

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

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 нестрогих 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.:

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

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:

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

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:

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

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

$$\dot{\gamma} = 8\omega/d = 4\omega/R = 32V_c/(\pi d^3) = 4V_c/(\pi R^3), \quad (1.3a)$$

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, $\text{м}^3/\text{с}$; $d = 2R$ - внутренний диаметр и радиус трубы, м;

при ламинарном движении в коаксиальном зазоре ротационного вискозиметра

$$\dot{\gamma} = 2\Omega / \left[1 - (R_g/R_n)^2 \right], \quad (1.3б)$$

где $\Omega = \omega/R_g = 2\pi N$ - угловая скорость вращения ротора, рад/с;

R_g, R_n - 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:

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

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

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

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 м²), нормальной к вектору приложения силы:

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

Напряжение в точке

$$\sigma = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} (\Delta P / \Delta S). \quad (1.4a)$$

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 :

$$\xi = p_r / p, \quad (1.5)$$

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 :

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

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 ($\Delta V = V - V_k$) к его первоначальному объему (V):

$$\varepsilon_v = \Delta V / V. \quad (1.7)$$

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

$$\varepsilon_v = \varepsilon - 2\varepsilon_r = \varepsilon(1 - 2\mu), \quad (1.8)$$

что наглядно видно при рассмотрении одноосного сжатия цилиндра или параллелепипеда.