическое стекло	2,59	2,49	0,71	0,81

С физической точки зрения адгезия возникает за счет адсорбции молекул теста на поверхности субстрата с последующим образованием двойного электрического слоя в тончайшем (до 20нм) приповерхностном слое теста. Среди компонентов теста наибольшую энергию адсорбции к металлам имеет вода. Если ее удалить с поверхности, то адгезия теста

должна уменьшиться. При этом интенсивность испарения поверхностной влаги должна быть большой, чтобы образующаяся тонкая корочка теста препятствовала удалению влаги из объема заготовки. Экономичное техническое решение этой задачи - применение интенсивного соплового обдува.

Предложено уравнение множественной линейной регрессии, устанавливающее зависимость σ_a теста для матнакаша к разным конструкционным материалам:

$$\sigma_a = a_0 + a_1 t + a_1 \Delta p + a_3 \sigma_к, \qquad (5.2)$$

где σ_a - адгезионное напряжение, кПа; t - время обдува, с; Δp - напор воздуха, Па; $\sigma_к$ - напряжение контакта, кПа; a_1, a_2, a_3 - коэффициенты регрессии (табл. 5.3).

Таблица5.3

Коэффициенты уравнения (5.2)

Материал субстрата	a_0	a_1	a_2	a_3
Сталь Ст. 3	2,523	—0,109	—1,882	0,763
Дюралюминии Д-16	2,727	—0,127	—2,002	0,877
Органическое стекло	2,793 -	—0,119	—2,052	0,983
Фторопласт-4	2,331	—0,122	—1,241	0,915
Бельтинг	1,054	—0,068	—1,870	0,530

Уравнение (5.2) справедливо при изменении времени обдува от 1 до 35с, напора воздуха - от 49 до 490Па и напряжении контакта - от 1 до 3кПа.

При наложении внешнего постоянного электрического поля в зоне контакта тесто - металл адгезионные свойства теста изменяются, особенно заметно при подключении к субстрату отрицательного полюса источника питания.

О. П. Боровикова и А. Н. Спирин исследовали изменение адгезионных свойств пельменного теста в зависимости от времени и напряжения контакта, скорости отрыва на универсальном приборе ВНИИМПа (см. рис. 4.2,г). В ходе исследований определяли адгезионное напряжение при отрыве диска из нержавеющей стали площадью 10см^2. При этом варьировали: время контакта от 3 до 180с; скорость отрыва от 2,5 до 160мм/с; напряжение контакта от 5 до 20кПа.

Установлена линейная зависимость σ_a от $\sigma_к$ (в Па):

$$\sigma_a = 0{,}65\sigma_к. \qquad (5.3)$$

В диапазоне изменения скорости отрыва v_0 от $2{,}5\cdot10^{-3}$ до $40\cdot10^{-3}$м/с

$$\sigma_a = 14{,}0 v_0^{0{,}153}. \qquad (5.4)$$

С увеличением скорости характер отрыва меняется от когезионного и смешанного до чисто адгезионного. Для уменьшения прилипания тесто рекомендуется обрабатывать при скорости выше 160мм/с.

Адгезия конфетных помадных масс была изучена при температуре

24°С, влажности 10,5 - 11% и напряжении контакта 5,45кПа. Установлено, что σ_a зависит от времени контакта, причем наиболее резко оно изменяется в первые 20с. При увеличении времени контакта σ_a меняется незначительно и после минутного контакта остается практически постоянным, что характерно для всех исследованных материалов - сталей Ст.3 и 1Х18Н9Т, латуни, фторопласта-4. Наименьшее σ_a наблюдается для фторопласта-4: при времени контакта 10с для массы «Буревестник» σ_a = 1,7кПа, для массы «Красный цветок» - 1,09кПа, для массы «Весна» - 2,1кПа. При контакте массы со сталью марки 1Х18Н9Т адгезионное напряжение соответственно равно 2,27; 3,68 и 2,41кПа. С увеличением продолжительности контакта конфетной массы с фторопластом до 60с σ_a возрастает примерно в 1,4 раза.

Изучена адгезия конфетных масс «Подольчанка» (содержание жира 16,6%, без фруктовой части) и «Дуэт» (без жира, содержание подварки 25 %) к следующим конструкционным материалам: нержавеющая сталь, фторопласт-4, протакрил, полиэтилен. Напряжение контакта изменяли от 50 до 350кПа; время контакта - от 5 до 20с; скорость отрыва - от 5 до 15мм/с. Выяснено, что при минимальном напряжении контакта все материалы ведут себя практически одинаково по отношению к конфетным массам. При увеличении напряжения контакта от 50 до 350кПа σ_a стали к конфетным массам возрастает более чем в 3 раза, у других материалов - в 2,4-2,6 раза (табл. 5.4).

Таблица 5.4

Адгезионное напряжение (в Па) конфетной массы «Дуэт»

Конструкционный материал	Напряжение контакта, кПа			
	50	100	200	350
Сталь	74	94	163	226
Фторопласт-4	64	80	114	153

Для пралиновой конфетной массы «Парус» при температуре от 34 до 40°С предложено уравнение вида:

$$\sigma_a = K + at_к + b\sigma_к, \qquad (5.5)$$

где *К, а, b* - эмпирические коэффициенты (табл. 5.5); $t_к$ - время предварительного контакта, с; $\sigma_к$ - напряжение контакта, Па.

Таблица 5.5

Коэффициенты уравнения (5.1) при скорости отрыва 10мм/с

Конструкционный материал	*К*, Па	*а,* Па/с	*b*
Сталь Ст.3	1030	8,345	0,18
Текстолит	1226	8,363	0,18
Алюминий АЛ1	1360	8,426	0,19
Фторопласт-4	1484	8,465	0,19

Винипласт	1632	8,542	0,20

Данные табл. 5.6 иллюстрируют влияние времени контакта на σ_a конфетных масс «Космические» и «Русский узор» при температуре 29°С.

σ_a слабомолочной помадной массы «Виктория» к стали 45 предложено выразить уравнением:

$$\sigma_a = -1799+233t_n+471t_м+607v, \qquad (5.6)$$

где t_n и $t_м$ – температура соответственно подложки и массы, °С; v – скорость отрыва массы от подложки, м/с.

Таблица 5.6

Зависимость σ_a (в кПа) от времени контакта и материала субстрата

Конструкционный материал	Время контакта, с					
	5	10	20	30	60	90
Конфетная масса «Космические» при $\sigma_к$ = 5,45кПа						
Фторопласт-4	0,56	0,97	1,28	1,30	1,35	1,39
Винипласт	0,69	1,50	1,59	1,60	1,61	1,75
Сталь Ст.3	1,03	1,89	1,96	1,97	1,99	2,04
Конфетная масса «Русский узор» при $\sigma_к$ = 25,2кПа						
Фторопласт-4	18,7	20,0	21,4	21,5	21,9	23,0
Алюминий АЛ1	23,0	24,1	24,2	24,6	24,9	25,8

Температура подложки может изменяться от 0 до 70°С, температура массы – от 12 до 70°С, скорость отрыва – от 1 до 30м/с.

На адгезионные характеристики конфетных масс большое влияние оказывает температура, с повышением ее значения характеристики возрастают (табл.5.7).

Таблица 5.7

Зависимость σ_a (в кПа) от температуры конфетной массы «Былина» и конструкционного материала при $\sigma_к$ = 1,4кПа

Температура массы, °С	Конструкционный материал					
	сталь 45	бронза Бр.АЖ 9-4	дерматин	фторопласт-4	силиконовая резина	полиэтилен ПЭВД
26	0,90	0,90	0,40	0,90	0,70	-
28	1,00	1,30	0,40	1,20	0,70	0,20
30	1,60	2,70	0,90	2,20	1,00	0,40
32	3,40	5,80	2,00	5,00	2,80	1,30
34	6,80	8,30	5,30	7,90	6,20	3,60
36	7,55	9,25	6,80	9,00	7,25	5,20

На σ_a конфетных масс пралине большое влияние оказывает материал субстрата (табл. 5.8).

Таблица 5.8

Зависимость *a,* от а, и конструкционного материала

Конструкционный материал	Напряжение предварительного контакта, кПа			
	0,22		1,4	
	Масса «Балет»	Масса «Веселые нотки»	Масса «Балет»	Масса «Веселые нотки»
Бронза Бр.АЖ 9-4	7,8	9,0	12,0	13,0
Резина пищевая 14.150.10	7,2	7,5	10,1	10,5
Сталь 45	6,7	6,9	10,2	10,5
Фторопласт-4	6,2	6,9	10,7	11,0
Резина силиконовая	5,3	6,9	7,8	10,2
Органическое стекло	5,0	5,4	6,9	7,8
Полиорганосилоксан	4,0	4,3	6,0	6,5
Дерматин	3,6	5,1	5,7	8,4
Полиэтилен смесевой	3,0	3,2	4,6	4,8
ПЭВД 15803-020	2,1	2,8	3,2	3,8
Силиконовый полимер	1,5	1,8	2,0	2,5
ПЭФ с полиуретановой пропиткой	1,3	1,8	2,0	2,5

Сбивные конфетные массы типа «Птичье молоко» проявляют повышенную адгезию ко всем материалам (табл. 5.9).

Таблица 5.9

Зависимость σ_a (в кПа) конфетной массы «Птичье молоко» от конструкционного материала

Конструкционный материал	σ_a, кПа	Вид отрыва
ТЛФТ-5, пропитанная КЛТ-30	37,4	Когезионно-смешанный
Бумага	27,5	Когезионный
Силиконовая резина (рифление лавсаном (5259))	25,8	Смешанный
Полиамидная ткань с импрегнированием силиконовым полимером	20,0	Смешанно-адгезионный
ПЭВД (основа – чефер)	15,3	Адгезионно-смешанный
ПЭС (основа – КЛТ-30)	14,6	Адгезионно-смешанный
ПЭС (рифление капроном 5258-85)	13,6	Адгезионный

Предложена формула для определения σ_a (в Па) плавленого сыра:

$$\sigma_a = a_0 t_к^{\,b}, \qquad (5.7)$$

где a_0 - адгезия при времени контакта 1с; $t_к$ - время контакта, с; b - коэффициент, выражающий темп нарастания адгезии при изменении $t_к$ от 3 до 420с (табл. 5.10).

Адгезия фарша «Русских сосисок» была изучена при разной толщине слоя и влажности. С увеличением времени и напряжения предварительного контакта адгезионное напряжение повышается:

$$\sigma_a = \sigma_{a1} + a\lg t_к, \qquad (5.8)$$

где σ_{a1}, - адгезионное напряжение при времени контакта 1с, Па;
a - эмпирический коэффициент, характеризующий темп нарастания адгезии при увеличении времени контакта, Па; $t_к$ - время контакта, с.

Таблица 5.10

Коэффициенты уравнения (5.7) при $\sigma_к$ = 4900 Па для различных сыров

Конструкционный материал	«Новый»		«Дружба»		«Янтарь»	
	$a_0 \cdot 10^{-3}$	b	$a_0 \cdot 10^{-3}$	b	$a_0 \cdot 10^{-3}$	b
Фторопласт 4	0,4	0,39	2,4	0,18	7,2	0,14
Сталь Ст 3	0,6	0,45	2,3	0,15	5,0	0,18
Латунь	1,6	0,30	3,0	0,17	-	-
Нержавеющая сталь	3,6	0,17	4,1	0,15	8,0	0,12
Чугун	3,8	0,21	4,5	0,18	10,0	0,12

В качестве субстрата были использованы дюралюминий (a = 2500Па), нержавеющая сталь (a =2100 Па), сталь Ст.3 (a = 2100Па), чугун (a = 2100Па), латунь (a = 2700Па) и фторопласт-4 (a = 3900Па). Увеличение напряжения контакта ведет к повышению адгезии. Материал субстрата, хотя и оказывает влияние на адгезию фарша, но не так ярко, как на конфетные массы. Понижение температуры фарша от 17-18 до 4-5°С ведет к уменьшению адгезионного напряжения на 30-40%. Наибольшее напряжение наблюдали при температуре 23-27°С.

В качестве показателей, характеризующих сопротивление смещению кондитерских изделий, Ю.В. Бурляем приняты коэффициенты трения скольжения, коэффициент сопротивления относительному сдвигу и усилие сопротивления выемке и съему изделий после их изготовления.

Коэффициент трения кондитерских изделий определяли перед подачей их на операцию упаковывания, а хлебобулочных изделий - сразу после выхода из печи, а также после их охлаждения в течение 5 и 25мин. Замеряли силу трения изделий, нагруженных только силой собственной массы. Коэффициент трения скольжения определяли как отношение силы трения к силе тяжести изделия (табл. 5.11). Скорость пастилы изменяли от 0,2 до 1м/с. В табл. 5.12 приведены средние значения коэффициентов трения скольжения для основных групп кондитерских изделий при скорости скольжения от 0,06 до 1,0м/с. Большой интервал значений коэффициентов показывает, что поверхности изделий одного вида значительно отличаются по форме и

высоте макро- и микронеровностей.

Таблица 5.11

Коэффициенты трения пастилы бело-розовой при температуре 25-30°С и влажности 80-88%

Фрикционный материал	Продолжительность выстойки 0-4ч		
	Грани пастилы:		
	нижняя	верхняя	боковая
1	2	3	4
Ткань прорезиненная	0,65-1,25	0,67-1,24	0,66-1,24
Ткань прорезиненная, покрытая сахарной пудрой	0,80-0,89	0,77-0,84	0,86-0,89
Бельтинг	1,38-1,65	1,25-1,61	1,0-1,44
Поролон	0,94-1,05	0,85-0,96	-
Сталь нержавеющая	0,30-0,51	0,27-0,54	0,22-0,53
Сталь 45	0,24-0,40	0,24-0,31	0,26-0,29
Алюминий	0,23-0,44	0,28-0,49	0,30-0,40
Резина	0,35-0,52	0,34-0,50	0,30-0,48
Фторопласт-4	0,30-0,40	0,29-0,41	0,27-0,38
Винипласт	0,17-0,31	0,17-0,27	0,15-0,25
Оргстекло	0,18-0,32	0,16-0,35	0,13-0,30
Фанера	0,18-0,36	0,19-0,36	0,25-0,32
Дерево (сосна)	0,23-0,46	0,21-0,46	0,23-0,46
Фрикционный материал	Продолжительность выстойки 8-12ч		
	Грани пастилы:		
	нижняя	верхняя	боковая
Ткань прорезиненная	0,96-1,24	0,98-1,3	0,70-1,21
Ткань прорезиненная, покрытая сахарной пудрой	0,79-0,91	0,83-0,87	0,83-0,87
Бельтинг	0,78-1,20	0,75-1,04	0,71-0,98
Поролон	0,85-1,20	0,71-0,96	0,85-1,04
Сталь нержавеющая	0,33-0,48	0,39-0,50	0,33-0,58
Сталь 45	0,43-0,58	0,48-0,58	0,53-0,62
Алюминий	0,22-0,41	0,30-0,39	-
Резина	0,34-0,49	0,37-0,53	0,43-0,51
Фторопласт-4	0,18-0,36	0,16-0,35	0,15-0,32
Винипласт	0,19-0,27	0,17-0,30	0,21-0,31
Оргстекло	0,17-0,30	0,13-0,24	0,18-0,25
Фанера	0,32-0,41	0,25-0,41	0,29-0,40
Дерево (сосна)	0,25-0,45	0,25-0,45	0,31-0,47

В УкрНИИпродмаше были определены коэффициенты трения различных сортов хлеба при охлаждении на ленте из бельтинга и из нержавеющей стали марки 1Х18Н9Т (табл. 5.13).

Ниже приведены значения коэффициентов трения скольжения формового хлеба по различным поверхностям (первая цифра указана для скорости 100мм/с, вторая - для 400 мм/с):

Сталь	0,25-0,26
Алюминий	0,33-0,37
Фанера	0,35-0,36
Хлопчато-бумажная ткань	0,37-0,41
Дерматин	0,38-0,40

Таблица 5.12

Коэффициенты трения скольжения кондитерских изделий при температуре 20-25°С и влажности 75-80%

Наименование изделия	Сталь Ст.3				Алюминий АЛ5			
	Скорость скольжения, м/с							
	0,06	0,2	0,6	1,0	0,06	0,2	0,6	1,0
Конфеты мягкие	0,24	0,32	0,5	0,6	0,2	0,22	0,25	0,26
Карамель леденцовая	0,16	0,16	0,18	0,22	0,11	0,12	0,14	0,15
Карамель с начинкой	0,16	0,2	0,26	0,27	0,13	0,14	0,16	0,15
Мармелад формовой	0,19	0,21	0,24	0,26	0,16	0,19	0,22	0,23
Зефир бело-розовый	0,2	0,23	0,28	-	0,22	0,24	0,27	-
Вафли	0,14	0,17	0,2	0,2	0,15	0,17	0,21	0,22
Печенье сахарное	0,12	0,14	0,19	0,21	0,13	0,15	0,19	0,19
Печенье затяжное	0,14	0,16	0,22	0,27	0,16	0,18	0,22	0,23
Наименование изделия	Винипласт ВНТ				Резина техническая пищевая ПМ-3М			
	Скорость скольжения, м/с							
	0,06	0,2	0,6	1,0	0,06	0,2	0,6	1,0
Конфеты мягкие	0,34	0,37	0,4	0,41	0,5	0,56	0,7	0,69
Карамель леденцовая	0,14	0,15	0,18	0,21	0,45	0,42	0,35	0,34
Карамель с начинкой	0,12	0,13	0,18	0,26	0,36	0,37	0,36	0,35
Мармелад формовой	0,13	0,14	0,19	0,2	0,28	0,28	0,3	0,29
Зефир бело-розовый	0,14	0,16	0,19	0,19	0,26	0,28	0,32	0,34
Вафли	0,1	0,11	0,13	0,13	0,45	0,45	0,47	0,46
Печенье сахарное	0,12	0,13	0,16	0,16	0,4	0,44	0,47	0,48
Печенье затяжное	0,12	0,14	0,19	0,22	0,39	0,40	0,46	0,56

Усилие сопротивления относительному смещению определяли на глазированных шоколадом конфетах, формовом мармеладе и печенье. Испытания проводили при разной скорости изделий и сжимающей нагрузке

для двух случаев перемещения: изделия относительно другого изделия и направляющей стенки; изделия относительно двух других изделий. Во время опытов фиксировали усилие сопротивления контактному перемещению, усилие контакта испытуемого изделия и частоту циклов механизма перемещения. Под коэффициентом сопротивления относительному сдвигу Ю.В. Бурляй понимает отношение усилия, необходимого для перемещения изделия относительно опорной поверхности и двух соседних изделий (или направляющей и соседнего изделия), к нормальной составляющей усилия контакта. Результаты замеров приведены в табл. 5.14.

Таблица 5.13

Коэффициенты трения хлебобулочных изделий.

Наименование изделия	Время охлажде-ния, мин	поверхность контакта		
		сталь нержавеющая		бельтинг
		охлаждение на бельтинге	охлаждение на металле	
Хлеб формовой пшеничный первого сорта	0 5 25	0,235 0,235 0,255	0,235 0,535 0,675	0,580 0,580 0,630
Хлеб формовой ржано-пшеничный (столовый)	0 5 25	0,260 0,300 0,370	0,260 0,540 0,675	0,740 0,600 0,600
Хлеб формовой ржаной (обойный)	0 5 25	0,260 0,260 0,370	0,260 0,530 0,650	0,640 0,550 0,600
Хлеб круглый подовый пшеничный	0 5 25	0,130 0,145 0,175	0,130 0,140 0,250	0,615 0,625 0,640
Хлеб круглый подовый ржано-пшеничный	0 5 25	0,160 0,145 0,205	0,160 0,230 0,350	0,850 0,700 0,770
Батон нарезной	0 5 25	0,160 0,185 0,300	0,160 0,200 0,750	0,640 0,720 0,650

Наблюдения показали также, что при усилии сжатия свыше 4-5Н для мармелада и 20-25Н для глазированных конфет происходит поверхностное разрушение корпусов конфет, они теряют товарный вид. Для сахарного печенья при перемещении одного изделия относительно другого коэффициент сопротивления находится в пределах 1,15-0,9 при усилии сжатия 0,2-4,0Н, для затяжного печенья коэффициент сопротивления изменяется от 1,04-0,75.

Таблица 5.14

Зависимость коэффициента сопротивления от условий перемещения изделий

Изделие	Частота циклов механизма перемещения, Гц	Усилие сжатия, Н	Коэффициент сопротивле-ния
Глазированные шоколадные конфеты	8-14	3,3-18,8	1,52-1,05
Формовой яблочный мармелад	8	0,3-3,0	10,7-4,3
	14	1,2-3,4	4,6-3,8

Нормальное давление при времени выдержки 24 ч, кПа	2	4	6	8	10
Коэффициент трения	0,65	0,76	0,83	0,87	0,89

С увеличением нормального давления коэффициент трения мякиша сухарных плит увеличивается заметно до давления 8кПа, а затем практически остается постоянным. При давлении 12кПа и времени выдержки 4ч коэффициент трения равен 0,7; при времени 8ч - 0,8; при 24 ч - 0,91 и при 48ч - 1,0. Увеличение коэффициента трения объясняется изменением истинной площади контакта и повышением адгезионных связей.

Зависимость коэффициента трения мякиша от скорости скольжения имеет сложный характер: повышение скорости от 0,3 до 2-3м/с ведет к падению коэффициента от 0,6 до 0,4; при дальнейшем росте скорости до 12-14м/с коэффициент увеличивается до 0,7. Подобного рода зависимости возможны только в условиях внешнего трения с граничной смазкой, роль которой играют жиры, входящие в состав продукта.

Определены статический и динамический коэффициенты трения свежих овощей и фруктов при скольжении по стальной поверхности. Динамический коэффициент трения был найден при скорости скольжения от 2 до 12,2м/с (табл. 5.15).

Фрикционные свойства пшеничного теста изучали при температуре 20-22°С на трибометре, схема которого приведена на рис. 4.6, *г*. Были взяты следующие конструкционные материалы: сталь Ст.3, дюралюминий Д-16, оргстекло и фторопласт-4 с шероховатостью рабочей поверхности R_a = 6,3 и R_a = 0,1 по ГОСТ 2789-73. Напряжение контакта изменяли от 1,82 до 7,27кПа, скорость скольжения - от 0,03 до 0,15м/с (табл. 5.16).

Таблица 5.15

Зависимость статического (в числителе) и динамического (в знаменателе) коэффициентов трения свежих овощей и фруктов от нормального давления

Овощи и фрукты	Давление, кПа			
	50	100	150	200
Айва	0,61/0,26	0,55/0,24	0,47/0,22	0,44/0,18
Груша	0,31/0,25	0,28/0,19	0,25/0,09	0,17/0,10
Яблоко	0,28/0,23	0,30/0,14	0,29/0,11	0,29/0,10
Огурец	0,16/0,05	0,16/0,04	0,15/0,04	0,15/0,05
Тыква	0,42/0.30	0.44/0,34	0,38/0,22	0,32/0,23
Баклажан	0,29/0,13	0,25/0,09	0,19/0,09	0,17/0,08
Лук репчатый	0,24/0,14	0,26/0,15	0,27/0,08	0.32/0,06
Свекла столовая	0,40/0,15	0,38/0,13	0,34/0,21	0,36/0,20
Морковь столовая	0,46/0,23	0,40/0,30	0,39/0,20	0,38/0,13
Картофель	-/0,22	0,28/0,21	0,26/0,15	0,35/0,12

Таблица 5.16

Зависимость коэффициента трения скольжения пряничного теста от напряжения контакта*, скорости скольжения и материала

Конструкционный материал и шероховатость его поверхности	Скорость скольжения, м/с			
	0,03	0,06	0,11	0,15
Сталь Ст.3	1,83	1,93	1,95	1,83
R_a = 0,1	1,10	1,10	1,10	1,05
	0,65	0,70	0,69	0,65
	2,04	2,04	2,04	2,04
R_a = 6,3	1,10	1,10	1,10	1,15
	0,70	0,65	0,71	0,69
Дюралюминий Д-16	1,82	1,85	2,05	2,20
R_a = 0,1	1,09	1,20	1,43	1,60
	0,76	0,85	1,09	1,20
	1,90	1,95	2,05	2,23
R_a = 6,3	1,63	1,61	1,63	1,68
	1,34	1,60	1,90	1,50
Органическое стекло	1,18	1,25	1,52	1,66
R_a = 0,1	1,09	1,15	1,30	1,33
	0,68	0,80	1,02	1,13
Фторопласт-4	0,50	0,68	0,95	1,14
R_a = 0,1	0,57	0,57	0,80	0,93
	0,55	0,61	0,76	0,88

* Коэффициенты первой строки получены при напряжении контакта 1,82кПа; второй – 3,64кПа; третьей – 7,27кПа.

Для образцов из дюралюминия Д-16, фторопласта-4 и оргстекла зависимость коэффициента трения от скорости скольжения описывается линейным уравнением вида:

$$f = a + bv_{ск}, \qquad (5.9)$$

где $v_{ск}$ - скорость скольжения, м/с; *a, b* - эмпирические коэффициенты, значения которых даны в табл. 5.17.

Таблица 5.17

Эмпирические коэффициенты* уравнения (5.9)

Материал	*a*	*b, с/м*	Материал	*a*	*b, с/м*	Материал	*a*	*b, с/м*
Дюралюминий Д-16	1,703 0,96 0,65	3,17 4,25 3,67	Органическое стекло	1,06 1,03 0,57	4,00 2,00 3,75	Фторопласт-4	0,34 0,27 0,47	5,33 3,00 2,75

* Коэффициенты первой строки получены при напряжении контакта 1,82кПа; второй – 3,64кПа; третьей – 7,27кПа.

6. МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ФРИКЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Коэффициенты трения пищевых материалов в зависимости от реологических свойств, состояния фрикционных поверхностей и скорости скольжения определяются различными методами. Классический тип прибора для измерения силы внешнего трения представляет собой пару тел, соприкасающихся плоскими поверхностями, площадь которых может быть от долей квадратных миллиметров до десятков квадратных сантиметров. При этом одно из тел смещается относительно другого. Сила 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.

К первой группе методов относятся такие, в которых одна плоскость поступательно перемещается относительно другой плоскости (рис. 6.1, *а, б, в*). По схеме *а* (рис.6.1) продукт перемещается по движущейся исследуемой поверхности, при этом сила трения измеряется динамометром любого типа. Таким наиболее распространенным методом определяют трение твердообразных материалов- сухарей, хлеба, мяса, рыбы, зерна и т.п. По схеме *б* (рис.6.1) 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, рыба, кондитерские изделия. По схеме *в* (рис.6.1) продукт скользит по

наклонной плоскости. Коэффициент трения определяется по минимальному углу наклона к поверхности испытуемого 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* (рис.6.1) продукт, закрепленный на упругой балочке, скользит по вращающейся поверхности из исследуемого материала. Этим методом определяли коэффициент трения мяса, рыбы, таблеток кофе и чая, сухарных плит, формового хлеба. По схеме *д* (рис.6.1) определяли коэффициент трения конфетных масс пралине. Продукт лежал на вращающемся диске, исследуемый конструкционный материал скользил по вращающемуся продукту. Сила трения определялась по крутящему моменту, передаваемому от диска образцу.

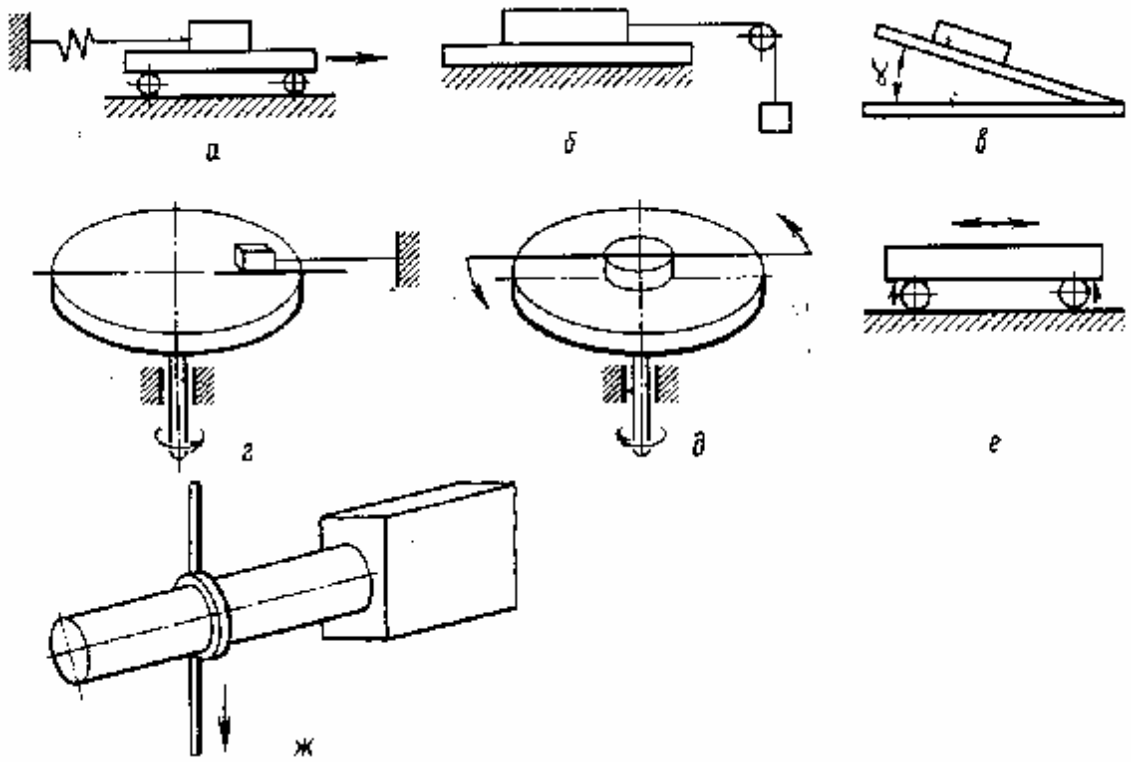

Рис.6.1. Методы измерения силы трения скольжения:
а, б, в – при поступательном перемещении плоскостей;
г, д – при вращательном движении одной из фрикционных пар;
е – при соприкосновении образующей цилиндра с плоскостью;
ж – при перемещении цилиндрической или плоской гибкой поверхности по цилиндрической поверхности

К третьей группе относятся методы, в которых образующая цилиндра соприкасается с плоскостью. Схема *е* (рис.6.1) - 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,* рис.6.1).

Изменение давления допускают методы, изображенные на всех схемах (рис.6.1), кроме схемы *ж,* изменение размера поверхности - методы *а* - *д,* изменение скорости скольжения допускают все методы, кроме *а*.

Трибометр с тележкой (рис. 6.2, *а*) позволяет определить силу трения и вычислить истинный и эффективный коэффициент внешнего трения. Исследуемый продукт (мясопродукты) помещается в рамку, установленную на плоскую поверхность тележки. Она перемещается от электродвигателя посредством тянущей нити. Рамка соединена с тензометрической балкой.

Трибометр с параллельным смещением пластин (рис. 6.2, *б*) предназначен для изучения адгезии твердых продуктов, например, сыра. Привод пластины осуществляется от груза с подпрессовкой образцов винтовым механизмом. Смещение пластины измеряется индикатором часового типа. Прибор может быть использован для измерения как внешнего трения, так и вязкости при малых градиентах скорости.

Трибометр с приводом подвижной части от гидроцилиндра (рис. 6.2, *в*) и регистрацией усилий с помощью тензометрической балки используется для изучения трения при малой площади контакта и больших нормальных усилиях. При измерении больших усилий трения система гидропривода имеет преимущество по сравнению с электроприводом, кроме того, гидропривод обеспечивает бесступенчатое регулирование скорости.

Трибометр проволочного типа (рис. 6.2, *г*) предназначен для изучения фрикционных свойств пшеничного пряничного теста, контактирующего с поверхностью из стали, дюралюминия, оргстекла и фторопласта-4.

Кинетический адгезиометр-трибометр (рис. 6.2, *д*) позволяет изучать трение и адгезию. При исследовании адгезии ползун отрывается от вращающегося диска нормально, усилие отрыва измеряется по деформации тензобалки.

Трибометр дискового типа (рис. 6.2, *е*) предназначен для изучения трения мяса по стали. Диск приводится во вращение от электродвигателя постоянного тока, частота вращения его может плавно регулироваться, обеспечивая окружную скорость в месте контакта с продуктом от 0,1 до 72м/с. Исследуемый пищевой продукт помещают в рамку, которая укреплена на двух тензобалках, они служат для измерения силы трения.

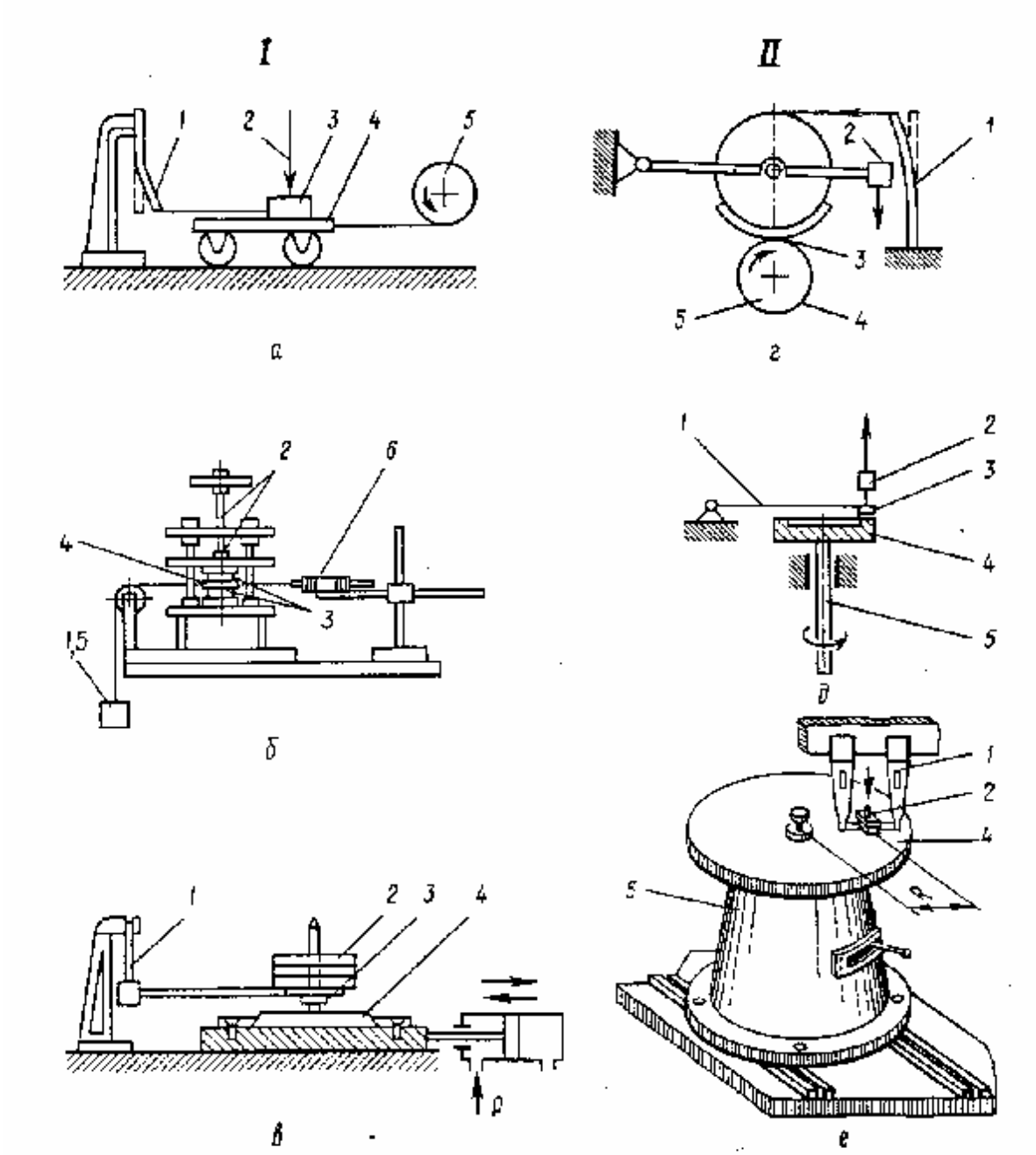

Рис. 6.2. Схемы приборов для измерения коэффициента внешнего трения при малых (I) и высоких (II) скоростях скольжения продукта:
а - трибометр с тележкой и электроприводом; *б* - трибометр с параллельным смещением пластин и приводом от падающих грузов; *в* - трибометр с приводом от гидроцилиндра; *г* - трибометр проволочного типа;
д - кинетический адгезиометр - трибометр; *е* - трибометр дискового типа
1 - устройство для измерения силы трения (тензометрическое или грузовое); 2 - устройство для создания напряжения контакта; 3 - исследуемый пищевой продукт (или слой продукта); 4 - материал, по которому происходит трение продукта; 5 - система привода; 6 - устройство для измерения перемещения (индикатор)

Трибометр УкрНИИпродмаша предусматривает тензометрический способ определения коэффициентов трения штучных изделий. Суть его

заключается в следующем. На конвейер 1 (рис. 6.3, *а)* с испытуемой поверхностью устанавливается изделие 2, которое гибкой нитью связывается с консольной упругой балочкой 4. На ней наклеены тензорезисторы 3. При перемещении конвейера изделие увлекается силой трения, изгибая измерительную балочку. Сигнал через усилитель 5 поступает на осциллограф 6. Коэффициент трения рассчитывается как отношение силы трения к массе изделия.

В Киевском НПО «Пищемаш» разработан комплекс устройств А2-ШКФ для определения физико-механических свойств кондитерских изделий. Комплекс включает устройство марки А2-ШКФ/6 для определения коэффициента трения изделий и устройство марки А2-ШКФ/7 для определения коэффициента сопротивления смешению. На этих устройствах могут быть испытаны штучные изделия массой от 0,01 до 1,0 кг, длиной от 10 до 150 мм, шириной от 10 до 80 мм, высотой от 5 до 45 мм.

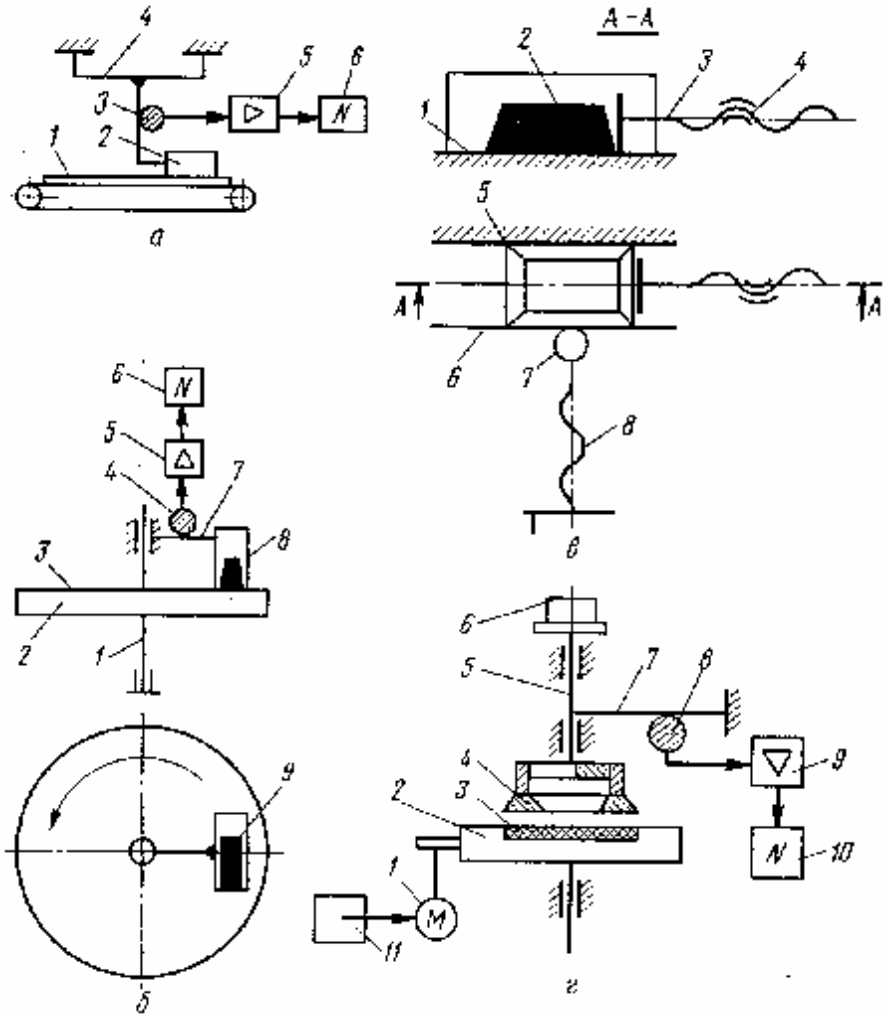

Рис. 6.3. Схемы трибометров для штучных изделий (*а, б, в*) и вязкопластичных тестообразных материалов *(г)*

Устройство А2-ШКФ (рис. 6.3, *б*) выполнено с вращающимся столом, на котором устанавливаются накладки 3 из разных фрикционных

материалов. Стол 2 может вращаться с различной скоростью, что обеспечивается регулируемым приводом. Вал 1, на котором смонтирован стол, полый, через него проходит стойка с прикрепленными к ней кронштейнами со штоками. К кронштейнам крепятся упругие измерительные балочки 7 с тензорезисторами 4 и рамки 8 для установки в них исследуемых изделий. При вращении стола изделия 9 увлекаются силами трения и изгибают измерительные балочки. Величина деформации балочек, пропорциональная силе трения, усиливается прибором 5 и фиксируется регистрирующей аппаратурой 6. Зная силу трения и массу изделия, можно определить коэффициент трения.

Скорость скольжения изделия по столу может регулироваться и составлять 0,2, 0,4; 0,6; 0,8 м/с.

Габаритные размеры устройства 0,51Х0,55Х0,46 м. Масса 95 кг.

Устройство А2-ШКФ/7 (рис. 6.3, в) предназначено для определения коэффициента сопротивления смещению. Оно смонтировано в корпусе, в котором установлен регулируемый через задатчик привод. Через муфту вал привода соединен с главным валом устройства, на котором имеется кулачок. Главный вал управляется однооборотной муфтой, приводимой в действие с помощью электромагнита. Механизм сдвига 4, снабженный тензобалкой 3, приводится в действие посредством кулачка, расположенного на главном валу. Изделие 2 устанавливается на предметном столике 1 и закрепляется между неподвижной 5 и подвижной 6 опорами. Подвижной опорой через упругий элемент 7 с тензорезисторами регистрируется усилие предварительного поджатия изделия к неподвижной опоре.

Принцип действия устройства заключается в следующем. Предварительно создав боковое поджатие изделия винтом 8, включают механизм сдвига 4 и по регистрирующей аппаратуре фиксируют усилие, необходимое для смещения изделия относительно плоскостей 1, 5, 6 в любом их сочетании. По величине усилия определяют коэффициент сопротивления смещению.

Устройство А2-ШКФ/7 позволяет смещать изделия со скоростью 0,2, 0,4; 0,6; 0,8; 1,0 м/с.

Габаритные размеры устройства 0,49Х0,38Х0,40 м. Масса 70 кг.

Адгезиометр сдвига (рис. 6.3, г) создан в МТИППе для определения тангенциальных усилий, возникающих при сдвиге какого-либо конструкционного материала по пищевому. Принцип работы его основан на скольжении кольцевой поверхности 4 по поверхности пищевого материала 3, нанесенного слоем толщиной 0,4 - 0,8 мм в углубление вращающегося соосно с кольцевой поверхностью столика 2. Кольцо 4 шарнирно закреплено на штоке 5, который может свободно перемещаться в подшипниках скольжения по вертикали и относительно своей оси. Постоянное напряжение контакта создается грузом 6. При вращении столика 2 тангенциальное усилие, возникающее в зоне контакта пищевого продукта с

конструкционным материалом, передается через шток 5 упругой балочке 7 с тензорезисторами 8. Деформация балочки 7 приводит к разбалансировке измерительного моста тензоусилителя 9 марки ТА-5, выходной сигнал которого регистрируется на ленте самописца 10 марки Н-327-1. Самописец предварительно протарирован в единицах тангенциального усилия. Столик 2 приводится во вращение электродвигателем 1 постоянного тока через фрикционную передачу. Частота вращения ротора электродвигателя устанавливается по электрическому тахометру 11 типа ЦАТ-2М с помощью электронного блока ЭТО-2.

Прибор снабжен сменными кольцами 4 из разных конструкционных материалов; скорость скольжения кольца может изменяться от 0,003 до 0,15м/с.

Принцип работы прибора следующий. Изучаемый пищевой материал 3 тонким слоем наносят на столик 2, затем в контакт с ним вводят кольцо 4, которое нагружают грузом 6 определенной массы. Включают электродвигатель 1 и на ленте самописца 10 записывают показания тензорезисторов 8. Деформация балочки 7 происходит за счет момента, который возникает при взаимодействии пищевого материала 3 с кольцом 4. В начальный момент опыта фиксируется квазистатическое взаимодействие, а при установившемся вращении столика 2 - динамическое.

Предварительная тарировка измерительной системы тензорезистор - усилитель - самописец позволяет установить истинное значение тангенциального усилия между пищевым продуктом и конструкционным материалом.

ВОПРОСЫ К ГЛАВАМ 4, 5, 6

1. Какие требования предъявляют к адгезиометрам?
2. Перечислите конструктивные особенности современных адгезиометров.
3. Изобразите принципиальные схемы приборов для изучения адгезии кристаллов сахарозы, формового мармелада и конфетной помады.
4. Опишите принцип действия классического прибора для измерения силы внешнего трения.
5. На какие группы подразделяют методы определения коэффициента трения?
6. Сформулируйте особенности измерения коэффициентов внешнего трения при малых и высоких скоростях скольжения продукта.
7. Перечислите основные типы трибометров. Опишите принципы их работы.

7. СЫПУЧИЕ ПИЩЕВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Под *сыпучим материалом* (или сыпучим телом) подразумевают дисперсную систему, состоящую из твердых частиц произвольной формы, находящихся в контакте. Пространство между частицами заполнено газом, а иногда, частично, и жидкостью. В зависимости от диаметра d частиц сыпучий материал может быть в следующих состояниях: пылевидном (d<0,05мм), порошкообразном (0,05мм < d < 0,5мм), мелкозернистом (0,5мм < d < 2мм); крупнозернистом (2мм < d < 10мм); кусковом (d > 10мм).

Физико-механические свойства пищевых сыпучих материалов, определяющие его динамическое поведение и структурообразование, изучены пока слабо. Некоторые из этих свойств рассмотрим ниже.

Гранулометрический состав. Сыпучий пищевой материал лишь в редких случаях состоит из одинаковых частиц. Большая часть технических сыпучих материалов - это полидисперсные системы, состоящие из частиц, различающихся как формой, так и размерами.

Частицы неправильной формы характеризуют эквивалентным диаметром:

$$D_э = 6/S_y \,, \qquad (7.1)$$

где S_y - удельная поверхность частицы, равная отношению поверхности S частицы к ее объему V.

В экспериментальной практике значение S_y определяют применительно к сравнительной большой порции сыпучего материала, состоящей из множества частиц. В этом случае формула (7.1) позволяет рассчитать средний диаметр частиц исследуемой порции сыпучего материала. Параметр S_y определяют на специальном приборе; принцип его действия основан на измерении сопротивления, которое оказывает слой определенной порции сыпучего материала потоку прокачиваемого через него газа. Параметр S_y используют для характеристики свойств сыпучего материала в случаях, когда они зависят от площади поверхности его частиц; например, теплопроводность, звукопроницаемость, растворимость, химическая активность во многом зависят от S_y. Значения S_y меняются в большом диапазоне (от нескольких сотен тысяч до нескольких миллионов см$^{-1}$) в зависимости от степени дисперсности частиц.

Для оценки степени дисперсности сыпучих пищевых материалов используют различные характеристики: наибольший d_{max} и наименьший d_{min} размер частиц, отношение R наибольшего размера частиц к наименьшему (так называемый размах варьирования), средний размер (диаметр) d частиц, удельную поверхность S_y и гранулометрический состав.

Из различного рода средних параметров, характеризующих полидисперсную систему, применительно к сыпучим пищевым материалам наиболее распространен статистический среднемассовый диаметр d. Его рассчитывают как среднее арифметическое эквивалентных диаметров частиц различных классов:

$$d = \sum_{i=1}^{k} d_{эi} M_i \Big/ \sum_{i=1}^{k} M_i \,, \qquad (7.2)$$

где $d_{эi}$ - среднее значение эквивалентного диаметра частиц 1-го класса; M_i - масса частиц 1-го класса; k - число классов (фракций), на которые разбита вся шкала значений $d_э$ (принимают k = 5…12).

Гранулометрический или дисперсный состав сыпучего материала - характеристика, показывающая, какую долю или процент по массе, объему, поверхности или числу частиц составляют определенные частицы или группы частиц во всей массе анализируемой пробы. Гранулометрический состав определяют по ГОСТ 12536-79. Для экспериментального определения гранулометрического состава наиболее часто используют ситовой, седиментационный, гидроаэродинамический и микроскопический методы анализа.

Диаметр частиц сыпучего материала рассматривают как одномерную случайную величину. В связи с этим гранулометрический состав сыпучих материалов описывают чаще всего методом математической статистики.

Результаты экспериментального определения значений $d_{эi}$ для всех k классов, на которые разбита шкала значений $d_э$ анализируемого сыпучего материала, позволяют построить гистограмму, наглядно характеризующую его гранулометрический состав, или определить вид и параметры аналитического закона распределения частиц в массе сыпучего материала (по диаметру, массе, поверхности, числу).

Гистограммы представляют собой графическое изображение функций распределения случайной величины, принимающей после экспериментального определения ряд дискретных значений. По оси абсцисс при построении гистограмм откладывают замеренные значения $d_{эi}$ для отдельных фракций, а по оси ординат — либо содержание соответствующих фракций $P(d)$, либо суммарное (накопленное) содержание фракций $F(d)$ не более $d_{эi}$. В первом случае получают так называемую дифференциальную кривую распределения частиц, во втором - интегральную (или кумулятивную) кривую (рис. 7.2). В пределах одной фракции или класса $d_{эi}$ принимают постоянным. Интервал значений $d_э$ для отдельных фракций можно принимать одинаковым или разным. Второй случай определяется необходимостью более точного отображения вклада фракций с наименьшими значениями $d_э$. Обычно по мере возрастания размеров частиц диапазон значений $d_э$ фракции увеличивают в геометрической прогрессии. При построении гистограмм с изменяющимся интервалом значений $d_э$ отдельных фракций по оси ординат откладывают отношение содержания фракций к соответствующему интервалу значений $d_э$.

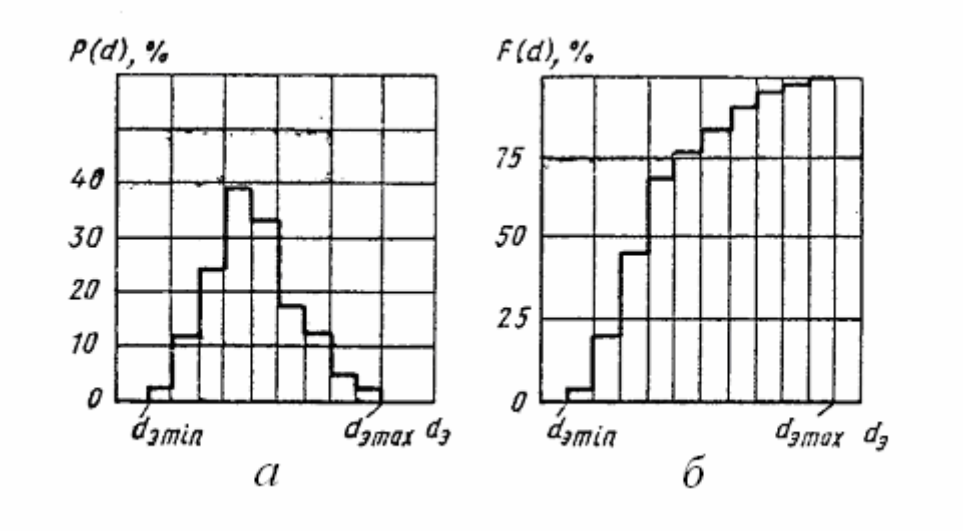

Рис. 7.2. Гистограммы дискретных распределений в дифференциальной (*а*) и интегральной (*б*) форме

Для аналитического описания гранулометрического состава предложены различные эмпирические и теоретические формулы. Наибольшее применение нашла формула Розина - Раммлера:

$$F(d) = 100\left[1 - exp - \left(d_{эi}/d_e\right)^a\right], \qquad (7.3)$$

где *F(d)* - суммарная масса частиц диаметром меньше $d_{эi}$ (устанавливают по результатам ситового анализа), %; d_e - диаметр частиц, при котором масса всех частиц крупнее d_e составляет 36,8%, а меньше d_e - 63,2%, *a* - параметр, характеризующий однородность материала по размерам (чем больше *a,* тем уже диапазон размеров частиц материала).

Значения d_e и *a* устанавливают по данным ситового анализа гранулометрического состава пробы исследуемого сыпучего материала.

Для описания гранулометрического состава материалов, подвергшихся измельчению, часто используют логарифмически нормальное распределение:

$$P(d) = \frac{n}{\sqrt{2\pi}\,\lg\sigma}\exp\left[-\frac{\left(\lg\bar{d}_{эi} - \lg\bar{d}_э\right)^2}{2\lg^2\sigma}\right], \qquad (7.4)$$

где *P(d)* - частота значений $d_{эi}$; *n* — общее число наблюдений $\bar{d}_{эi}$; $\bar{d}_э$ - средний диаметр частиц в пробе; σ - среднеквадратическое (стандартное) отклонение значений $\bar{d}_{эi}$ от $\bar{d}_э$.

Величину σ рассчитывают по данным анализа по формуле:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}\left[n_i\left(\bar{d}_{эi} - \bar{d}_э\right)^2\right]}, \qquad (7.5)$$

где $\bar{d}_{эi}$ - среднее значение диаметра частиц *i*-го класса.

Следует учитывать, что если состав измельченного материала нарушен просеиванием или воздушной сепарацией, то логарифмически нормальный

закон может и не соответствовать действительному распределению частиц в массе пробы.

Степень неравномерности гранулометрического состава характеризуют коэффициентом вариации $V(d) = 100\sigma/d_э$ (в %).

Физические свойства. К наиболее часто используемым в прикладных задачах физическим свойствам сыпучих материалов можно отнести влажность, гигроскопичность, плотность, насыпную плотность, температуры плавления и воспламенения, порозность, взрыво-и пожароопасность.

Гигроскопичностью называется свойство сыпучего материала сорбировать парообразную воду из воздуха:

$$W_n = [(m_в - m_c)/(m_c - m_б)]100, \qquad (7.6)$$

где W_n - максимальная гигроскопичность, %; $m_в$, $m_б$, m_c - масса соответственно пробы сыпучего материала с бюксой, бюксы и бюксы с высушенной пробой сыпучего материала.

Бюксу с пробой сыпучего материала помещают на 1-2 суток в эксикатор, на дне которого находится раствор H_2SO_4. В эксикаторе устанавливается равновесное состояние влажности сыпучего материала в воздухе с относительной влажностью водяного пара при температуре 20°С до 95—98%.

Плотностью ρ сыпучего материала называют массу единицы объема вещества, из которого состоят частицы. Согласно ГОСТ 5181-78 плотность определяют пикнометрическим методом.

Насыпной плотностью $\rho_н$ сыпучего материала называют массу единицы объема, занимаемого материалом при свободном засыпании его в измерительный стакан. Значение $\rho_н$ определяют для порошкообразных химических продуктов по ГОСТ 11035-64 (СТ СЭВ 16917979), а для металлических порошков - по ГОСТ 19440-74 (СТ СЭВ 2283-80). Насыпная плотность сыпучих материалов изменяется в широком диапазоне (от 0,2 до 4г/см^3) в зависимости от дисперсного состава частиц, их формы, плотности и способа засыпки в емкость.

Порозностью слоя сыпучего материала называют отношение:

$$\varepsilon = V_1/V_0 \ , \qquad (7.7)$$

где V_1 - свободный объем пространства между частицами в слое сыпучего материала объемом V_0.

Величина ε зависит от способа укладки частиц, их формы, размера, воздействия внешних факторов. Например, под действием вибрации ε может изменяться для одного и того же сыпучего материала в 1,1—3,0 раза. Значения ε, ρ и $\rho_н$ связаны простой зависимостью $\varepsilon = 1 - \rho/\rho_н$.

Изменение структуры слоя под действием сжимающей нагрузки характеризуют коэффициентом уплотнения:

$$K_у = \rho_{пр}/\rho_н \ , \qquad (7.8)$$

где $\rho_н$ и $\rho_{пр}$ насыпная плотность порции сыпучего материала соответственно

начальная и после прессования.

Взрыво- и *пожароопасность.* Горючие сыпучие пищевые материалы при определенных условиях могут самовозгораться, а в смеси с воздухом - взрываться. Взрыв аэровзвеси сыпучих горючих компонентов происходит только в том случае, если их концентрация в воздухе находится в диапазоне между нижним и верхним пределами воспламенения. Согласно нормам, принятым в России, нижний предел воспламенения служит основным критерием взрывоопасности аэровзвесей. Взрывоопасными принято считать пылевоздушные смеси, нижний концентрационный предел воспламенения (НКПВ) которых меньше или равен 65г/м^3. Пылевоздушные смеси с НКПВ, превышающим 65г/м^3, считают пожароопасными.

Источником тепловой энергии, необходимой для зажигания пылевоздушных смесей (находящихся в смесителях, мельницах, бункерах, трубопроводах, дозаторах и пр.), могут быть нагретые поверхности движущихся элементов; статическое электричество или искровой разряд с электрооборудования, электрических проводов. Тепловая энергия резко возрастает при размере частиц менее 70 мкм, поэтому наибольшей пожаро- и взрывоопасностью обладают пылевидные материалы.

Для исключения опасности взрыва пылевоздушной смеси и загорания сыпучего материала необходимо проводить технологический процесс в среде инертного газа, заземлять металлическое оборудование, использовать взрывозащищенное оборудование, контролировать с помощью датчиков температуру в зонах повышенного трения, не допускать попадания в сыпучий материал металлических предметов, исключать возможность саморазъединения деталей.

Механические свойства. Между частицами сыпучего материала существуют силы взаимодействия различной природы. Эти силы объединяют термином - *«аутогезия».* Понятие аутогезии охватывает все виды и формы связи между частицами независимо от числа и свойств взаимодействующих частиц, природы сил, обусловливающих это взаимодействие, причин и условий их возникновения. Помимо этого основного термина в технической литературе применяют и другие термины: адгезия, когезия, агломерация, агрегация, слеживаемость. Понятие адгезии и когезии были рассмотрены выше.

Агломерация — процесс укрупнения частиц в результате спекания; *агрегация* — самопроизвольное укрупнение частиц; *слеживаемость* — возникновение сил взаимодействия между частицами в результате появления кристаллизационных мостиков между частицами или капиллярных сил.

Силу аутогезии можно представить в виде суммы нескольких составляющих: сил Ван-дер-Ваальса и сил когезионного взаимодействия, имеющих молекулярную природу, а также сил электрических, механического сцепления частиц и капиллярных (для влажных сыпучих материалов).

Для оценки поведения сыпучего материала под действием внешней

нагрузки используют несколько характеристик: угол естественного откоса α, начальное сопротивление сдвигу τ_0, угол внутреннего трения φ, коэффициент внутреннего трения f, коэффициент внешнего трения $f_{вн}$, коэффициент размалываемости K_p, коэффициент бокового давления ξ, коэффициент текучести K_m.

Углом естественного откоса называют угол α наклона образующей конуса, полученного при высыпании из воронки без динамического воздействия определенной порции сыпучего материала на горизонтальную подложку, к плоскости основания конуса. Значение α зависит от аутогезионных сил между частицами. Для используемых в промышленности сыпучих материалов α = 25 ... 44°.

Любая деформация сыпучего материала сопровождается сдвигом, т.е. скольжением частиц одна относительно другой. В отличие от жидкостей сыпучие материалы в состоянии выдерживать определенные усилия сдвига. Деформация в них не наступает до тех пор, пока не преодолено некоторое напряжение сдвига τ_α которое называют *предельным сопротивлением сдвигу* или *пределом текучести* сыпучего материала.

При наличии в промышленных сыпучих материалах аутогезионных сил взаимодействия между частицами связь между предельным сопротивлением τ_α и нормальными напряжениями σ_α в плоскости скольжения слоев один относительно другого выражается законом Кулона:

$$\tau_\alpha = C + f\sigma_\alpha, \qquad (7.9)$$

где C - удельное сцепление частиц в сыпучем материале, Па (при τ_α и σ_α в Па); f - коэффициент внутреннего трения (физически его можно представить как среднестатистическое значение коэффициентов трения между отдельными частицами).

Нормальные напряжения возникают в результате давления выше лежащих частиц и действия внешних нагрузок. Каждому значению σ_α, соответствует определенное значение τ_α. Для идеально сыпучих материалов $\tau_\alpha = 0$ при $\sigma_\alpha = 0$; для связных сыпучих материалов $\tau_\alpha \neq 0$ при $\sigma_\alpha = 0$. Значение τ_α = С, соответствующее $\sigma_\alpha = 0$, называют *начальным сопротивлением сдвигу* и обозначают τ_α.

Если для конкретного сыпучего материала при постоянных влажности и температуре получить экспериментально несколько пар значений τ_α и σ_α, то можно построить графическую зависимость предельного сопротивления сдвигу от нормального напряжения в плоскости скольжения (рис. 7.3). Для сыпучих материалов, у которых аутогезионные силы взаимодействия между частицами практически отсутствуют (несвязные сыпучие материалы), изменение σ_α не влияет на плотность упаковки частиц и прочность материала, поэтому все опытные точки ложатся на одну прямую.

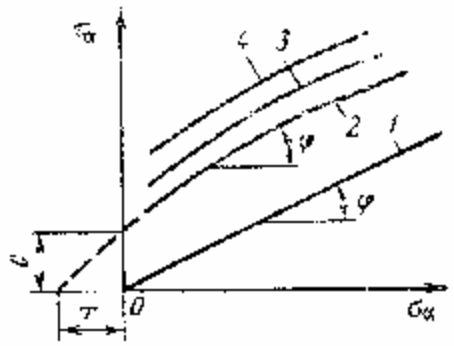

Рис. 7.3. Зависимость сопротивления сдвигу τ_α от нормальных напряжений в плоскости сдвига σ_α:
1 - для несвязных сыпучих материалов; 2, 3 и 4 – для связных сыпучих материалов при различных уплотняющих нагрузках до испытания на сдвиговом приборе

Для сыпучих материалов, между частицами которых существуют аутогезионные силы взаимодействия, под влиянием внешней нагрузки плотность упаковки частиц изменяется, материал сжимается; это приводит к увеличению его прочности на разрыв и сопротивления деформациям. По этой причине для таких материалов графическая зависимость $\tau_\alpha = f(\sigma_\alpha)$ выражается семейством линий, каждая из которых соответствует определенной уплотняющей нагрузке, приложенной к материалу до испытания на сдвиг. С увеличением уплотняющей нагрузки линии $\tau_\alpha = f(\sigma_\alpha)$ смещаются вверх. При продолжении влево прямолинейного участка этой зависимости она отсекает на оси ординат отрезок, равный удельному сцеплению С, а на оси абсцисс – отрезок *T,* соответствующий значению прочности образца сыпучего материала на разрыв. Линии $\tau_\alpha = f(\sigma_\alpha)$ не являются прямыми, однако их при средних и высоких значениях σ_α можно аппроксимировать прямыми. Угол φ наклона таких прямых к оси абсцисс называют *углом внутреннего трения,* который связан с *коэффициентом внутреннего трения f* простой зависимостью $tg\varphi=f$. Коэффициент внутреннего трения *f* является среднестатистическим значением коэффициентов трения частиц одна о другую и зависит от размера частиц, их формы, твердости, шероховатости поверхности, порозности слоя. Угол трения $\varphi = 11 ... 40°$.

При расчетах сил трения сыпучего материала о рабочие органы машин, стенки бункеров используют коэффициент внешнего трения $f_{вн}$ сыпучего материала, который тоже является среднестатистическим значением коэффициентов трения частиц сыпучего материала о стенку. Значения f, τ_α и $f_{вн}$ конкретных сыпучих материалов определяют на специальных сдвиговых приборах.

При сжатии сыпучие материалы деформируются не так, как твердые тела. При небольших интервалах изменения давления зависимость между напряжением и деформацией сыпучего материала можно считать линейной.

При этом предполагают, что коэффициент Пуассона v и модуль деформации E сыпучего материала постоянны.

Модуль деформации E рассчитывают по результатам испытаний сыпучего материала на приборах одноосного сжатия по формуле

$$E = kP/\Delta l, \qquad (7.10)$$

где k – постоянный для данного прибора коэффициент, зависящий от формы, размеров, жесткости штампа и коэффициента Пуассона v;
P—нагрузка на подошву штампа; Δl - изменение высоты слоя сыпучего материала.

Коэффициент Пуассона приближенно можно рассчитать по *коэффициенту бокового давления* ξ:

$$v = \xi/(1+\xi). \qquad (7.11)$$

Коэффициент бокового давления при условии одноосного сжатия без возможности бокового расширения равен отношению σ_x/σ_z , где σ_x - боковое давление в слое сыпучего материала; σ_z - нормальное давление на сыпучий материал. При относительно малых давлениях сжатия (0,2—4,2МПа) коэффициент бокового давления ξ для большей части порошков имеет постоянное значение, практически не зависящее от размеров частиц и равное 0,3—0,4.

Способность сыпучего материала вытекать из отверстий в стенках машин и аппаратов оценивают *коэффициентом текучести* K_m , который определяют по времени истечения 1 порошка из калиброванной воронки:

$$K_m = tr^{2,58} / M, \qquad (7.12)$$

где r — радиус воронки в цилиндрической части, мм (согласно ГОСТ 20899-75 при определении текучести металлических порошков отверстие воронки выполняют в виде цилиндрического канала диаметром 2,5мм и длиной 3,2мм); M — масса порошка, засыпаемого в воронку, г (по указанному стандарту M = 50г).

В расчетах процессов измельчения используют *коэффициент размалываемости:*

$$K_p = 2,59 \cdot 10^{-7} U / S_н, \qquad (7.13)$$

где U - энергия, затраченная на измельчение, Дж; $S_н$ - вновь образованная удельная поверхность сыпучего материала, см$^{-1}$; K_p - коэффициент размалываемости, Дж·см.

Значение K_p определяют согласно РТМ 26-01-129-80 «Машины для переработки сыпучих материалов. Методы выбора оптимального типа питателей, смесителей и мельниц», разработанного Северодонецким филиалом НИИхиммаш, на приборе Годена типа падающего копра.

Слеживаемостью называют свойство сыпучего материала терять при длительном хранении свою текучесть. Причиной слеживания сыпучих материалов может быть увеличение либо плотности упаковки частиц, либо

влажности, что приводит к появлению кристаллизационных мостиков между частицами или капиллярных сил. Численную оценку слеживаемости выполняют по нескольким методикам, из которых наибольшей достоверностью отличается методика определения слеживаемости по сопротивлению P разрушению спрессованного брикета из пробы сыпучего материала. Эта методика для одобрений регламентирована ГОСТ 21560.5-82 (СТ СЭВ 2529-80). Все сыпучие материалы по этой методике разбивают на пять категорий: неслеживаемые (P<0,1МПа), слегка слеживаемые (P=0,1...0,2МПа), слеживаемые (P = 0,2…0,7МПа), сильно слеживаемые (P=0,7...1,5МПа), очень сильно слеживаемые (P>1,5МПа).

Приборы для определения механических свойств сыпучих материалов подробно описаны в специальной литературе.

Инженерно-технологическая классификация сыпучих материалов. Динамическое поведение сыпучего материала нельзя оценить какой-то одной характеристикой. В связи с этим при классификации сыпучих материалов приходится использовать комплексные показатели, состоящие из нескольких физико-механических характеристик. Северодонецкий филиал НИИхиммаш предложил (РТМ 26-01-129-80) использовать для классификации сыпучих материалов применительно к процессам, связанным с их перемещением, комплексный показатель $h_c = 4\tau_0\cos\varphi/\rho_н(1 - \sin\varphi)$. В зависимости от величины h_c все сыпучие материалы при этой классификации подразделяются на три класса (несвязанные, связно-текучие и связные), каждый из которых, в свою очередь, делится на две группы.

По физико-механическим свойствам сыпучие материалы каждого класса заметно различаются, поэтому их следует перерабатывать (смешивать, дозировать, хранить, транспортировать) в оборудовании определенного типа.

В основу классификации сыпучих материалов применительно к процессам измельчения по РТМ 26-01-129-80 положены модуль упругости частиц и коэффициент размалываемости. По этим показателям сыпучие материалы разделяют на четыре группы (волокнистые, упругопластичные, пластичные, хрупкие). И в этом случае сыпучие материалы каждой группы следует измельчать в соответствующем оборудовании определенного принципа действия.

Приборы и системы для определения гранулометрического состава сыпучих материалов

По гранулометрическому составу сыпучего материала оценивают распределение составляющих его частиц по линейным размерам или по объемам. Гранулометрический состав сыпучего материала определяет качество процесса измельчения. Для определения гранулометрического состава сыпучих материалов в настоящее время используют различные методы и соответствующие им приборы и системы. Рассмотрим основные из

них.

Метод непосредственного измерения с помощью микроскопа. Перед измерением под микроскопом порошкообразные материалы размешивают в скипидаре или глицерине, затем смесь наносят на предметное стекло тонким слоем. В некоторых случаях порошкообразные материалы смешивают с полимеризующимися смолами (шеллаком, бакелитовым лаком, эпоксидной смолой и пр.). После полимеризации затвердевший образец шлифуют и полируют. Шлиф рассматривают под микроскопом.

Достоверные результаты определения размеров частиц под микроскопом могут быть достигнуты только путем измерения большого их количества. Если частицы имеют разную форму и размеры, то, как показывает опыт, число измерений должно быть не менее 2000, поэтому метод непосредственного измерения считается трудоемким.

Практика показала, что погрешность метода непосредственного измерения под микроскопом колеблется от 15 до 40%, зависит от физического и эмоционального состояния оператора, а скорость выполнения анализа мала (около 500 частиц/ч) и не имеет тенденции к увеличению.

Одним из вариантов этого метода является определение гранулометрического состава путем обсчета микрофотографий измельченных частиц, полученных с оптического или электронного микроскопа.

Ситовой анализ. Заключается в разделении порции измельченного сыпучего материала на классы (фракции) с помощью последовательного просеивания при встряхивании через набор сит с отверстиями различной величины. Этот метод относится к методам физического разделения измельченных твердых частиц.

Сквозь отверстия данного сита проходят все частицы, наибольший линейный размер которых меньше величины отверстий сита. Таким образом, значение класса определяют размером отверстий соседних сит. Например, если нижнее сито имеет отверстие, равное 0,5, а верхнее 0,7мм, то между этими ситами после просеивания останется фракция сыпучего материала класса 0,5-0,7 мм. Фракция, прошедшая сквозь верхнее сито с отверстиями а мм, обозначается *a*, а оставшаяся на нижележащем сите с отверстиями в мм обозначается +*b*.

Ширина класса зависит от подбора соответствующих сит. Отечественной промышленностью выпускаются сита, которые позволяют получить практически любую ширину фракции.

Согласно ГОСТ 3584-53 сетка, идущая на изготовление сит, обозначается номерами. Каждому номеру соответствует определенный размер отверстия (ячейки) сита в миллиметрах. Отношение суммарной площади отверстий к общей поверхности сита для всего ряда сит остается постоянным и равным 36%. В некоторых странах сита характеризуются числом меш, которое равно количеству ячеек, приходящихся на 1 погонный

дюйм сетки.

В зависимости от способа изготовления сита бывают тканые, плетеные, крученые, стержневые, вязаные, сборные, штампованные. Материал проволоки или листа, из которого изготовляют сита, может быть различным, и выбирают его в зависимости от условий, в которых они работают, или свойств просеиваемых материалов.

Седиментационный анализ. Основан на различии в скоростях осаждения твердых частиц в жидкости. Седиментационный анализ, как правило, проводят в ламинарной области осаждения, в которой скорость осаждения шарообразных частиц определяется уравнением:

$$W_0 = 0{,}056 \frac{gd^2}{\nu} \frac{\rho_1 - \rho}{\rho}, \qquad (7.14)$$

где d – диаметр частицы; ρ_1 и ρ - плотности частицы и жидкости; ν - вязкость жидкости; g – ускорение силы тяжести.

Анализ уравнения (7.14) показывает, что при заданных свойствах жидкости и твердого материала скорость осаждения частиц пропорциональна квадрату их диаметра. Таким образом, если пробу измельченного полидисперсного сыпучего материала мгновенно высыпать в жидкость, то на некотором расстоянии от свободного уровня жидкости частицы распределяются по высоте пропорционально квадрату их диаметра: крупные - внизу, мелкие - вверху. Измеряя время прохождения частицами пути от свободного уровня жидкости до некоторого контрольного, можно рассчитать скорости их падения, а затем с помощью уравнения (7.14) и их диаметры.

Классифицировать пробы сыпучего материала по этому способу трудно, так как приходится следить одновременно за падением множества частиц. Значительно проще фиксировать не моменты прохождения частицами контрольного уровня, а прибавку в весе суммы частиц, прошедших этот уровень. На этом принципе конструируют седиментационные весы, используемые для проведения гранулометрического анализа проб. Такие весы (рис. 7.4) имеют сосуд 1 с жидкостью, чашечку 2, соединенную связью 3 с левым коромыслом 4. Предварительно весы уравновешивают грузом 6. Изменение веса чашечки 2 при попадании в сосуд 1 частиц пробы сыпучего материала фиксируется отклонением стрелки 5 циферблата. С помощью тензодатчиков отклонения коромысел весов от первоначального их положения можно фиксировать и непрерывно записывать.

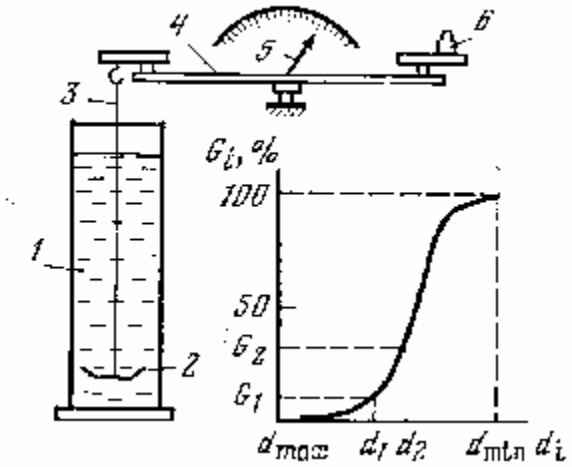

Рис. 7.4. Схема седиментационных весов для гранулометрического анализа проб сыпучего материала

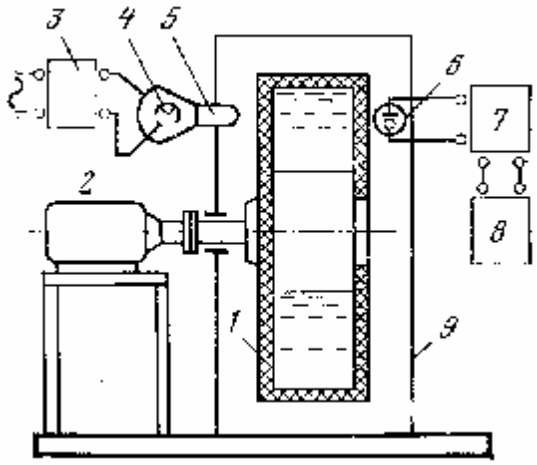

Рис.7.5. Схема прибора для седиментационного анализа гранулометрического состава в поле центробежных сил

В результате анализа пробы сыпучего материала на седиментационных весах получают данные, позволяющие построить график зависимости $G=f(t_i)$, где G - вес частиц, попавших к моменту времени t_i на чашечку 2, выраженный в процентах от общего веса анализируемой пробы. Эта зависимость путем пересчета с использованием уравнения (7.14) позволяет получить функцию $G=f(d_i)$, где d_i - диаметр частицы, достигшей чашечки 2 в момент, когда там суммарный вес ранее осевших частиц достиг величины G. Предварительное тарирование циферблата весов (или шкалы потенциометра при автоматической записи) путем анализа пробы с известным гранулометрическим составом позволяет получать сразу графики зависимости $G=f(d_i)$.

Анализ пылевидных материалов на этих весах затруднен из за малой скорости осаждения частиц в седиментационной жидкости. В этом случае применяют приборы для седиментационного анализа гранулометрического состава в поле центробежных сил (рис. 7.5). Прибор для проведения подобного анализа (рис. 7.5) имеет ротор 7, приводимый во вращение вокруг горизонтальной оси от электродвигателя 2. Ротор - полый, изготовлен из органического стекла. В него заливают седиментационную жидкость, которая при быстром вращении ротора принимает форму коаксиального цилиндра. Анализируемую пробу измельченного сыпучего материала, предварительно суспензированную в небольшом количестве седиментационной жидкости, вводят внутрь вращающеюся ротора через центральное окно в его боковой стенке. При таком способе введения материала его частицы в начальный момент времени сосредоточиваются в слое, толщина которою мала по сравнению с толщиной цилиндра седиментационной жидкости. Это обеспечивает почти одновременное начало

движения частиц под действием центробежных сил.

Частицы регистрируются на некотором определенном расстоянии от свободного уровня седиментационной жидкости с помощью фотоэлемента. Свет от источника (лампы) 4, питаемого через стабилизатор напряжения 3, формируется оптической системой 5 в узкий параллельный пучок, который проходит сквозь ротор и попадает на фотоэлемент 6. Фототок, пропорциональный световому потоку, снимаемый с регулируемого сопротивления 7, регистрируется самопишущим потенциометром 8. Для исключения возможности влияния других источников света на фотоэлемент ротор заключен в кожух 9.

Электронный потенциометр фиксирует изменение величины фототока во времени $J=f(t)$. Так как величина фототока J зависит от степени ослабления светового потока, которая определяется диаметром частиц d_i и их концентрацией в плоскости измерений в данный момент времени, то с помощью предварительных опытов можно построить калибровочную кривую $J=f(d_i)$. Этой кривой можно пользоваться в дальнейшем для нахождения гранулометрического состава. К приборам этого типа относятся, например, центробежный седиментограф для контроля гранулометрического состава измельченных сыпучих материалов в диапазоне размеров частиц 0,1-40мкм и пипеточная центрифуга «Анализетте-21» западно-германской фирмы «Fritsch» для гранулометрического анализа в диапазоне 0,05-5мкм.

Автоматическое определение гранулометрического состава измельченных сыпучих материалов седиментационным анализом позволяют производить следующие приборы: 1) развертывающий фотоседиментограф «Анализетте-20» фирмы «Fritsch» (ФРГ); диапазон размеров частиц от 2 до 100мкм; конечный результат выводится на самописец в виде функции распределения частиц по размерам; в комплект прибора входит встроенная микро-ЭВМ; 2) «Седиграф 5000» фирмы «Coultronics FRANCE S.A.» (Франция); полностью автоматизирует классический метод седиментации по законам Стокса и позволяет получить точный и воспроизводимый результат в эквивалентных сферических диаметрах от 0,1 до 100мкм; полученные данные автоматически наносятся на бумагу в виде графика – вес (в %) в интегральной форме относительно диаметра частиц; высокая разрешающая способность прибора достигается сканированием оседающей пробы узким лучом рентгеновского излучения, причем ячейка с пробой перемещается через луч, ускоряя время анализа; анализ выполняется за несколько минут, не требуя присутствия оператора; седиграф пригоден как для работы в заводских условиях, так и в лаборатории; 3) «Седиграф 5500» фирмы «Coultronics FRANCE S.A.» (Франция); предназначен для определения гранулометрического состава сыпучих материалов с небольшим атомным весом, которые плохо поглощают рентгеновские лучи; проба сканируется не рентгеновским, а световым лучом; 4) слоевой фотоседиментометр; в приборе применен новый, более точный и автоматизированный способ оптических

измерений седиментации с уровня; размер частиц определяется по измеренным скоростям осаждения в зависимости от различного обтекания частиц жидкостью; блок преобразования сигнала регистрирует зависимость величины ослабления света от времени оседания частиц; трансформация регистрируемой зависимости от времени с помощью ЭВМ позволяет определить распределение частиц по размерам; в рамках используемых ограничений устанавливается связь между результатами измерений и функцией распределения частиц по размерам; прибор может применяться как в лабораторных, так и промышленных условиях.

Метод светорассеяния под малыми углами. Из немногих известных методов, позволяющих определять гранулометрический состав измельченных частиц непосредственно в течение времени протекания процесса измельчения, наибольшее распространение получил метод рассеяния света под малыми углами. Существо метода состоит в следующем. Разнообразные проблемы оптики рассеивающих сред можно разбить на две части: прямую и обратную задачи светорассеяния. Прямая задача состоит в том, что известны оптические свойства и геометрия среды, а также условия ее освещения и требуется определить структуру светового поля в любой точке среды. Обратная задача состоит в том, что заданы условия освещения и распределение светового поля в среде, т.е. известными считаются характеристики светового пучка до и после рассеяния, и требуется определить физические свойства объема вещества, в котором происходило рассеяние. С помощью обратной задачи светорассеяния возможно определить гранулометрический состав взвешенных в какой-либо среде (газе или жидкости) измельченных частиц сыпучего материала. Пусть $f(a)$ - функция распределения частиц по размеру. Известно, что $f(a)$ связана с некоторой функцией $\varphi(\beta)$, где β - угол рассеяния, соотношением:

$$\varphi(\beta) = \int_0^\infty F(\beta, a) f(a) da, \qquad (7.15)$$

здесь $F(\beta, a)$ известна из теории рассеяния света на отдельной частице, может быть, например, индикатрисой рассеяния монодисперсной системы частиц (индикатриса рассеяния - зависимость интенсивности рассеянного света от угла рассеяния β); $\varphi(\beta)$ - экспериментальная полидисперсная индикатриса рассеяния, описывающая рассеяние под углом β.

Обратная задача теории рассеяния состоит в нахождении неизвестной функции $f(a)$, характеризующей гранулометрический состав по экспериментально определенной функции $\varphi(\beta)$, и известной (обычно табулированной) функции $F(\beta, a)$. Таким образом, метод светорассеяния под малыми углами, когда функция $f(a)$ явно выражена через интеграл от $\varphi(\beta)$ и $F(\beta, a)$, является одним из методов решения обратной задачи светорассеяния. В основе этого метода лежит экспериментальное определение индикатрисы рассеяния света под малыми углами, содержащей информацию о

гранулометрическом составе частиц, на которых происходит рассеяние. В теории, описывающей рассеяние света мутной средой, показано, что если параллельный пучок света с длиной волны λ рассеивается совокупностью взвешенных в газовой или жидкой среде частиц одинакового размера a, то зависимость интенсивности рассеянного света от угла рассеяния β выражается соотношением:

$$I(\beta) = I_0 \frac{J_1(\rho\beta)}{\beta^2} a^2, \qquad (7.16)$$

где I_0 – интенсивность пучка света в отсутствие частиц; J_1 – функция Бесселя первого порядка; $\rho=2\pi a/\lambda$; λ - длина волны пучка света; соотношение (7.16) справедливо при $\beta << 1$ и $\rho >> 1$.

Если пучок света проходит через слой различных по размеру частиц с функцией распределения $f(a)$, то индикатриса рассеяния в этом случае выражается следующим соотношением:

$$I(\beta) = \frac{I_0}{\beta^2} \int_0^\infty f(a) J_1(\beta\rho) a^2 da. \qquad (7.17)$$

Уравнение (7.17) представляет собой частный случай уравнения (7.15). Функцию распределения частиц по размерам $f(a)$ можно найти решив задачу обращения интегрального уравнения (7.17):

$$f(a) = -\frac{C}{a^2} \int_0^\infty F(\rho\beta) \varphi(\beta) d\beta, \qquad (7.18)$$

где $F(\rho\beta)=\rho\beta J_1(\rho\beta)N_1(\rho\beta)$; $N_1(\rho\beta)$ - функция Неймана первого порядка; $\varphi(\beta)=d/d\beta[I(\beta)\beta^3]$; C - нормировочная постоянная.

Соотношение (7.18) дает возможность определения гранулометрического состава частиц по экспериментально найденной индикатрисе рассеянного света $I(\beta)$. Область применения метода светорассеяния под малыми углами ограничивается следующими допущения ми.

1. Рассеяние света на каждой частице происходит безотносительно к другим частицам, т.е. не учитывается интерференция волн, рассеянных отдельными частицами. Это справедливо при условии, что расстояние между частицами велико по сравнению с длиной волны λ рассеянного света. Условием отсутствия интерференционных явлений принято соотношение $l>>5\lambda$, где l - расстояние между частицами. Предельное расстояние $l_{пред}$ между частицами, при котором можно не учитывать интерференцию волн, рассеянных каждой частицей, равно $l_{пред} = 3a$. Это условие достигается при относительной объемной концентрации частиц в просвечиваемой среде, равной 0,16.

2. Рассеяние однократно. Предполагается, что каждая частица облучается только первоначальным пучком света и не облучается светом,

рассеянным другими частицами. Условием выполнения этого допущения является соотношение $\tau = \ln(I_0/I) \leq 0{,}3$, где τ - оптическая толщина анализируемой дисперсной среды; I_0 - интенсивность света в отсутствие частиц; I - интенсивность рассеянного на частицах света.

3. Параметр $\rho \geq 20$, т.е. ρ_{min} =20. Подставляя ρ_{min} в соотношение $\rho=2\pi a/\lambda$, находим минимальный размер частиц, доступный измерению методом светорассеяния под малыми углами:

$$a_{\min} = 10\lambda/\pi . \qquad (7.19)$$

4. Все частицы имеют сферическую форму или мало отличаются от нее.

Методом светорассеяния может быть определена также функция распределения частиц по массе:

$$g(a) = -Ca\int_0^{\infty} F(\rho\beta)\varphi(\beta)d\beta . \qquad (7.20)$$

Рассмотрим приборы для определения гранулометрического состава измельченных сыпучих материалов на основе метода светорассеяния под малыми углами.

1. Прибор Харьковского политехнического института им. В.И. Ленина на лампе накаливания или ртутно-кварцевой лампе. Оптическая схема прибора ХПИ показана на рис. 7.6. Источником света 1 является лампа накаливания или ртутно-кварцевая лампа.

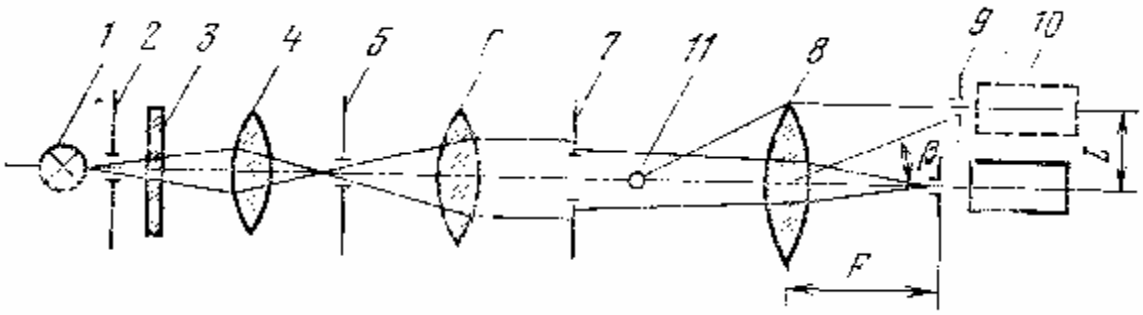

Рис. 7.6. Оптическая схема прибора ХПИ:
β - угол рассеяния; F - фокусное расстояние приемной линзы;
l - перемещение ФЭУ

Свет проходит через следующие оптические элементы: светофильтр 3, конденсорную 4 и коллимационную 6 линзы и диафрагмы 2, 5, 7, формирующие параллельный монохроматический пучок, проходящий через анализируемую среду. Рассеянный на частицах 11 свет проходит через приемную линзу 8, в фокальной плоскости которой находится фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) 10, помещенный в светозащитный корпус с точечной диафрагмой 9. При перемещении ФЭУ в направлении, перпендикулярном направлению распространения пучка, создается возможность регистрации интенсивности рассеянного света при различных

углах рассеяния, т.е. индикатрисы рассеяния. Структурная схема прибора приведена на рис. 7.7. Для стабильной работы ФЭУ 4 необходима высокая степень постоянства напряжения на его электродах (отклонение не более 0,1%). Поэтому питание ФЭУ производится от электронного стабилизатора напряжения 6. Напряжение сигнала на выходе ФЭУ измеряется электронным вольтметром 5. При малых значениях угла рассеяния $\beta=l/F$, где l - величина перемещения точечной диафрагмы относительно оптической оси прибора; F - фокусное расстояние приемной линзы. Функция $U=f(\beta)$, где U - показания электронного вольтметра, представляет собой индикатрису рассеянного света.

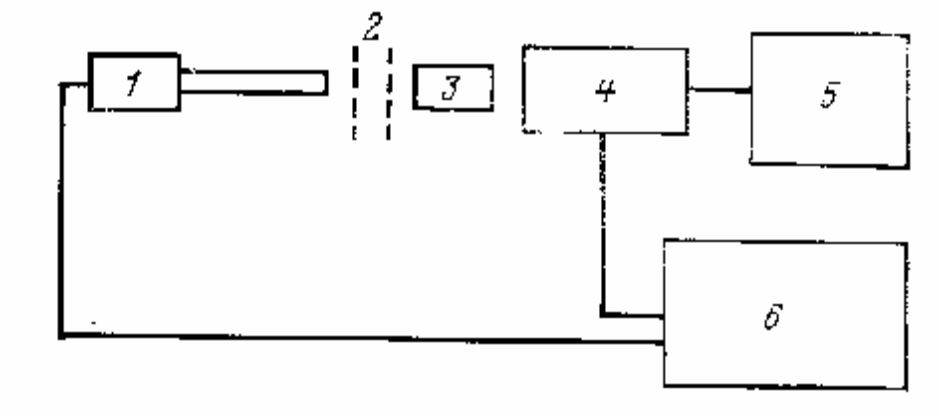

Рис. 7.7. Структурная схема прибора ХПИ:
1 - источник света и конденсорно-коллиматорная система; 2 - анализируемая среда; 3 - приемная линза; 4 - ФЭУ с устройством для его перемещения; 5 - электронный вольтметр; 6 - электронный стабилизатор напряжения

2. Прибор с оптическим квантовым генератором (ОКГ). В этом приборе в качестве источника света используется оптический квантовый генератор (лазер) непрерывного действия, испускающий свет с длиной волны 6328 А. Структурная схема прибора с ОКГ показана на рис. 7.8. Источником света является гелий-неоновый лазер 1, излучающий монохроматический свет с малым угловым расхождением пучка (в этом приборе отпадает необходимость в конденсорно-коллиматорной системе линз для создания параллельного пучка). Свет, проходя через анализируемую среду 3, рассеивается на взвешенных в ней частицах и фиксируется приемной линзой 4 в плоскости точечной диафрагмы 5, установленной перед ФЭУ 7. Питание ФЭУ осуществляется от электронного стабилизатора напряжения 10. В светозащитном корпусе 5 вместе с ФЭУ 7 и точечной диафрагмой помещается светофильтр 6, пропускающий узкую полосу длин волн, соответствующую длине волны света, испускаемого ОКГ. Наличие светозащитного корпуса и светофильтра позволяет производить снятие индикатрисы в незатемненном помещении. В приборе применяется модуляция светового пучка, что дает возможность использовать для регистрации сигнала, снимаемого с ФЭУ, электронный вольтметр переменного тока 9. Электронный модулятор 2 с электронным блоком 11

устанавливается за ОКГ. Специальным устройством 8 ФЭУ перемещается перпендикулярно световому лучу для нахождения индикатрисы рассеяния.

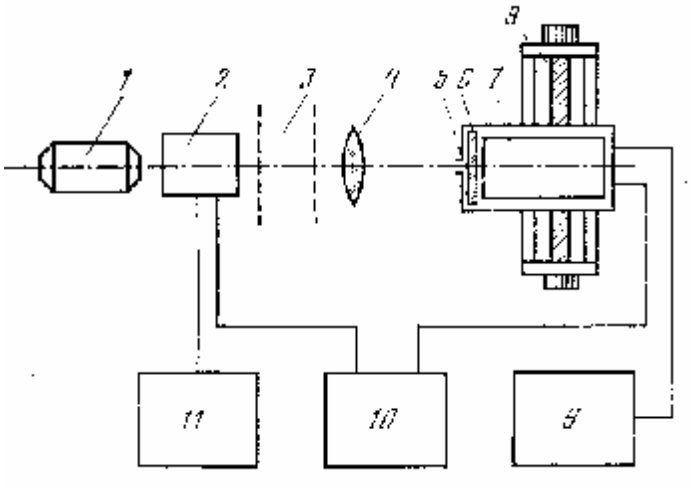

Рис. 7.8. Структурная схема прибора с ОКГ

Описанные выше приборы допускают присоединение ЭВМ для обработки экспериментальных значений индикатрисы рассеяния *I(β)* по формуле (7.17) или (7.18) и получения функции распределения частиц по размерам. Погрешность определения *f(a)* (и) или *g(a)* на этих приборах составляет 15%.

3. По методу малых углов работает прибор, в котором измерение индикатрисы рассеяния производится с помощью специально разработанного малоуглового фотометра. В качестве источника зондирующего излучения используется гелий-неоновый лазер ЛГ-56. Прибор сопряжен с ЭВМ ЕС 1022, на которой проводится обработка экспериментальных значений индикатрисы.

4. «Культер Н4» - прибор для определения гранулометрического состава методом светорассеяния под малыми углами фирмы «Coultronics FRANCE S.A.» (Франция). Этот прибор позволяет быстро (от 30 до 90с) и точно измерить субмикронные частицы в диапазоне от 0,03 до 3мкм; может работать как в ручном, так и в автоматическом режиме. Результаты в виде кривой распределения частиц по размерам, значений среднего диаметра, стандартного отклонения и коэффициента рассеяния выводятся на дисплей прибора и печатающее устройство. Прибор применим как для лабораторных исследований, так и для контроля качества измельчаемых сыпучих материалов.

Кондуктометрический метод анализа гранулометрического состава. Предложенный Коултером метод измерения размеров частиц нашел широкое применение в самых различных областях, как научных исследований, так и практической деятельности, в том числе и при исследовании процессов измельчения и смешения. В литературе можно встретить несколько различных названий этого метода: метод Коултера,

кондуктометрический, электрический, импульсный. Суть метода состоит в следующем. При прохождении частиц через токонесущий канал, заполненный электролитом с проводимостью, отличной от проводимости частиц, на нагрузочном сопротивлении, включенном последовательно с каналом, возникают изменения (импульсы) напряжения, пропорциональные объемам частиц. После усиления импульсы дискриминируются и считаются пересчетным устройством.

К основным достоинствам метода следует отнести его универсальность. В обычно используемых электролитах с удельным сопротивлением 10^{-2} – 10^{0}Ом·м величина и полярность импульса не зависят от электрических свойств частиц. Другим существенным достоинством метода является пропорциональность аналитического сигнала именно объему частицы. Во многих случаях объем является наиболее объективной характеристикой размера частицы. Метод характеризуется высокой точностью и хорошей воспроизводимостью результатов.

Рассмотрим принцип действия прибора с кондуктометричегким датчиком. Подлежащий гранулометрическому анализу порошок измельченного сыпучего материала суспендируется в большом количестве электролита, и некоторая часть этой суспензии помещается в стакан 3 (рис. 7.9). В стакане находится стеклянная пробирка 1 с микроотверстием 2 в боковой стенке. Пробирку заполняют чистым электролитом. В стакане и пробирке размещают электроды 5 и 6, подключаемые к источнику постоянного напряжения 4. Внутренняя полость пробирки 1 соединяется с помощью трубок через трехходовой кран 7 либо с ртутным манометром 9, либо с колбой 13. Если с помощью крана 7 соединить манометр с колбой 13 и в последней создать с помощью внешнего источника разряжения 8 вакуум, то ртуть в правом колене манометра поднимется, а в левом опустится. Если после этого с помощью крана соединить пробирку 1 с манометром 9, то через отверстие 2 начнет поступать суспензия, находящаяся в стакане 3. Этот процесс длится до тех пор, пока уровни столбов ртути в коленах манометра 9 не сравняются. Каждая твердая частица суспензии, проходя через микроотверстие, увеличивает сопротивление между электродами, при этом сила тока в цепи снижается. Это вызывает импульсное изменение напряжения, снимаемого с сопротивления нагрузки. Амплитуда этого импульса пропорциональна объему прошедшей через отверстие частицы. Поднимающийся в левом колене манометра столбик ртути при замыкании контакта 10 включает счетчик прибора, а при замыкании контакта 11 выключает его. Расстояние между контактами 10, 11 и диаметр трубки в этом месте определяют дозу (объем) измеряемой суспензии. Контакт 12 соединен с корпусом прибора. Поступающие от датчика импульсы напряжения усиливаются, сортируются дискриминатором и подсчитываются счетчиком. Дискриминатор пропускает импульсы на счетчик только в случае, если их амплитуда превышает порог дискриминации. Проводя несколько циклов

счета при разных порогах дискриминации, можно получить интегральную кривую распределения частиц по размерам. После окончания счета с помощью крана 7 колба 12 соединяется с манометром 9, вследствие чего отработанная суспензия, находящаяся в трубке выше столбика ртути, сливается в колбу 13. Таким образом, периоды счета можно повторять многократно.

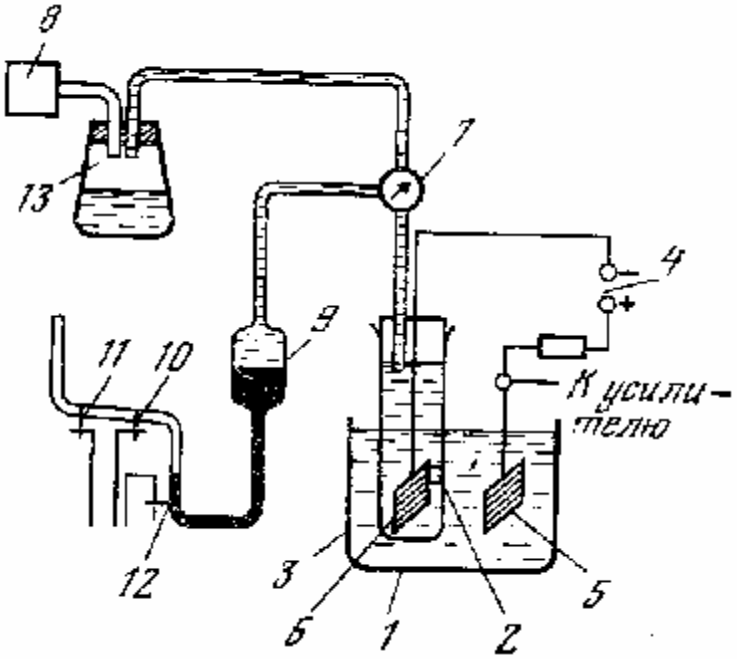

Рис. 7.9. Схема прибора для определения гранулометрического состава кондуктометрическим методом

Кондуктометрический метод анализа дисперсионного состава позволяет определять частицы размером от 0,3 до 800мкм. Диаметр микроотверстия выбирают в зависимости от диапазона диаметров частиц, подлежащих измерению. Основные недостатки метода: малый диапазон диаметров частиц, которые могут быть измерены на одной пробирке (отношение диаметров примерно 40:1); необходимость суспендирования порошка и контроля за чистотой отверстия.

Среди приборов кондуктометрического анализа наибольшее распространение получил счетчик «Культер ТА 2» (счетчик Коултера), выпускаемый фирмой «Coultronics FRANCE S.A.» (Франция). Счетчик «Культер ТА 2» позволяет автоматически распределить частицы по размерам от 0,4мкм до нескольких сот микрон (250 - 800мкм). Измерение проводится за несколько десятков секунд. Счетчик детектирует 5000 частиц/с и распределяет по 16 каналам импульсы, вызванные прохождением частиц через капиллярную трубку. Условия анализа: частицы должны поддерживаться во взвешенном состоянии в электролите. Применяются различные виды электролитов (водные и неводные) в зависимости от исследуемого материала. Способ проведения анализа: оператор

программирует или объем анализируемой суспензии, или число подсчитанных частиц, или время анализа. Измерение осуществляется вручную или компьютером. Результаты выводятся: а) на цифровой индикатор (общее число частиц, число частиц в одном канале, время анализа); б) на осциллоскоп (интегральные и дифференциальные кривые распределения по объему (в %) или по количеству частиц). Расчеты: мода, медиана, смещение относительно медианы. Все полученные данные могут печататься на бумаге и храниться на магнитной кассете для дальнейшей обработки.

Телевизионный метод определения гранулометрического состава сыпучих материалов в поле зрения микроскопа по принципу сканирования. В общем случае прибор для определения гранулометрического состава телевизионным методом состоит из сканирующего устройства, предназначенного для создания электрических импульсов, определенным образом связанных с числом, размерами и пространственным распределением частиц, и устройства анализа и регистрации импульсов, обрабатывающего и выдающего необходимые результаты.

При использовании фотоумножителя в качестве электрического датчика сканирование может осуществляться либо путем перемещения препарата относительно фиксированной оптической системы, либо путем перемещения светового луча. Первый из названных методов наиболее приемлем при сканировании щелью. Во втором методе при сканировании пятном малых размеров в качестве источника света удобно использовать растр, образованный на экране электронно-лучевой трубки. Кроме этих средств в качестве электрического датчика может использоваться телевизионная камера, в которой изображение образца сканируется электронным лучом.

Рассмотрим приборы и системы, работающие по телевизионному методу.

1. Автоматический телевизионный счетчик-анализатор микрообъектов КТА-1 и автоматический телевизионный анализатор для гранулометрического контроля АТА-1. Счетчики КТА-1 и АТА-1 предназначены для экспресс-анализа гранулометрического состава микрообъектов в поле зрения микроскопа в диапазоне размеров частиц 2-500мкм.

Приборы позволяют точно подсчитать частицы независимо от их размера и формы. В них реализован способ, позволяющий получать дифференциальный и интегральный законы распределения частиц по размерам.

Рассматриваемые приборы базируются на том, что если одновременно производить подсчет числа пересечений n_i; сканирующим лучом изображения микрочастиц и числа совпадений n_c однотонных («черных» или

«белых») сигналов от двух смежных строк, то число частиц N в поле наблюдения может быть достаточно точно определено при условии, что анализирующее устройство будет работать по следующему закону:

$$N = \sum_{i=1}^{k} n_i - \sum_{c=1}^{k-N} n_c \,. \qquad (7.21)$$

В качестве примера рассмотрим процесс счета на двух частицах резко различной формы (рис. 7.10). В левых столбцах приведены числа пересечений изображения частиц i, а в правых - числа совпадений однотонных сигналов от двух смежных строк c. Как следует из подсчетов, разность $i - c$ в обоих случаях равна единице. Очевидно, что если в поле наблюдения находится N частиц, то и указанная разность будет равна N.

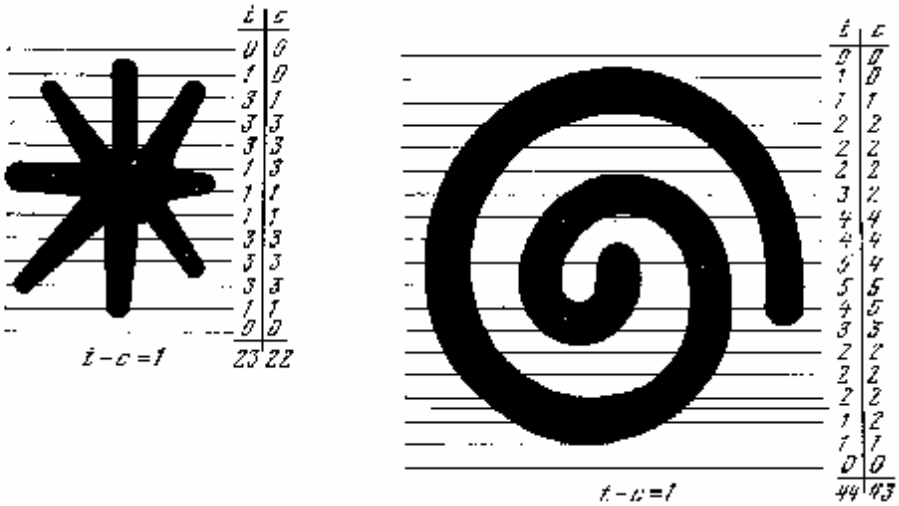

Рис.7.10. Процесс счета частиц разной формы в счетчике типа КТА-1

Структурная схема счетчика типа КТА-1 показана на рис. 7.11. Аппаратура выполнена в виде приборного стола, на котором размещены телевизионная камера, микроскоп, видеоконтрольное устройство, цифровое индикаторное табло и оперативные органы управления. Внутри стола помещены аналого-цифровое вычислительное устройство и блоки питания. Видеосигнал, снимаемый с телевизионной камеры 7, спаренной с микроскопом МБИ, через блок канала 2 поступает на видеоконтрольное устройство 3 и блок выделения полезного сигнала 4. С блока 4 квантованный сигнал подается на блок разбраковки по размерам 6, который пропускает только те импульсы, длительность которых (соответствующая размерам частиц) больше установленной в данный момент размерной градации. Эти импульсы дальше поступают на схему формирования видеоимпульсов 7, в которой производится формирование крутизны фронтов в 0,1мкс и амплитуды импульсов 40В. Со схемы 7 видеоимпульсы, представляющие собой последовательность импульсов пересечения i, подводятся к схеме совпадений 10, на вход канала I счетного блока 11, а также на блок задержки 8.

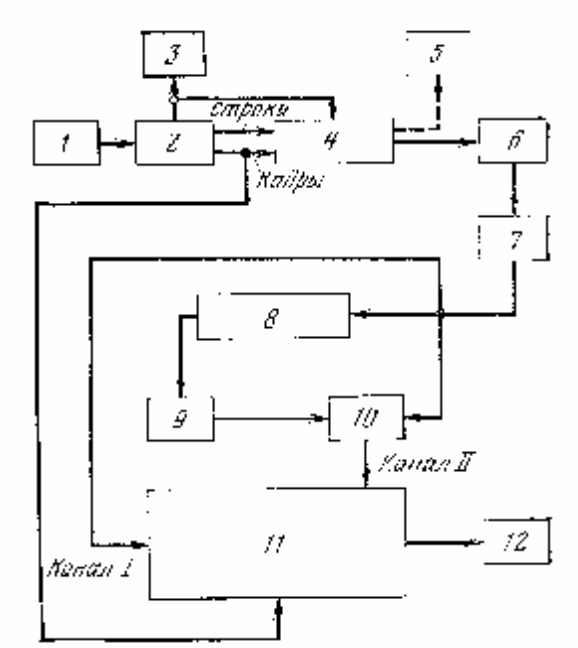

Рис. 7.11. Структурная схема счетчика типа КТА-1

Задержанные видеоимпульсы подаются на схему формирования видеоимпульсов, где снова формируется необходимая их амплитуда, и, далее, на второй вход схемы совпадений 10. На выходе этой схемы в случае одновременного появления сигналов от смежных строк возникают импульсы совпадения *c*, которые подаются на II канал счетного блока 11.

Таким образом, в течение каждого кадра на входах I и II счетного блока 11 присутствуют две серии видеоимпульсов, соответствующие сериям *i* и *c* на рис. 7.10, разность которых необходимо подсчитать.

Операция разностного счета производится в счетном блоке 11. Эта разность фиксируется на цифровом индикаторном табло 12 и соответствует количеству частиц определенного размера в поле зрения микроскопа. При желании получить суммарную площадь всех частиц видеоимпульсы с блока 4 подаются к схеме измерения площадей 5 (см. рис. 7.11).

Основные технические характеристики КТА-1: разложение изображения на 312 строк при 50кадр/с; количество частиц в одном поле зрения до 2000; диапазон размеров частиц от 2 до 500мкм; количество размерных градаций 10; погрешность счета не более 5%; результат счета индицируется на световом табло через каждые 2с; размер диагонали экрана видеоприемного устройства 230мм; потребляемая мощность от сети переменного тока 1,5кВ·А; габариты установки 125х75х123см.

Следует указать, что рассмотренные счетчики при использовании соответствующей оптической системы вместо микроскопа могут быть применены для подсчета объектов любых размеров.

2.Сканирующий микрофотометр, управляемый от ЭВМ («Зенит-К»). Микрофотометр «Зенит-К» содержит двухкоординатный стол с шаговым

приводом, электронно-оптическое сканирующее устройство на электронно-лучевой трубке (ЭЛТ) высокого разрешения, цветной растровый дисплей, двухлучевое фотометрическое устройство с автоматической калибровкой фотоприемников от дополнительного источника света, оптическую систему с шаговым приводом микрообъектива. Принцип работы: препарат из анализируемых частиц или их фотографическое изображение закрепляется в сменной рамке и устанавливается на подвижный двухкоординатный стол, с помощью которого оператор устанавливает в поле зрения сканирующего устройства выбранный фрагмент. На экране просвечивающей ЭЛТ формируется программно-управляемый растр, изображение которого переносится на плоскость объекта исследования с помощью сменного микрообъектива. С помощью двухлучевого фотометрического устройства световой поток, прошедший через заданную точку изображения, измеряется и преобразуется в 8-разрядный код оптической плотности, который вводится в оперативную память управляющей ЭВМ.

3. Комплекс микроскоп – ЭВМ типа «Протва М-11». Комплекс работает на основе сканирующего метода оптико-структурного машинного анализа. Состоит из управляющей вычислительной машины «Электроника-60М», состыкованной со сканирующим микроскопом «Протва М-11». Сущность сканирующего метода заключается в машинной обработке цифровой матрицы оптического изображения исследуемого образца. Несмотря на то, что комплекс микроскоп – ЭВМ ориентирован в основном для анализа микробиологических объектов, он с успехом может быть применен для определения гранулометрического состава измельченных сыпучих материалов.

4. Электронно-вычислительная система РМС (particle measurement computer system millipore) фирмы «Millipore» (Франция). Система РМС «Millipore» работает по принципу сканирования и предназначена для определения: 1) распределения частиц по характерному размеру (наибольшему диаметру, проекции длины, среднему размеру); 2) фактора формы частиц $C_ф = \left(\pi D^2 / 4\right) / A$, где $C_ф$ – коэффициент (фактор) формы; $\pi D^2 / 4$ - площадь круга диаметром D; A - площадь проекции реальной частицы; 3) площади частиц; 4) размера частиц, превышающего заданную величину.

Система РМС, представленная на рис. 7.12, состоит из микроскопа 7, компьютера 2, монитора 3 и блока регулирования 4.

Стандартная система РМС снабжена микроскопом, работающим в проходящем свете, что позволяет измерять частицы в пределах от 0,4 до 1600мкм. Диапазон измерений можно увеличить за счет присоединения вместо оптического микроскопа электронного или использовать приставку макростола и обсчет частиц вести с фотодиапозитивов, пленок, отснятых на электронном микроскопе. Это позволяет работать с частицами, размер

которых меньше 0,4 мкм. Основное условие успешной работы с системой: частицы должны хорошо контрастировать с фоном экрана монитора, т.е. быть непрозрачными.

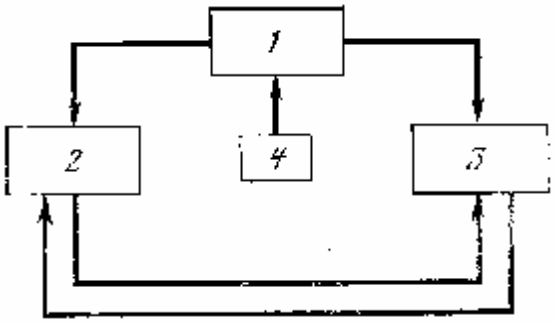

Рис. 7.12. Схема электронно-вычислительной системы РМС «Millipore»

Компьютер состоит из следующих модулей: 1) базовый модуль, в котором происходит выбор способа детектирования; 2) модуль счета позволяет измерить количество частиц; находящихся в поле сканирования (на предметном стекле микроскопа), и, если необходимо, выдать общее количество частиц, подсчитываемых последовательно; 3) модуль измерения снабжен либо устройством для пересчета всех частиц, либо устройством для измерения отдельных частиц; в первом случае выдаются следующие данные: общая и средняя спроектированные длины; общая и средняя площади; количество частиц, величина которых превосходит заданную (эту величину можно постоянно изменять); во втором случае измерения частиц производятся с помощью электронного карандаша со следующим принципом действия: на конце карандаша имеется чувствительный фотоэлемент, который посылает сигнал к компьютеру всякий раз, когда он улавливает изменение освещенности во время прохождения какой-либо зоны экрана монитора; 4) модуль распределения позволяет распределить полученные при помощи электронного карандаша данные в десяти регистрах блока распределения; результаты измерений накапливаются в соответствующих счетчиках, показания которых после окончания обсчета составляют распределение числа частиц по размерам.

Телеэкран монитора служит только для удобного представления измеряемого поля.

Принцип действия системы РМС заключается в следующем: когда анализируемая проба положена на предметный столик микроскопа, ее изображение передается телекамерой на приемное устройство; сигнал также посылается на схему, где воспроизводится изображение либо всех частиц, либо только выбранных полей частиц; сигналы обрабатываются компьютером, и результаты подсчетов и измерений возникают на экране монитора над изображением, причем результаты измерений выдаются сразу в микронах и квадратных микронах.

Система РМС способна точно определить границы частиц любой

формы: когда луч сканирования встречается с границей частицы, разница ее освещенности по отношению к фону измеряется детекторным контуром. В случае, когда частицы по цвету неодинаковы, или граница частиц слабо контрастирует с фоном, детекторная схема РМС может работать в трех режимах: автоматическом, полуавтоматическом и ручном.

В автоматическом режиме определяются все частицы в видеосистеме независимо от того, какой оттенок серого цвета они имеют, главное условие, чтобы граница частицы была четко выражена. В полуавтоматическом режиме измерение осуществляется за счет разницы уровней видеосигналов между частицей и фоном. В ручном способе детектируются только те частицы, которые дают видеосигнал, превосходящий заданный уровень. Погрешность измерений данной системы не превышает 2%.

ВОПРОСЫ К ГЛАВЕ 7

1. Дайте определение сыпучего материала.
2. Что такое эквивалентный диаметр частиц пищевого сыпучего материала?
3. Что такое гранулометрический (дисперсный) состав сыпучего материала?
4. Какие эмпирические и теоретические законы распределения частиц по размерам наиболее часто используют в практике расчетов?
5. Перечислите основные физические свойства сыпучих пищевых материалов. Дайте их определение.
6. Что такое угол естественного откоса?
7. Запишите закон трения Кулона.
8. Какой характеристикой описывают способность материала вытекать из отверстий?
9. Что понимают под слеживаемостью сыпучих материалов?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Урьев Н.Б., Талейсник М.А. Пищевые дисперсные системы. (Физико-химические основы интенсификации технологических процессов). – М.: Агропромиздат, 1985. – 296 с.
2. Урьев Н.Б., Талейсник М.А. Физико-химическая механика и интенсификация образования пищевых масс. – М.: Пищевая пром-сть, 1976. – 240 с.
3. Мачихин Ю.А. и др. Реометрия пищевого сырья и продуктов: Справочник/ Под ред. Ю.А. Мачихина.- М.: Агропромиздат, 1990. – 270 с.
4. Горбатов А.В. Реология мясных и молочных продуктов. – М.: Пищевая пром-сть, 1979. – 383 с.

5. Структурно-механические характеристики пищевых продуктов/ А.В.Горбатов, А.М.Маслов, Ю.А. Мачихин и др.; Под ред. А.В. Горбатова. – М.: Легкая и пищевая пром-сть, 1982. – 296 с.
6. Федотьин И.М. Физико-математические основы интенсификации процессов и аппаратов пищевой и химической технологии / Под ред. А.А. Доменского. - АН МССР – Кишинев: Штиница, 1987. – 262 с.
7. Федоров В.Г. Теплометрия в пищевой промышленности. – М.: Пищевая пром-сть, 1974. – 176 с.
8. Гинзбург А.С. и др. Теплофизические характеристики пищевых продуктов: Справочник / А.С. Гинзбург, М.Н. Громов, Г.И. Красовская. – 2-е изд. доп. И перераб. – М.: Пищевая пром-сть, 1980. – 288 с.
9. Крутин В.И. Колебательные реометры. – М.: Машиностроение. – 1985.- 160 с.
10. Матц С.А. Структура и консистенция пищевых продуктов. – М.: Пищевая пром-сть. – 1972. – 237 с.
11. Николаев Б.А. Измерение структурно-механических свойств пищевых продуктов. – М.: Экономика. – 1964. – 224 с.
12. Косой В.Л. Совершенствование процесса производства вареных колбас. – М.: Легкая и пищевая пром-сть. – 1983. – 272 с.
13. Крутоголов В.Д., Кулаков М.И. Ротационные выскозиметры. – М.: Машиностроение. – 1980. – 208 с.
14. Рогов И.А., Горбатов А.В., Свинцов В.Я. Дисперсные системы мясных и молочных продуктов. – М.: Агропромиздат. – 1990. – 319 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Основные закономерности деформирования и течения пищевых продуктов и сырья. Общие положения 4
2. Методы и приборы для измерения структурно-механических характеристик пищевых продуктов 32
3. Адгезия, аутогезия и когезия пищевых масс 48
4. Методы и приборы для измерения адгезионных характеристик 75
5. Адгезионные и фрикционные характеристики продуктов 82
6. Методы и приборы для измерения фрикционных характеристик 95
7. Сыпучие пищевые материалы 102
Список литературы 127

Редактор О.А. Соловьева
Подписано в печать 12.05.2007 Формат 60х84 1/16. Бумага писчая. Печать плоская.

Усл. печ. л. 7,44. Уч. – изд.л. 8,26. Тираж 100 экз. Заказ.

ГОУ ВПО Ивановский государственный химико-технологический университет
Отпечатано на полиграфическом оборудовании кафедры
экономики и финансов ГОУ ВПО «ИГХТУ»
153000, г.Иваново, пр. Ф.Энгельса, 7