

Реометрия пищевого

С



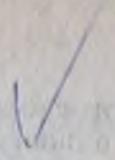
**Реометрия
пищевого
сырья
и продуктов**



сырья и продуктов

ПРАВОУЧНИК

664
Р-40



Реометрия пищевого сырья и продуктов

СПРАВОЧНИК

Под редакцией проф., д-ра техн. наук
Ю. А. МАЧИХИНА

БИБЛИОТЕКА
Бух. ТИП и ЛП
№ 45664



МОСКВА
ВО «АГРОПРОМИЗДАТ»
1990

ББК 36
P40
УДК 532.135:664

Под редакцией Ю. А. Мачихина коллектив авторов

СССР	НРБ
Ю. А. Мачихин	К. Коларов
А. В. Горбатов	ГДР
А. С. Максимов	Х.-Д. Чойшнер

Редактор И. П. Вейшторд

Реометрия пищевого сырья и продуктов: Справочник
P40 /Под ред. Ю. А. Мачихина. — М.: Агропромиздат. —
1990. — 271 с.: ил.
ISBN 5—10—000858—X

Справочник представляет собой совместное издание специалистов СССР, НРБ и ГДР. Описаны конструкции и области применения наиболее распространенных реометров, методики измерений. Изложены вопросы теории реометрии и приведены обобщенные характеристики некоторых пищевых продуктов.

Для инженерно-технических и научных работников различных отраслей перерабатывающей промышленности и пищевого машиностроения, а также для аспирантов и студентов пищевых вузов.

Р 4001020000—136 155—89
035 (01)—90

ББК 36

ISBN 5—10—000858—X

© Ю. А. Мачихин, А. В. Горбатов, А. С. Максимов, К. Коларов, Х.-Д. Чойшнер, 1990

ВВЕДЕНИЕ

Реометрия (экспериментальная реология) занимает большое место в практике технологических лабораторий предприятий агропромышленного комплекса, научно-исследовательских организаций и служит для определения различных структурно-механических характеристик пищевых материалов с помощью специальных приборов и устройств. С каждым годом повышаются перечень и количество продуктов, выпускаемых перерабатывающей промышленностью, производство многих традиционных продуктов в настоящее время механизировано, однако зачастую без учета реологических свойств этих продуктов, что не позволяет получить оптимальные конечные результаты.

В справочнике описаны методы определения структурно-механических характеристик, от которых главным образом зависят поведение пищевого материала в процессе его переработки и качество готовой продукции. Эти характеристики нужны для проектирования машин и аппаратов, выбора наиболее рациональных режимов работы оборудования.

Знание закономерностей изменения реологических свойств позволяет влиять на структуру и качество продуктов путем внесения различных добавок, регулирования режимов и способов механической, термической, электрической и химико-технологической обработки.

Физико-механические свойства пищевого сырья, полуфабрикатов и продуктов весьма разнообразны и зависят от многих технологических факторов: температуры, влажности, продолжительности и интенсивности механического и теплового воздействия, способа и срока хранения, вида транспортирования и многих других причин. В связи с этим в литературе можно встретить для одного и того же пищевого материала разные по величине характеристики, так как не соблюдались инвариантные условия, применялись различные методы определения и приборы.

Очевидно, обеспечить одинаковые условия практически невозможно, поэтому в сведениях о реологических характеристиках необходимо указывать, каким методом, при каких параметрах и на каких приборах получены те или иные данные.

Отличительной особенностью предлагаемого справочника является его практическая направленность, что особенно полезно для специалистов, занимающихся на производстве или в научно-исследовательских лабораториях экспериментальной реологией. Материал спра-

ББК 36
P40
УДК 532.135:664

Под редакцией Ю. А. Мачихина коллектив авторов

СССР
Ю. А. Мачихин
А. В. Горбатов
А. С. Максимов

НРБ
К. Коларов
ГДР
Х.-Д. Чойшнер

Редактор И. П. Вейшгорд

Реометрия пищевого сырья и продуктов: Справочник
P40 /Под ред. Ю. А. Мачихина. — М.: Агропромиздат. —
1990. — 271 с.: ил.
ISBN 5—10—000858—X

Справочник представляет собой совместное издание специалистов СССР, НРБ и ГДР. Описаны конструкции и области применения наиболее распространенных реометров, методики измерений. Изложены вопросы теории реометрии и приведены обобщенные характеристики некоторых пищевых продуктов.

Для инженерно-технических и научных работников различных отраслей перерабатывающей промышленности и пищевого машиностроения, а также для аспирантов и студентов пищевых вузов.

Р 4001020000—136 155—89
035 (01)—90

ББК 36

ISBN 5—10—000858—X

© Ю. А. Мачихин, А. В. Горбатов, А. С. Максимов, К. Коларов, Х.-Д. Чойшнер, 1990

ВВЕДЕНИЕ

Реометрия (экспериментальная реология) занимает большое место в практике технологических лабораторий предприятий агропромышленного комплекса, научно-исследовательских организаций и служит для определения различных структурно-механических характеристик пищевых материалов с помощью специальных приборов и устройств. С каждым годом повышаются перечень и количество продуктов, выпускаемых перерабатывающей промышленностью, производство многих традиционных продуктов в настоящее время механизировано, однако зачастую без учета реологических свойств этих продуктов, что не позволяет получить оптимальные конечные результаты.

В справочнике описаны методы определения структурно-механических характеристик, от которых главным образом зависят поведение пищевого материала в процессе его переработки и качество готовой продукции. Эти характеристики нужны для проектирования машин и аппаратов, выбора наиболее рациональных режимов работы оборудования.

Знание закономерностей изменения реологических свойств позволяет влиять на структуру и качество продуктов путем внесения различных добавок, регулирования режимов и способов механической, термической, электрической и химико-технологической обработки.

Физико-механические свойства пищевого сырья, полуфабрикатов и продуктов весьма разнообразны и зависят от многих технологических факторов: температуры, влажности, продолжительности и интенсивности механического и теплового воздействия, способа и срока хранения, вида транспортирования и многих других причин. В связи с этим в литературе можно встретить для одного и того же пищевого материала разные по величине характеристики, так как не соблюдались инвариантные условия, применялись различные методы определения и приборы.

Очевидно, обеспечить одинаковые условия практически невозможно, поэтому в сведениях о реологических характеристиках необходимо указывать, каким методом, при каких параметрах и на каких приборах получены те или иные данные.

Отличительной особенностью предлагаемого справочника является его практическая направленность, что особенно полезно для специалистов, занимающихся на производстве или в научно-исследовательских лабораториях экспериментальной реологией. Материал спра-

вочника изложен в форме, доступной для широкого круга инженерно-технических и научных работников перерабатывающей промышленности: даны основные понятия и определения реологии, расчетные формулы приведены без громоздких выводов. В основу книги положены многолетние исследования авторов и их сотрудников, выполненные в Московском технологическом институте пищевой промышленности (проф. Ю. А. Мачихиним, доц. А. С. Максимовым), Московском технологическом институте мясной и молочной промышленности (проф. А. В. Горбатовым), Пловдивском институте пищевой и вкусовой промышленности (доц. К. Коларовым, НРБ) и Дрезденском техническом университете (проф. Х.-Д. Чойшнер, ГДР).

Авторы искренне признательны д-ру техн. наук Ю. В. Бурляю и д-ру техн. наук, проф. Ю. Г. Яновскому за рецензирование и полезные рекомендации, которые были учтены при окончательной подготовке справочника.

1. ОСНОВНЫЕ РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

1.1. ПИЩЕВЫЕ ПРОДУКТЫ КАК РЕОЛОГИЧЕСКИЕ ТЕЛА

Пищевое сырье растительного и животного происхождения при заготовке (уборка урожая, убой скота, лов рыбы и т.д.), транспортировании, хранении и особенно при переработке в продукты питания подвергается различным механическим воздействиям. При этом производственные процессы должны быть организованы так, чтобы обеспечить максимально высокий уровень качества готовых продуктов. Успешному решению этой задачи способствует знание реологических свойств и текстуры пищевых продуктов.

Пищевые сырье, полуфабрикаты и продукты относятся к реальным телам, которые обладают упругостью, пластичностью и вязкостью. В зависимости от вида, продолжительности и скорости нагружения реального тела некоторые из реологических свойств проявляются особенно ярко, в то время как другие едва заметны, и поэтому при выбранном нагружении ими можно пренебречь. Для инструментального определения реологических характеристик наиболее пригодны простой сдвиг (сдвиговое течение), одноосное растяжение и одноосное сжатие (компрессия).

При механическом нагружении материалов в процессах переработки имеют значение такие механические свойства, как прочность при разрушении (для процессов резки и дробления), твердость, внешнее трение, адгезия (липкость), которые принимаются во внимание в реометрии пищевых продуктов [1, 3, 5, 11].

Пищевые продукты, включая сырье и полуфабрикаты, в зависимости от состава, дисперсного строения и структуры обладают различными реологическими свойствами и текстурными отличительными признаками (табл. 1.1 и 1.2).

Наиболее сложными реологическими свойствами обладают высококонцентрированные дисперсные системы (табл. 1.3) с пространственными структурами. Образование и изменение структур, обусловленные физико-химическими, биохимическими, коллоидно-химическими или чисто физическими процессами, всегда приводят к изменениям их реологических свойств.

Структуры дисперсных систем в состоянии термодинамического равновесия делятся на две группы [2]:

1 — коагуляционные структуры, в которых взаимодействие между элементами происходит через тонкий слой дисперсионной среды и обусловлено силами Ван-дер-Ваальса. Эти структуры могут проявлять свойства неньютоновских жидкостей (тиксотропию, реопексию, вязкоупругость и пластичность). Они сильно изменяются при нагреве, введении ПАВ, изменении кислотности и других воздействиях;

1.1. Классификация пищевых продуктов по реологическим свойствам и текстурным признакам

Дисперсная система	Продукт (в том числе сырье, полуфабрикат)	Типичные реологические свойства	Типичные текстурные признаки
Чистая жидкость	Вода, спирт, масло	Ньютоновская вязкость	Водянистый, жидкий
Чистый расплав	Расплавленные жиры (какао-масло), расплавленный сахар	Преимущественно ньютоновская вязкость	Жидкий, густой, маслянистый
Истинный раствор	Солевые и сахарные растворы, экстракты, пиво, напитки	То же	Жидкий, густой
Коллоидный раствор	Белковые растворы, мутные фруктовые и ягодные соки	Ньютоновская вязкость, возможны вязкоупругость, тиксотропия	Жидкий, густой, слизистый
Жидкообразная	Суспензии (какао, фруктовые и овощные соки, супы), эмульсии (молоко, сливки, майонез)	Ньютоновская и неньютоновская вязкость, тиксотропия, вязкоупругость	Жидкий, густой, кремообразный, тягучий, вязкотекучий, клейкий
Пастообразная	Фруктовое пюре (яблочный мусс), ореховый мусс, творог, фарш	Неньютоновская вязкость, тиксотропия, реопексия, вязкоупругость	Густой, клейкий, кашеобразный, резинообразный, слизистый, тягучий
Связанная мягкая	Масло, пенная масса, желе, тесто, йогурт, суп, паштет, картофельное пюре	Пластичная вязкость, обратимая и необратимая тиксотропия, упругость, вязкоупругость	Мягкий, мажущийся, скользкий, кремообразный, пастообразный, клейкий, эластичный
Связанная полутвердая	Мякиш хлеба, вареная колбаса, вареный картофель	Упругость, пластичная вязкость, вязкоупругость	Мягкий, крепкий, резинообразный, вязкий
Прочная	Свежие яблоки, груши, картофель, огурцы, мясо, хлебоблочные продукты длительного хранения, шоколад, конфеты	Упругость, пластичная вязкость, вязкоупругость	Мягкий, прочный, хрупкий, ломкий, вязкий
Твердая	Карамель, зерно, ядра орехов, макаронные изделия, морковь	Упругость, твердость, высокая текучесть и прочность, хрупкость	Крепкий, твердый, хрупкий, ломкий, стекловидный

1.2. Типы дисперсных систем пищевых продуктов [5]

Дисперсионная среда	Дисперсная фаза	Дисперсная система	Продукт (в том числе сырье, полуфабрикат)
Газ	Жидкость	Жидкий аэрозоль	Экстракт кофе при распылительной сушке
	Твердое тело	Твердый аэрозоль	Мука при пневмотранспортировании
Жидкость	Газ	Пена	Белковая пена
	Жидкость	Эмульсия	Молоко, майонез
Твердое тело	Твердое тело	Золь	Какао-масса
		Суспензия	Фруктовый сок
	Газ	Твердая пена, пористое твердое тело	Мороженое, безе, сухари
	Жидкость	Твердая эмульсия	Масло, маргарин
Твердое тело	Твердое тело	Пористое твердое тело, заполненное жидкостью	Овощи и фрукты
		Твердая суспензия	Макаронные изделия, шоколад, карамель

1.3. Сложные дисперсные системы пищевых продуктов

Продукт	Дисперсная фаза	Дисперсионная среда
Шоколад	Кристаллы сахара, твердые частицы какао, пузырьки воздуха	Кристаллическая форма какао-масла
Мороженое	Пузырьки воздуха, капельки жира, белковые макромолекулы	Кристаллическая водянистая фаза
Мякиш хлеба	Пузырьки воздуха, частично кристаллические молекулы крахмала, частицы отрубей	Крахмальный и белковый гель
Фрукты, овощи, картофель, зерно, масличные семена	Капельки жидкости, пузырьки воздуха, крахмальные зерна	Целлюлоза, белковая оболочка
Мясо	Капельки жидкости, кости, капельки жира	Белковые макромолекулы

2 — конденсационно-кристаллизационные структуры, которые возникают при сцеплении однотипных элементов на границе фаз. Такие структуры обладают относительно высокой прочностью, упругостью и хрупкостью. После разрушения они не восстанавливаются.

1.2. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ РЕОЛОГИИ И ТЕОРИИ НАПРЯЖЕННОГО И ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

Реология как наука о деформации и течении реальных тел исходит из феноменологического поведения тел при механическом нагружении. Она исследует соотношение между действующим на тело напряжением и обусловленной его действием деформацией.

Реологически разные виды тел при равных напряжениях проявляют различное деформационное поведение, что обусловлено материально-структурными свойствами тела, которые могут быть определены как реологические константы материала [4, 6].

Реометрия имеет целью определить все наиболее существенные реологические константы посредством специального механического воздействия на исследуемое тело.

Так как не всегда при определенном виде деформации тела одновременно проявляются все его реологические свойства, то для полной количественной оценки реологических свойств тела необходимо применять различные методы нагружения. Инструментальное определение реологических констант требует правильного выбора методов измерений и приборов (реометров).

Под действием внешней нагрузки в теле возникают деформации и напряжения, являющиеся мерой сил внутреннего взаимодействия между элементами тела. Рассмотрим элементарный объем этого тела в форме куба, грани которого находятся в направлении осей x, y, z прямоугольной системы координат (рис. 1.1). На каждой грани куба присутствуют одна составляющая нормального напряжения σ_{ij} и две составляющих касательного напряжения τ_{ij} (1-й индекс указывает на плоскость, 2-й — на направление составляющих).

Согласно аксиоме Больцмана о симметрии напряжений изотропного тела имеет место равенство $\tau_{ij} = \tau_{ji}$, поэтому для описания напряженного состояния изотропного тела с тензором напряжения

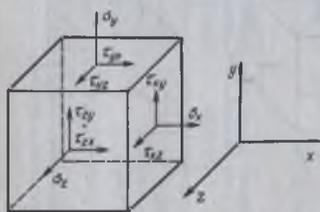


Рис. 1.1. Компоненты напряжений элементарного куба

$$P_{ij} = \begin{vmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{vmatrix} \quad (1.1)$$

достаточно знать 6 независимых составляющих напряжения.

Полную деформацию элемента объема можно описать аналогично тензору напряжения посредством тензора деформации с 6-ю независимыми составляющими:

$$e_{ij} = \begin{vmatrix} \epsilon_{xx} & \frac{1}{2} \gamma_{xy} & \frac{1}{2} \gamma_{xz} \\ \frac{1}{2} \gamma_{yx} & \epsilon_{yy} & \frac{1}{2} \gamma_{yz} \\ \frac{1}{2} \gamma_{zx} & \frac{1}{2} \gamma_{zy} & \epsilon_{zz} \end{vmatrix} \quad (1.2)$$

где ϵ_{ii} — линейная деформация растяжения или сжатия; γ_{ij} — угловая деформация сдвига.

В зависимости от избранного вида механического нагружения в упругих телах действуют различные напряжения и деформации (рис. 1.2).

При нагружении вязких тел для описания изменения деформации во времени служит тензор скорости деформации D (в с^{-1}), компоненты которого состоят из производных по времени составляющих тензора деформации:

$$D = \dot{e}_{ij} = \begin{vmatrix} \dot{\epsilon}_{xx} & \frac{1}{2} \dot{\gamma}_{xy} & \frac{1}{2} \dot{\gamma}_{xz} \\ \frac{1}{2} \dot{\gamma}_{yx} & \dot{\epsilon}_{yy} & \frac{1}{2} \dot{\gamma}_{yz} \\ \frac{1}{2} \dot{\gamma}_{zx} & \frac{1}{2} \dot{\gamma}_{zy} & \dot{\epsilon}_{zz} \end{vmatrix} \quad (1.3)$$

Для чисто упругих изотропных тел характерны следующие реологические константы: модуль Юнга, или модуль продольной упругости,

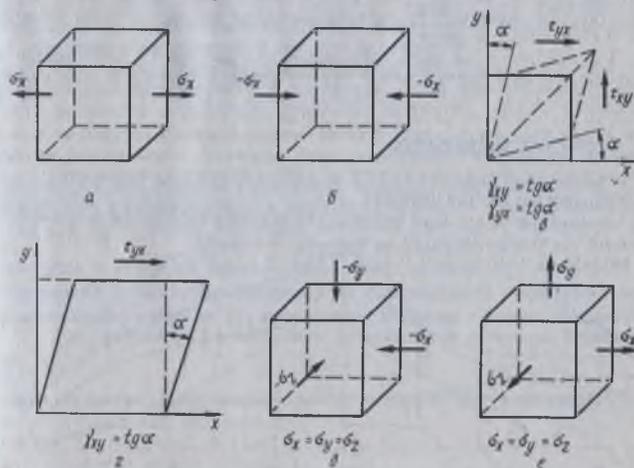


Рис. 1.2. Простейшие виды нагружения:

a — одноосное растяжение; b — одноосное сжатие; v — чистый сдвиг; z — простой сдвиг; d — изотропное сжатие (гидростатическое давление); e — изотропное расширение

E (Па); модуль сдвига G (Па); коэффициент Пуассона μ ; модуль объемной упругости E_v (Па).

Взаимосвязь перечисленных констант определяется следующими соотношениями:

при одноосном растяжении — сжатии:

$$\begin{aligned} e_x &= (1/E) [\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)], \\ e_y &= (1/E) [\sigma_y - \mu(\sigma_x + \sigma_z)], \\ e_z &= (1/E) [\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y)]; \end{aligned} \quad (1.4)$$

при простом сдвиге:

$$\begin{aligned} \gamma_{xy} &= \tau_{xy}/G = 2(1+\mu) \tau_{xy}/E, \\ \gamma_{yz} &= \tau_{yz}/G = 2(1+\mu) \tau_{yz}/E, \\ \gamma_{zx} &= \tau_{zx}/G = 2(1+\mu) \tau_{zx}/E. \end{aligned} \quad (1.5)$$

Из теории упругости известно, что по двум константам можно вычислить остальные:

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} = \frac{3EE_v}{9E_v - E} = \frac{3E_v(1-2\mu)}{2(1+\mu)}; \quad (1.6)$$

$$E_v = \frac{E}{3(1-2\mu)} = \frac{EG}{9G - 3E} = G \frac{2(1+\mu)}{3(1+2\mu)}; \quad (1.7)$$

$$E = \frac{9GE_v}{3E_v + G} = 2G(1+\mu) = 3E_v(1-2\mu); \quad (1.8)$$

$$\mu = \frac{E - 2G}{2G} = \frac{1 - E/(3E_v)}{2} = \frac{3E_v - 2G}{2(3E_v + G)}. \quad (1.9)$$

1.3. СВОЙСТВА ЖИДКОСТЕЙ

К жидкостям относятся такие вещества, у которых при постоянном напряжении сдвига наблюдается течение, т. е. деформация с постоянной или переменной скоростью. Свойства жидкостей проявляются и у пластичных тел после превышения предела текучести.

Например, при простом сдвиге ньютоновской жидкости с напряжением τ возникает деформация с определенной скоростью $\dot{\gamma}$. Отношение напряжения сдвига к скорости деформации $\tau/\dot{\gamma}$ является реологической константой жидкости и называется ньютоновской вязкостью η :

$$\eta = \tau/\dot{\gamma}. \quad (1.10)$$

Реологическое уравнение состояния ньютоновской жидкости имеет вид

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

Основным свойством жидкостей является вязкость. Для ньютоновских жидкостей вязкость — функция скорости сдвига, поэтому ее называют «кажущейся», или эффективной, вязкостью $\eta_{эф}$ (Па·с). Она достаточно полно характеризует поведение текучего материала, если

известна во всем интересующем исследователя диапазоне скорости сдвига.

Инструментальное определение эффективной вязкости предусматривает измерение пар значений $[\tau; \dot{\gamma}]$ в обширной области $\dot{\gamma}$ для изображения кривой течения и функции вязкости.

Для характеристики жидкостей используют кривые течения — реограммы, которые представляют собой зависимость напряжения сдвига от скорости сдвиговой деформации в условиях простого сдвига.

Реограмма ньютоновских жидкостей представляет собой прямую линию 1 (рис. 1.3), проходящую через начало координат. Все кривые течения (2—5), которые отклоняются от прямой линии, соответствуют неньютоновским жидкостям. При этом кривая 2 показывает дилатантное течение, характерное в основном для концентрированных дисперсных систем, при котором с увеличением скорости деформации наступает «затруднение сдвига» (при высокой концентрации дисперсной фазы вследствие образования пространственной структуры возникает предел текучести); кривая 3 показывает псевдопластичное течение, что характерно для «сдвигового размягчения» вследствие разрушения структуры с увеличением скорости деформации; кривая 4 показывает нелинейное пластичное течение, характерное для большинства пластичных тел. Линейный участок кривой 5 характерен для бингамовских тел и соответствует идеальному пластичному течению.

Математическое описание поведения жидкости является предпосылкой для инженерного расчета процесса течения. Для ньютоновских жидкостей применяются модели, которые достаточно точно описывают их поведение в интересующей области напряжения (табл. 1.4).

Модели неньютоновских жидкостей содержат по крайней мере две реологические характеристики материала. Если неньютоновские жидкости исследуют в широком диапазоне скоростей сдвига, начиная с $\dot{\gamma} \approx 0$, то получают полные кривые течения (рис. 1.4, а). При малых скоростях сдвига такая жидкость имеет постоянную начальную вязкость η_0 . С повышением скорости сдвига происходит постепенное разрушение структуры и достигается постоянная конечная вязкость η_{∞} . Модели полных кривых течения приведены в табл. 1.5.

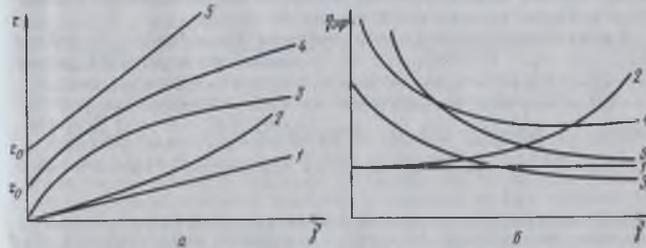


Рис. 1.3. Неполные кривые течения (а) и функции вязкости (б): 1 — ньютоновской жидкости; 2 — дилатантной жидкости; 3 — структурно-вязкой жидкости; 4 — нелинейного пластичного тела; 5 — линейного пластичного тела

E (Па); модуль сдвига G (Па); коэффициент Пуассона μ ; модуль объемной упругости E_v (Па).

Взаимосвязь перечисленных констант определяется следующими соотношениями:

при одноосном растяжении — сжатии:

$$\begin{aligned} e_x &= (1/E) [\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)], \\ e_y &= (1/E) [\sigma_y - \mu(\sigma_x + \sigma_z)], \\ e_z &= (1/E) [\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y)]; \end{aligned} \quad (1.4)$$

при простом сдвиге:

$$\begin{aligned} \gamma_{xy} &= \tau_{xy}/G = 2(1+\mu) \tau_{xy}/E, \\ \gamma_{yz} &= \tau_{yz}/G = 2(1+\mu) \tau_{yz}/E, \\ \gamma_{zx} &= \tau_{zx}/G = 2(1+\mu) \tau_{zx}/E. \end{aligned} \quad (1.5)$$

Из теории упругости известно, что по двум константам можно вычислить остальные:

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} = \frac{3EE_v}{9E_v - E} = \frac{3E_v(1-2\mu)}{2(1+\mu)}; \quad (1.6)$$

$$E_v = \frac{E}{3(1-2\mu)} = \frac{EG}{9G - 3E} = G \frac{2(1+\mu)}{3(1+2\mu)}; \quad (1.7)$$

$$E = \frac{9GE_v}{3E_v + G} = 2G(1+\mu) = 3E_v(1-2\mu); \quad (1.8)$$

$$\mu = \frac{E-2G}{2G} = \frac{1-E/(3E_v)}{2} = \frac{3E_v - 2G}{2(3E_v + G)}. \quad (1.9)$$

1.3. СВОЙСТВА ЖИДКОСТЕЙ

К жидкостям относятся такие вещества, у которых при постоянном напряжении сдвига наблюдается течение, т. е. деформация с постоянной или переменной скоростью. Свойства жидкостей проявляются и у пластичных тел после превышения предела текучести.

Например, при простом сдвиге ньютоновской жидкости с напряжением τ возникает деформация с определенной скоростью $\dot{\gamma}$. Отношение напряжения сдвига к скорости деформации $\tau/\dot{\gamma}$ является реологической константой жидкости и называется ньютоновской вязкостью η :

$$\eta = \tau/\dot{\gamma}. \quad (1.10)$$

Реологическое уравнение состояния ньютоновской жидкости имеет вид

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

Основным свойством жидкостей является вязкость. Для ньютоновских жидкостей вязкость — функция скорости сдвига, поэтому ее называют «кажущейся», или эффективной, вязкостью $\eta_{эф}$ (Па·с). Она достаточно полно характеризует поведение текучего материала, если

известна во всем интересующем исследователя диапазоне скорости сдвига.

Инструментальное определение эффективной вязкости предусматривает измерение пар значений $[\tau; \dot{\gamma}]$ в обширной области $\dot{\gamma}$ для изображения кривой течения и функции вязкости.

Для характеристики жидкостей используют кривые течения — реограммы, которые представляют собой зависимость напряжения сдвига от скорости сдвиговой деформации в условиях простого сдвига.

Реограмма ньютоновских жидкостей представляет собой прямую линию 1 (рис. 1.3), проходящую через начало координат. Все кривые течения (2—5), которые отклоняются от прямой линии, соответствуют неньютоновским жидкостям. При этом кривая 2 показывает дилатантное течение, характерное в основном для концентрированных дисперсных систем, при котором с увеличением скорости деформации наступает «затруднение сдвига» (при высокой концентрации дисперсной фазы вследствие образования пространственной структуры возникает предел текучести); кривая 3 показывает псевдопластичное течение, что характерно для «сдвигового размягчения» вследствие разрушения структуры с увеличением скорости деформации; кривая 4 показывает нелинейное пластичное течение, характерное для большинства пластичных тел. Линейный участок кривой 5 характерен для бингамовских тел и соответствует идеальному пластичному течению.

Математическое описание поведения жидкости является предпосылкой для инженерного расчета процесса течения. Для ньютоновских жидкостей применяются модели, которые достаточно точно описывают их поведение в интересующей области напряжения (табл. 1.4).

Модели неньютоновских жидкостей содержат по крайней мере две реологические характеристики материала. Если неньютоновские жидкости исследуют в широком диапазоне скоростей сдвига, начиная с $\dot{\gamma} \approx 0$, то получают полные кривые течения (рис. 1.4, а). При малых скоростях сдвига такая жидкость имеет постоянную начальную вязкость η_0 . С повышением скорости сдвига происходит постепенное разрушение структуры и достигается постоянная конечная вязкость η_∞ . Модели полных кривых течения приведены в табл. 1.5.

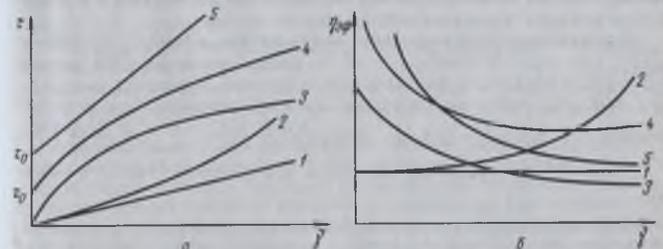


Рис. 1.3. Неполные кривые течения (а) и функции вязкости (б): 1 — ньютоновской жидкости; 2 — дилатантной жидкости; 3 — структурно-вязкой жидкости; 4 — нелинейного пластичного тела; 5 — линейного пластичного тела

1.4. Реологические модели неполных кривых течения

Автор модели	Уравнение состояния	Скорость сдвига	Функция вязкости
Ньютон	$\tau = \eta \dot{\gamma}$	$\dot{\gamma} = \tau / \eta$	$\eta = \tau / \dot{\gamma}$
Ферри	$\tau = \frac{\eta_0}{1 + c\tau} \dot{\gamma}$	$\dot{\gamma} = \frac{\tau(1+c)}{\eta_0}$	$\eta_{эф} = \frac{\eta_0}{1+c\tau}$
Штейнер	$\tau = \frac{1}{c + A\tau^2} \dot{\gamma}$	$\dot{\gamma} = \tau(c + A\tau^2)$	$\eta_{эф} = \frac{1}{c + A\tau^2}$
Хавен	$\tau = \frac{\eta_0}{1 + c\tau^n} \dot{\gamma}$	$\dot{\gamma} = \frac{\tau(1+c\tau^n)}{\eta_0}$	$\eta_{эф} = \frac{\eta_0}{1+c\tau^n}$
Оствальд	$\tau = K\dot{\gamma}^n$	$\dot{\gamma} = (\frac{\tau}{K})^{1/n}$	$\eta_{эф} = K\dot{\gamma}^{n-1}$
Эллис	$\tau = (\eta_0 + K\dot{\gamma}^{n-1})\dot{\gamma}$	$\dot{\gamma} = \frac{\tau}{\eta_0 + K\dot{\gamma}^{n-1}}$	$\eta_{эф} = \eta_0 + K\dot{\gamma}^{n-1}$
Сиско	$\tau = \eta_\infty \dot{\gamma} + b\dot{\gamma}^n$	$\dot{\gamma} = \frac{\tau}{\eta_\infty + b\dot{\gamma}^{n-1}}$	$\eta_{эф} = \eta_\infty + b\dot{\gamma}^{n-1}$
Бингам	$\tau = \tau_0 + \eta_{пл} \dot{\gamma}$	$\dot{\gamma} = \frac{\tau - \tau_0}{\eta_{пл}}$	$\eta_{эф} = \eta_{пл} + \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}}$
Кэссон	$\tau^{1/2} = \tau_K^{1/2} + (\eta_K \dot{\gamma})^{1/2}$	$\dot{\gamma} = \frac{(\tau^{1/2} - \tau_K^{1/2})^2}{\eta_K}$	$\eta_{эф} = \eta_K + \frac{\tau_K}{\dot{\gamma}} + 2 \left(\frac{\tau_K \eta_K}{\dot{\gamma}} \right)^{1/2}$
Хейнц	$\tau^{2/3} = \tau_K^{2/3} + (\eta_K \dot{\gamma})^{2/3}$	$\dot{\gamma} = \frac{(\tau^{2/3} - \tau_K^{2/3})^{3/2}}{\eta_K}$	$\eta_{эф} = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$
Кэссон (обобщенная модель)	$\tau^{1/n} = \tau_0^{1/n} + (\eta_n \dot{\gamma})^{1/n}$	$\dot{\gamma} = \frac{(\tau^{1/n} - \tau_0^{1/n})^n}{\eta_n}$	$\eta_{эф} = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$
Гершель — Балкли	$\tau = \tau_0 + (\eta_{пл} \dot{\gamma})^{n_1}$	$\dot{\gamma} = \frac{(\tau - \tau_0)^{1/n_1}}{\eta_{пл}}$	$\eta_{эф} = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$
Вильямс	$\tau = \frac{A\dot{\gamma}}{B + \dot{\gamma}} + \eta_\infty \dot{\gamma}$	$\dot{\gamma} = \frac{\tau}{A/(B + \dot{\gamma}) + \eta_\infty}$	$\eta_{эф} = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$

Обозначения входящих в формулы величин: τ — напряжение сдвига; τ_0 — предельное напряжение сдвига; $\dot{\gamma}$ — скорость сдвига; η — ньютоновская вязкость; $\eta_{эф}$ — эффективная вязкость; η_0 — начальная вязкость неразрушенной структуры; η_∞ — вязкость предельно разрушенной структуры; $\eta_{пл}$ — пластичная (бингамовская) вязкость; τ_K, η_K — предельное напряжение сдвига и вязкость по Кэссону; τ_0, η_K — то же, по Хейнцу; n — индекс течения; n_1 — то же, по Гершелю — Балкли; K — коэффициент консистенции; A, b, c, m — эмпирические коэффициенты.

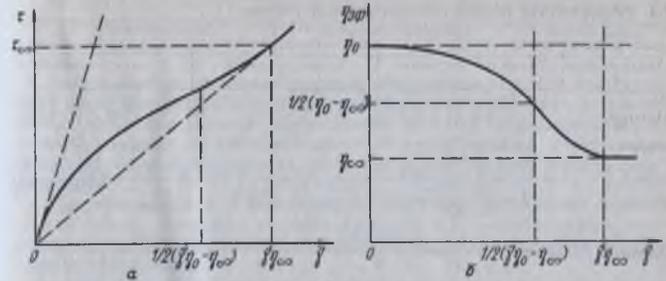


Рис. 1.4. Полная кривая течения структурно-вязкой жидкости с постоянной начальной вязкостью η_0 и постоянной конечной вязкостью η_∞ (а) и функция вязкости полной кривой течения (б)

Таким образом, эффективная вязкость неньютоновских жидкостей состоит из двух компонентов:

1 — ньютоновской вязкости η_∞ , которая основана на внутреннем трении жидкости и представляет физическую константу материала;

2 — структурного сопротивления $\eta_{эф}(\dot{\gamma}) - \eta_\infty$, которое зависит от структурного состояния дисперсных систем и является функцией скорости сдвига $\dot{\gamma}$.

Степень разрушения структуры α может быть описана [2] уравнением

$$\alpha = \frac{\eta_0 - \eta_{эф}(\dot{\gamma})}{\eta_0 - \eta_\infty} \quad (1.12)$$

Следовательно, эффективная вязкость является реологической характеристикой, которая учитывает внутреннее трение и структурно-динамическую равновесную компоненту. В диапазоне $\eta_0 \geq \eta_{эф} \geq \eta_\infty$ разрушение и восстановление структуры при определенной скорости сдвига $\dot{\gamma}$ находятся в равновесном состоянии. При изменении скорости сдвига система без промедления переходит в новое структурное состояние и поэтому называется стабильной.

Самая простая и физически обоснованная модель была получена Бингамом для идеального линейного пластичного материала (см. табл. 1.4), у которого τ_0 и $\eta_{пл}$ — константы.

Идеально пластичный материал в практике встречается редко, и предел текучести τ_0 становится только параметром сравнения, если его, как это часто случается, получают с помощью экстраполяции. Экспериментально предел текучести измеряют с помощью особых методов [12].

Для нелинейного пластичного материала часто применяют обобщенный степенной закон Гершеля — Балкли или Кэссона (см. табл. 1.4).

У некоторых неньютоновских жидкостей эффективная вязкость зависит от продолжительности сдвига t :

$$\tau / \dot{\gamma} = \eta(\dot{\gamma}, t) = \eta_{эф}(t) \quad (1.13)$$

1.5. Реологические модели полной кривой течения

Автор модели	Уравнение состояния	Скорость сдвига
Метер	$\tau = \eta_0 \left[\frac{1 + (\tau/\tau_m)^{A-1} (\eta_\infty/\eta_0)}{1 + (\tau/\tau_m)^{A-1}} \right] \dot{\gamma}$	$\dot{\gamma} = \frac{\tau [1 + (\tau/\tau_m)^{A-1}]}{\eta_0 [1 + (\tau/\tau_m)^{A-1} \eta_\infty/\eta_0]}$
Рейнер	$\tau = \frac{\eta_\infty \dot{\gamma}}{1 - \frac{(\eta_0 - \eta_\infty)}{\eta_0} \exp(-\frac{\tau^2}{\kappa})}$	$\dot{\gamma} = \frac{\tau}{\eta_\infty} \left[1 - \frac{(\eta_0 - \eta_\infty)}{\eta_0} \exp(-\frac{\tau^2}{\kappa}) \right]$
Прандтль—Эйринг	$\tau = \frac{\eta_0 \operatorname{ar sh}(B\dot{\gamma})}{B}$	$\dot{\gamma} = \frac{\tau B}{\eta_0 \operatorname{ar sh}(B\dot{\gamma})}$
Повелл—Эйринг	$\tau = \eta_\infty \dot{\gamma} + \frac{\eta_0 - \eta_\infty}{B} \operatorname{ar sh}(B\dot{\gamma})$	$\dot{\gamma} = \frac{\tau B - (\eta_0 - \eta_\infty) \operatorname{ar sh}(B\dot{\gamma})}{B - \eta_\infty}$
Рейнер — Филиппов (модифицировано Реером)	$\tau = \tau_0 + \frac{\eta_0 - \eta_\infty}{1 + (\tau/\tau_m)^n} + \eta_\infty \dot{\gamma}$	$\dot{\gamma} = \frac{\tau - \tau_0}{\eta_\infty + \frac{\eta_0 - \eta_\infty}{1 + (\tau/\tau_m)^n}}$
Михайлова — Лихтхайм	$\tau = \frac{\tau/\tau_0 (\eta_0 - \eta_\infty)}{\operatorname{sh}(\tau/\tau_0)} \dot{\gamma} + \eta_\infty \dot{\gamma}$	$\dot{\gamma} = \frac{\tau - \tau_0}{\eta_\infty} \frac{\eta_0/\eta_\infty - 1}{1 + (\tau/\tau_m)^n}$
Эллис	$\tau = \frac{\eta_0}{1 + (\tau/\tau_{1/2})^{A-1}} \dot{\gamma}$	$\dot{\gamma} = \frac{\tau [1 + (\tau/\tau_{1/2})^{A-1}]}{\eta_0}$
Пеек — Мак — Леан — Вильямсон	$\tau = (\eta_\infty + \frac{\eta_0 - \eta_\infty}{1 + \tau/\tau_m}) \dot{\gamma}$	$\dot{\gamma} = \frac{\tau}{\eta_\infty + \frac{\eta_0 - \eta_\infty}{1 + \tau/\tau_m}}$
Рейнер — Филиппов	$\tau = \left[\eta_\infty + \frac{\eta_0 - \eta_\infty}{1 + (\tau/\tau_m)^2} \right] \dot{\gamma}$	$\dot{\gamma} = \frac{\tau}{\eta_\infty + \frac{\eta_0 - \eta_\infty}{1 + (\tau/\tau_m)^2}}$

Обозначения входящих в формулы величин: τ — напряжение сдвига; τ_m — среднее напряжение сдвига при $\eta_{эф} = 1/2(\eta_0 + \eta_\infty)$; $\tau_{1/2}$ — то же, при $\eta_\infty \ll \eta_0$; $\eta_{эф}$ — эффективная вязкость; η_0 — начальная вязкость неразрушенной структуры; η_∞ — вязкость предельно разрушенной структуры; $\dot{\gamma}$ — скорость сдвига; λ — коэффициент структурной вязкости, определяемый по формуле $(\eta - \eta_\infty)/(d\eta/d\dot{\gamma}^2)$, где η — текущая вязкость; η_0 — начальная текучесть; A, B, n, m — эмпирические коэффициенты.

При этом речь идет о дисперсной системе со структурой, которая изменяется при сдвиговом нагружении и достигает динамического равновесия с некоторым запаздыванием. Структурно-кинетическое поведение проявляется особенно ярко при скачкообразном изменении скорости сдвига. Если при повышении скорости сдвига наступает замедленное по времени уменьшение эффективной вязкости, речь идет о тиксотропном поведении. Дисперсная система этого вида называется тиксотропной жидкостью.

Если при повышении скорости сдвига наступает замедленное по времени повышение эффективной вязкости, речь идет о реопексивном поведении. Дисперсная система этого вида называется реопексивной жидкостью.

Тиксотропию и реопексию считают обратимыми только в том случае, если после прекращения сдвигового нагружения постепенно устанавливается начальное значение эффективной вязкости. Если, напротив, начальное значение эффективной вязкости не достигается после прекращения сдвигового нагружения, речь идет о необратимой тиксотропии и реопексии.

При тиксотропном и реопексивном поведении восходящая и нисходящая кривые реограммы не совпадают (рис. 1.5) — наблюдается гистерезис, проявляющийся особенно ярко при быстром изменении скорости сдвига.

Среди ньютоновских жидкостей особую группу составляют вязкоупругие, простейшее уравнение которых дал Максвелл:

$$\tau + \lambda \frac{d\tau}{dt} = \eta \dot{\gamma}, \quad (1.14)$$

где $\lambda = \eta/G$ — период релаксации.

При наложении деформации, которая затем поддерживается постоянной ($\dot{\gamma} = 0$), напряжение изменяется по закону

$$\tau = \tau_0 \exp(-t/\lambda), \quad (1.15)$$

где τ_0 — начальное напряжение сдвига при $t = 0$. Этот процесс называется релаксацией напряжений (рис. 1.6, а).

Реологические уравнения состояния более сложных вязкоупругих жидкостей содержат производные напряжения и деформации более высокого порядка, например уравнение Олдройда:

$$\tau + \lambda_1 \dot{\tau} = \eta_0 (\dot{\gamma} + \lambda_2 \ddot{\gamma}). \quad (1.16)$$

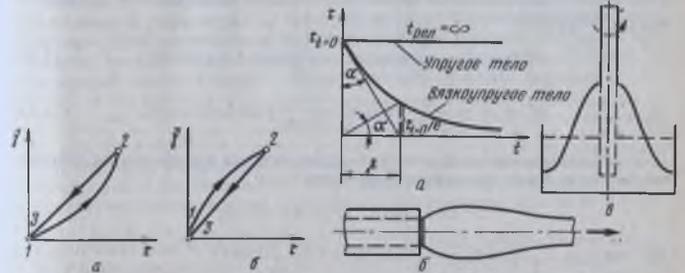


Рис. 1.5. Эффект гистерезиса кривой течения жидкостей, свойства которых зависят от времени сдвига: а — тиксотропная жидкость; б — реопексивная жидкость

Рис. 1.6. Важнейшие эффекты вязкоупругих жидкостей: а — релаксация напряжений; б — разбухание жгута (эффект Баруса); в — эффект Вайсенберга

E (Па); модуль сдвига G (Па); коэффициент Пуассона μ ; модуль объемной упругости E_v (Па).

Взаимосвязь перечисленных констант определяется следующими соотношениями:

при одноосном растяжении — сжатии:

$$\begin{aligned} e_x &= (1/E) [\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)], \\ e_y &= (1/E) [\sigma_y - \mu(\sigma_x + \sigma_z)], \\ e_z &= (1/E) [\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y)]; \end{aligned} \quad (1.4)$$

при простом сдвиге:

$$\begin{aligned} \gamma_{xy} &= \tau_{xy}/G = 2(1 + \mu) \tau_{xy}/E, \\ \gamma_{yz} &= \tau_{yz}/G = 2(1 + \mu) \tau_{yz}/E, \\ \gamma_{zx} &= \tau_{zx}/G = 2(1 + \mu) \tau_{zx}/E. \end{aligned} \quad (1.5)$$

Из теории упругости известно, что по двум константам можно вычислить остальные:

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)} = \frac{3EE_v}{9E_v - E} = \frac{3E_v(1 - 2\mu)}{2(1 + \mu)}; \quad (1.6)$$

$$E_v = \frac{E}{3(1 - 2\mu)} = \frac{EG}{9G - 3E} = G \frac{2(1 + \mu)}{3(1 + 2\mu)}; \quad (1.7)$$

$$E = \frac{9GE_v}{3E_v + G} = 2G(1 + \mu) = 3E_v(1 - 2\mu); \quad (1.8)$$

$$\mu = \frac{E - 2G}{2G} = \frac{1 - E/(3E_v)}{2} = \frac{3E_v - 2G}{2(3E_v + G)}. \quad (1.9)$$

1.3. СВОЙСТВА ЖИДКОСТЕЙ

К жидкостям относятся такие вещества, у которых при постоянном напряжении сдвига наблюдается течение, т. е. деформация с постоянной или переменной скоростью. Свойства жидкостей проявляются и у пластичных тел после превышения предела текучести.

Например, при простом сдвиге ньютоновской жидкости с напряжением τ возникает деформация с определенной скоростью $\dot{\gamma}$. Отношение напряжения сдвига к скорости деформации $\tau/\dot{\gamma}$ является реологической константой жидкости и называется ньютоновской вязкостью η :

$$\eta = \tau/\dot{\gamma}. \quad (1.10)$$

Реологическое уравнение состояния ньютоновской жидкости имеет вид

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

Основным свойством жидкостей является вязкость. Для ньютоновских жидкостей вязкость — функция скорости сдвига, поэтому ее называют «кажущейся», или эффективной, вязкостью $\eta_{\text{эф}}$ (Па·с). Она достаточно полно характеризует поведение текучего материала, если

известна во всем интересующем исследователя диапазоне скорости сдвига.

Инструментальное определение эффективной вязкости предусматривает измерение пар значений $[\tau; \dot{\gamma}]$ в обширной области $\dot{\gamma}$ для изображения кривой течения и функции вязкости.

Для характеристики жидкостей используют кривые течения — реограммы, которые представляют собой зависимость напряжения сдвига от скорости сдвиговой деформации в условиях простого сдвига.

Реограмма ньютоновских жидкостей представляет собой прямую линию 1 (рис. 1.3), проходящую через начало координат. Все кривые течения (2—5), которые отклоняются от прямой линии, соответствуют неньютоновским жидкостям. При этом кривая 2 показывает дилатантное течение, характерное в основном для концентрированных дисперсных систем, при котором с увеличением скорости деформации наступает «затруднение сдвига» (при высокой концентрации дисперсной фазы вследствие образования пространственной структуры возникает предел текучести); кривая 3 показывает псевдопластичное течение, что характерно для «сдвигового размягчения» вследствие разрушения структуры с увеличением скорости деформации; кривая 4 показывает нелинейное пластичное течение, характерное для большинства пластичных тел. Линейный участок кривой 5 характерен для бингамовских тел и соответствует идеальному пластичному течению.

Математическое описание поведения жидкости является предпосылкой для инженерного расчета процесса течения. Для ньютоновских жидкостей применяются модели, которые достаточно точно описывают их поведение в интересующей области напряжения (табл. 1.4).

Модели неньютоновских жидкостей содержат по крайней мере две реологические характеристики материала. Если неньютоновские жидкости исследуют в широком диапазоне скоростей сдвига, начиная с $\dot{\gamma} \approx 0$, то получают полные кривые течения (рис. 1.4, а). При малых скоростях сдвига такая жидкость имеет постоянную начальную вязкость η_0 . С повышением скорости сдвига происходит постепенное разрушение структуры и достигается постоянная конечная вязкость η_{∞} . Модели полных кривых течения приведены в табл. 1.5.

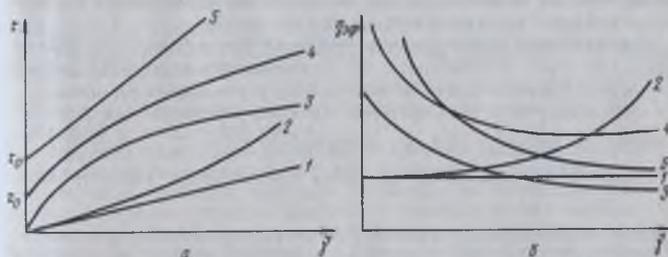


Рис. 1.3. Неполные кривые течения (а) и функции вязкости (б): 1 — ньютоновской жидкости; 2 — дилатантной жидкости; 3 — структурно-вязкой жидкости; 4 — нелинейного пластичного тела; 5 — линейного пластичного тела

E (Па); модуль сдвига G (Па); коэффициент Пуассона μ ; модуль объемной упругости E_v (Па).

Взаимосвязь перечисленных констант определяется следующими соотношениями:

при одноосном растяжении — сжатии:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= (1/E) [\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)], \\ \varepsilon_y &= (1/E) [\sigma_y - \mu(\sigma_x + \sigma_z)], \\ \varepsilon_z &= (1/E) [\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y)]; \end{aligned} \quad (1.4)$$

при простом сдвиге:

$$\begin{aligned} \gamma_{xy} &= \tau_{xy}/G = 2(1+\mu) \tau_{xy}/E, \\ \gamma_{yz} &= \tau_{yz}/G = 2(1+\mu) \tau_{yz}/E, \\ \gamma_{zx} &= \tau_{zx}/G = 2(1+\mu) \tau_{zx}/E. \end{aligned} \quad (1.5)$$

Из теории упругости известно, что по двум константам можно вычислить остальные:

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} = \frac{3EE_v}{9E_v - E} = \frac{3E_v(1-2\mu)}{2(1+\mu)}; \quad (1.6)$$

$$E_v = \frac{E}{3(1-2\mu)} = \frac{EG}{9G - 3E} = G \frac{2(1+\mu)}{3(1+2\mu)}; \quad (1.7)$$

$$E = \frac{9GE_v}{3E_v + G} = 2G(1+\mu) = 3E_v(1-2\mu); \quad (1.8)$$

$$\mu = \frac{E - 2G}{2G} = \frac{1 - E/(3E_v)}{2} = \frac{3E_v - 2G}{2(3E_v + G)}. \quad (1.9)$$

1.3. СВОЙСТВА ЖИДКОСТЕЙ

К жидкостям относятся такие вещества, у которых при постоянном напряжении сдвига наблюдается течение, т. е. деформация с постоянной или переменной скоростью. Свойства жидкостей проявляются и у пластичных тел после превышения предела текучести.

Например, при простом сдвиге ньютоновской жидкости с напряжением τ возникает деформация с определенной скоростью $\dot{\gamma}$. Отношение напряжения сдвига к скорости деформации $\tau/\dot{\gamma}$ является реологической константой жидкости и называется ньютоновской вязкостью η :

$$\eta = \tau/\dot{\gamma}. \quad (1.10)$$

Реологическое уравнение состояния ньютоновской жидкости имеет вид

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

Основным свойством жидкостей является вязкость. Для ньютоновских жидкостей вязкость — функция скорости сдвига, поэтому ее называют «кажущейся», или эффективной, вязкостью $\eta_{эф}$ (Па·с). Она достаточно полно характеризует поведение текучего материала, если

известна во всем интересующем исследователя диапазоне скорости сдвига.

Инструментальное определение эффективной вязкости предусматривает измерение пар значений $[\tau; \dot{\gamma}]$ в обширной области $\dot{\gamma}$ для изображения кривой течения и функции вязкости.

Для характеристики жидкостей используют кривые течения — реограммы, которые представляют собой зависимость напряжения сдвига от скорости сдвиговой деформации в условиях простого сдвига.

Реограмма ньютоновских жидкостей представляет собой прямую линию 1 (рис. 1.3), проходящую через начало координат. Все кривые течения (2—5), которые отклоняются от прямой линии, соответствуют неньютоновским жидкостям. При этом кривая 2 показывает дилатантное течение, характерное в основном для концентрированных дисперсных систем, при котором с увеличением скорости деформации наступает «затруднение сдвига» (при высокой концентрации дисперсной фазы вследствие образования пространственной структуры возникает предел текучести); кривая 3 показывает псевдопластичное течение, что характерно для «сдвигового размягчения» вследствие разрушения структуры с увеличением скорости деформации; кривая 4 показывает нелинейное пластичное течение, характерное для большинства пластичных тел. Линейный участок кривой 5 характерен для бингамовских тел и соответствует идеальному пластичному течению.

Математическое описание поведения жидкости является предпосылкой для инженерного расчета процесса течения. Для ньютоновских жидкостей применяются модели, которые достаточно точно описывают их поведение в интересующей области напряжения (табл. 1.4).

Модели неньютоновских жидкостей содержат по крайней мере две реологические характеристики материала. Если неньютоновские жидкости исследуют в широком диапазоне скоростей сдвига, начиная с $\dot{\gamma} \approx 0$, то получают полные кривые течения (рис. 1.4, а). При малых скоростях сдвига такая жидкость имеет постоянную начальную вязкость η_0 . С повышением скорости сдвига происходит постепенное разрушение структуры и достигается постоянная конечная вязкость η_{∞} . Модели полных кривых течения приведены в табл. 1.5.

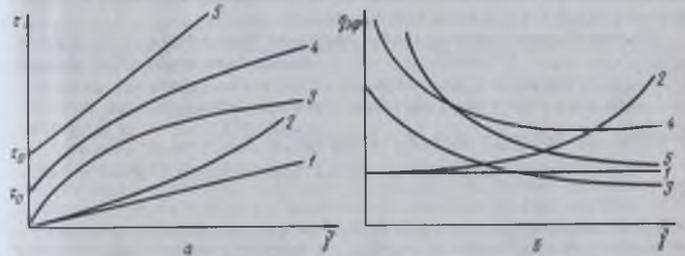


Рис. 1.3. Неполные кривые течения (а) и функции вязкости (б): 1 — ньютоновской жидкости; 2 — дилатантной жидкости; 3 — структурно-вязкой жидкости; 4 — нелинейного пластичного тела; 5 — линейного пластичного тела

1.4. Реологические модели неполных кривых течения

Автор модели	Уравнение состояния	Скорость сдвига	Функция вязкости
Ньютон	$\tau = \eta \dot{\gamma}$	$\dot{\gamma} = \tau / \eta$	$\eta = \tau / \dot{\gamma}$
Ферри	$\tau = \frac{\eta_0}{1 + c\tau} \dot{\gamma}$	$\dot{\gamma} = \frac{\tau(1+c)}{\eta_0}$	$\eta_{эф} = \frac{\eta_0}{1+c\tau}$
Штейнер	$\tau = \frac{1}{c + A\tau^n} \dot{\gamma}$	$\dot{\gamma} = \tau(c + A\tau^n)$	$\eta_{эф} = \frac{1}{c + A\tau^n}$
Хавен	$\tau = \frac{\eta_0}{1 + c\tau^n} \dot{\gamma}$	$\dot{\gamma} = \frac{\tau(1+c\tau^n)}{\eta_0}$	$\eta_{эф} = \frac{\eta_0}{1+c\tau^n}$
Оствальд	$\tau = K\dot{\gamma}^n$	$\dot{\gamma} = (\frac{\tau}{K})^{1/n}$	$\eta_{эф} = K\dot{\gamma}^{n-1}$
Эллис	$\tau = (\eta_0 + K\dot{\gamma}^{n-1})\dot{\gamma}$	$\dot{\gamma} = \frac{\tau}{\eta_0 + K\dot{\gamma}^{n-1}}$	$\eta_{эф} = \eta_0 + K\dot{\gamma}^{n-1}$
Сиско	$\tau = \eta_\infty \dot{\gamma} + b\dot{\gamma}^n$	$\dot{\gamma} = \frac{\tau}{\eta_\infty + b\dot{\gamma}^{n-1}}$	$\eta_{эф} = \eta_\infty + b\dot{\gamma}^{n-1}$
Бингам	$\tau = \tau_0 + \eta_{пл}\dot{\gamma}$	$\dot{\gamma} = \frac{\tau - \tau_0}{\eta_{пл}}$	$\eta_{эф} = \eta_{пл} + \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}}$
Кэссон	$\tau^{1/2} = \tau_k^{1/2} + (\eta_k \dot{\gamma})^{1/2}$	$\dot{\gamma} = \frac{(\tau^{1/2} - \tau_k^{1/2})^2}{\eta_k}$	$\eta_{эф} = \eta_k + \frac{\tau_k}{\dot{\gamma}} + 2(\frac{\tau_k \eta_k}{\dot{\gamma}})^{1/2}$
Хейнц	$\tau^{2/3} = \tau_k^{2/3} + (\eta_k \dot{\gamma})^{2/3}$	$\dot{\gamma} = \frac{(\tau^{2/3} - \tau_k^{2/3})^{3/2}}{\eta_k}$	$\eta_{эф} = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$
Кэссон (обобщенная модель)	$\tau^{1/n} = \tau_0^{1/n} + (\eta_n \dot{\gamma})^{1/n}$	$\dot{\gamma} = \frac{(\tau^{1/n} - \tau_0^{1/n})^n}{\eta_n}$	$\eta_{эф} = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$
Гершель — Балкли	$\tau = \tau_0 + (\eta_{пл}\dot{\gamma})^{n_1}$	$\dot{\gamma} = \frac{(\tau - \tau_0)^{1/n_1}}{\eta_{пл}}$	$\eta_{эф} = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$
Вильямс	$\tau = \frac{A\dot{\gamma}}{B + \dot{\gamma}} + \eta_\infty \dot{\gamma}$	$\dot{\gamma} = \frac{\tau}{A/(B + \dot{\gamma}) + \eta_\infty}$	$\eta_{эф} = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$

Обозначения входящих в формулы величин: τ — напряжение сдвига; τ_0 — предельное напряжение сдвига; $\dot{\gamma}$ — скорость сдвига; η — ньютоновская вязкость; $\eta_{эф}$ — эффективная вязкость; η_0 — начальная вязкость неразрушенной структуры; η_∞ — вязкость предельно разрушенной структуры; $\eta_{пл}$ — пластичная (бингамовская) вязкость; τ_k, η_k — предельное напряжение сдвига и вязкость по Кэссону; τ_k, η_k — то же, по Хейнцу; n — индекс течения; n_1 — то же, по Гершелю — Балкли; K — коэффициент консистенции; A, b, c, m — эмпирические коэффициенты.

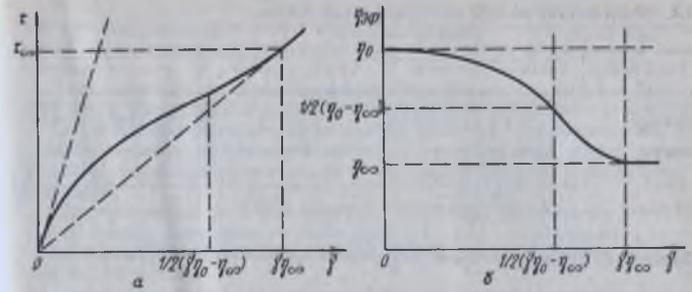


Рис. 1.4. Полная кривая течения структурно-вязкой жидкости с постоянной начальной вязкостью η_0 и постоянной конечной вязкостью η_∞ (а) и функция вязкости полной кривой течения (б)

Таким образом, эффективная вязкость неньютоновских жидкостей состоит из двух компонентов:

1 — ньютоновской вязкости η_∞ , которая основана на внутреннем трении жидкости и представляет физическую константу материала;

2 — структурного сопротивления $\eta_{эф}(\dot{\gamma}) - \eta_\infty$, которое зависит от структурного состояния дисперсных систем и является функцией скорости сдвига $\dot{\gamma}$.

Степень разрушения структуры α может быть описана [2] уравнением

$$\alpha = \frac{\eta_0 - \eta_{эф}(\dot{\gamma})}{\eta_0 - \eta_\infty} \quad (1.12)$$

Следовательно, эффективная вязкость является реологической характеристикой, которая учитывает внутреннее трение и структурно-динамическую равновесную компоненту. В диапазоне $\eta_0 \geq \eta_{эф} \geq \eta_\infty$ разрушение и восстановление структуры при определенной скорости сдвига $\dot{\gamma}$ находятся в равновесном состоянии. При изменении скорости сдвига система без промедления переходит в новое структурное состояние и поэтому называется стабильной.

Самая простая и физически обоснованная модель была получена Бингамом для идеального линейного пластичного материала (см. табл. 1.4), у которого τ_0 и $\eta_{пл}$ — константы.

Идеально пластичный материал в практике встречается редко, и предел текучести τ_0 становится только параметром сравнения, если его, как это часто случается, получают с помощью экстраполяции. Экспериментально предел текучести измеряют с помощью особых методов [12].

Для нелинейного пластичного материала часто применяют обобщенный степенной закон Гершеля — Балкли или Кэссона (см. табл. 1.4).

У некоторых неньютоновских жидкостей эффективная вязкость зависит от продолжительности сдвига t :

$$\tau / \dot{\gamma} = \eta(\dot{\gamma}, t) = \eta_{эф}(t) \quad (1.13)$$

1.5. Реологические модели полной кривой течения

Автор модели	Уравнение состояния	Скорость сдвига
Метер	$\tau = \eta_0 \left[\frac{1 + (\tau/\tau_m)^{A-1} (\eta_0/\eta_\infty)}{1 + (\tau/\tau_m)^{A-1}} \right] \dot{\gamma}$	$\dot{\gamma} = \frac{\tau [1 + (\tau/\tau_m)^{A-1}]}{\eta_0 [1 + (\tau/\tau_m)^{A-1} (\eta_\infty/\eta_0)]}$
Рейнер	$\tau = \frac{\eta_0 \dot{\gamma}}{1 - \frac{(\eta_0 - \eta_\infty)}{\eta_0} \exp(-\frac{\tau^2}{\kappa})}$	$\dot{\gamma} = \frac{\tau}{\eta_\infty} \left[1 - \frac{(\eta_0 - \eta_\infty)}{\eta_0} \exp(-\frac{\tau^2}{\kappa}) \right]$
Прандтль—Эйринг	$\tau = \frac{\eta_0 \operatorname{ar sh}(B\dot{\gamma})}{B}$	$\dot{\gamma} = \frac{\tau B \dot{\gamma}}{\eta_0 \operatorname{ar sh}(B\dot{\gamma})}$
Повелл—Эйринг	$\tau = \eta_\infty \dot{\gamma} + \frac{\eta_0 - \eta_\infty}{B} \operatorname{ar sh}(B\dot{\gamma})$	$\dot{\gamma} = \frac{\tau B - (\eta_0 - \eta_\infty) \operatorname{ar sh}(B\dot{\gamma})}{B - \eta_\infty}$
Рейнер — Филиппов (модифицировано Реером)	$\tau = \tau_0 + \frac{\eta_0 - \eta_\infty}{1 + (\tau/\tau_m)^n} + \eta_\infty \dot{\gamma}$	$\dot{\gamma} = \frac{\tau - \tau_0}{\eta_\infty + \frac{\eta_0 - \eta_\infty}{1 + (\tau/\tau_m)^n}}$
Михайлова — Лихтхайм	$\tau = \frac{\tau/\tau_0 (\eta_0 - \eta_\infty)}{\operatorname{sh}(\tau/\tau_0)} \dot{\gamma} + \eta_\infty \dot{\gamma}$	$\dot{\gamma} = \frac{\tau - \tau_0}{\eta_\infty} - \frac{\eta_0/\eta_\infty - 1}{1 + (\tau/\tau_m)^n}$
Эллис	$\tau = \frac{\eta_0}{1 + (\tau/\tau_{1/2})^{A-1}} \dot{\gamma}$	$\dot{\gamma} = \frac{\tau [1 + (\tau/\tau_{1/2})^{A-1}]}{\eta_0}$
Пеек — Мак — Леан — Вильямсон	$\tau = (\eta_\infty + \frac{\eta_0 - \eta_\infty}{1 + \tau/\tau_m}) \dot{\gamma}$	$\dot{\gamma} = \frac{\tau}{\eta_\infty + \frac{\eta_0 - \eta_\infty}{1 + \tau/\tau_m}}$
Рейнер — Филиппов	$\tau = \left[\eta_\infty + \frac{\eta_0 - \eta_\infty}{1 + (\tau/\tau_m)^2} \right] \dot{\gamma}$	$\dot{\gamma} = \frac{\tau}{\eta_\infty + \frac{\eta_0 - \eta_\infty}{1 + (\tau/\tau_m)^2}}$

Обозначения входящих в формулы величин: τ — напряжение сдвига; τ_m — среднее напряжение сдвига при $\eta_{2\dot{\gamma}} = 1/2(\eta_0 + \eta_\infty)$; $\tau_{1/2}$ — то же, при $\eta_\infty \ll \eta_0$; η_0 — эффективная вязкость; η_∞ — начальная вязкость неразрушенной структуры; η_∞ — вязкость предельно разрушенной структуры; $\dot{\gamma}$ — скорость сдвига; λ — коэффициент структурной вязкости, определяемый по формуле $(\eta - \eta_0)/(d\eta/d\dot{\gamma}^2)$, где η — текучесть; η_0 — начальная текучесть; A, B, λ, m — эмпирические коэффициенты.

При этом речь идет о дисперсной системе со структурой, которая изменяется при сдвиговом нагружении и достигает динамического равновесия с некоторым запаздыванием. Структурно-кинетическое поведение проявляется особенно ярко при скачкообразном изменении скорости сдвига. Если при повышении скорости сдвига наступает замедленное по времени уменьшение эффективной вязкости, речь идет о тиксотропном поведении. Дисперсная система этого вида называется тиксотропной жидкостью.

Если при повышении скорости сдвига наступает замедленное по времени повышение эффективной вязкости, речь идет о реопексивном поведении. Дисперсная система этого вида называется реопексивной жидкостью.

Тиксотропию и реопексию считают обратимыми только в том случае, если после прекращения сдвигового нагружения постепенно устанавливается начальное значение эффективной вязкости. Если, напротив, начальное значение эффективной вязкости не достигается после прекращения сдвигового нагружения, речь идет о необратимой тиксотропии и реопексии.

При тиксотропном и реопексивном поведении восходящая и нисходящая кривые реограммы не совпадают (рис. 1.5) — наблюдается гистерезис, проявляющийся особенно ярко при быстром изменении скорости сдвига.

Среди неньютоновских жидкостей особую группу составляют вязкоупругие, простейшее уравнение состояния которых дал Максвелл:

$$\tau + \lambda \frac{d\tau}{dt} = \eta \dot{\gamma}, \quad (1.14)$$

где $\lambda = \eta/G$ — период релаксации.

При наложении деформации, которая затем поддерживается постоянной ($\dot{\gamma} = 0$), напряжение изменяется по закону

$$\tau = \tau_0 \exp(-t/\lambda), \quad (1.15)$$

где τ_0 — начальное напряжение сдвига при $t = 0$. Этот процесс называется релаксацией напряжений (рис. 1.6, а).

Реологические уравнения состояния более сложных вязкоупругих жидкостей содержат производные напряжения и деформации более высокого порядка, например уравнение Олдройда:

$$\tau + \lambda_1 \dot{\tau} = \eta_0 (\dot{\gamma} + \lambda_2 \ddot{\gamma}). \quad (1.16)$$

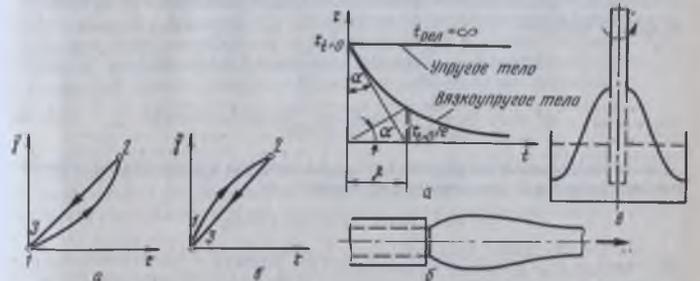


Рис. 1.5. Эффект гистерезиса кривой течения жидкостей, свойства которых зависят от времени сдвига: а — тиксотропная жидкость; б — реопексивная жидкость

Рис. 1.6. Важнейшие эффекты вязкоупругих жидкостей: а — релаксация напряжений; б — разбухание жгута (эффект Баруса); в — эффект Вайсенберга

При течении вязкоупругих жидкостей наблюдается ряд эффектов, которые обусловлены напряженным состоянием сдвигового течения, в корне отличным от наблюдаемого в ньютоновской жидкости. Например, разбухание струи при истечении из трубы или капилляра (эффект Баруса, рис. 1.6, б), подъем жидкости по стержню, вращающемуся в сосуде с жидкостью (эффект Вайсенберга, рис. 1.6, в).

При нагружении вязкоупругой жидкости динамической нагрузкой, изменяющейся по синусоидальному закону, напряжение и деформация также имеют синусоидальный характер. Например, если закон изменения напряжения в комплексной форме имеет вид

$$\tau = \tau_0 \exp(i\omega t), \quad (1.17)$$

где τ_0 — амплитудное значение напряжения сдвига; ω — частота; t — время, то возникающая при этом деформация сдвига в общем случае отстает по фазе от напряжения на угол δ . Эта зависимость описывается уравнением

$$\gamma = \gamma_0 \exp[i(\omega t - \delta)], \quad (1.18)$$

где γ_0 — амплитудное значение деформации сдвига, причем у линейной вязкоупругой жидкости амплитуда деформации пропорциональна амплитуде напряжения.

Закон изменения скорости деформации в комплексной форме имеет вид

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} = i\omega\gamma_0 \exp[i(\omega t - \delta)] = \dot{\gamma}_0 \exp[i(\omega t - (\delta - \pi/2))], \quad (1.19)$$

где $\dot{\gamma}_0 = \gamma_0\omega$ — амплитудное значение скорости деформации.

Отношение напряжения сдвига τ к скорости деформации $\dot{\gamma}$ называют комплексным динамическим модулем сдвига G^* , а отношение τ к $\dot{\gamma}$ — комплексной динамической вязкостью η^* . Они описываются уравнениями соответственно

$$G^* = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}_0} \exp(i\delta) = \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}_0} (\cos \delta + i \sin \delta), \quad (1.20)$$

$$\eta^* = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \frac{\tau_0}{i\dot{\gamma}_0\omega} \exp(i\delta) = \frac{\tau_0}{\omega\dot{\gamma}_0} (\sin \delta - i \cos \delta). \quad (1.21)$$

Каждая из величин может быть представлена в виде суммы действительной и мнимой компонент, например:

$$G^* = G' + iG'' \quad \text{и} \quad \eta^* = \eta' - i\eta'', \quad (1.22)$$

где

$$G' = \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}_0} \cos \delta; \quad G'' = \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}_0} \sin \delta; \quad (1.23)$$

$$\eta' = \frac{G''}{\omega} = \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}_0\omega} \sin \delta; \quad \eta'' = \frac{-G'}{\omega} = -\frac{\tau_0}{\dot{\gamma}_0\omega} \cos \delta. \quad (1.24)$$

Таким образом, существуют две характеристики материала, зависящие от частоты, — отношение амплитудных значений напряжения и

деформации ($\tau_0/\dot{\gamma}_0$) и фазовый угол δ . Первая из этих величин представляет собой абсолютное значение комплексного модуля $|G^*|$, вторая называется углом механических потерь.

Интерес представляют два частных случая: когда $\delta = 0$ и когда $\delta = \pi/2$. В первом случае деформация совпадает по фазе с напряжением, что является характерным для идеально упругого тела; во втором случае скорость деформации сдвига совпадает по фазе с напряжением, что характерно для неньютоновской вязкой жидкости. Во всех промежуточных случаях $0 < \delta < \pi/2$ речь идет о деформации вязкоупругих тел.

1.4. СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Твердые тела в зависимости от упругости бывают гуковскими и негуковскими.

Гуковское тело — это идеально упругое тело, состояние которого описывается уравнением Гука:

$$\tau = G\gamma. \quad (1.25)$$

После снятия нагрузки, отдавая накопленную энергию, гуковское тело без запаздывания возвращается в исходное состояние.

Однако, как и у жидкостей, среди твердых тел встречаются такие, поведение которых не соответствует поведению идеально упругого тела. Такие тела называются негуковскими.

Для негуковского твердого тела с нелинейной упругостью полагают

$$\tau/\gamma = G \neq \text{const}. \quad (1.26)$$

При этом модуль сдвига является функцией деформации, что характерно, например, для пористых пенообразных пищевых материалов.

По аналогии с неньютоновскими жидкостями вводят понятие эффективного модуля упругости $G_{\text{эф}}$, который не представляет собой константу материала. При напряжении, не превышающем предела текучести или прочности твердого тела, соотношение между напряжением сдвига и деформацией можно описать с помощью эмпирической формулы

$$\tau = G_{\text{эф}}\gamma^n. \quad (1.27)$$

Упругое тело этого вида отличается от гуковского тела только тем, что зависимость напряжения от деформации является нелинейной. После снятия напряжения (при разгрузке) деформация мгновенно исчезает.

Для негуковского твердого тела с замедленной деформацией характерно то, что при разгрузке деформация изменяется не мгновенно, а с запаздыванием, т.е. наблюдается упругое последствие. Состояние равновесия достигается через определенное время, а скорость деформации $\dot{\gamma}$ является функцией времени. Диаграмма «напряжение — деформация» подобна реограмме тиксотропной жидкости в состоянии равновесия — при $\dot{\gamma} = 0$.

ВНИМАТЕЛЬНО
Бух. ТШЛ и ЛИ
№ 4/5664

Реологическое состояние простейшего вязкоупругого твердого тела можно описать с помощью закона Кельвина:

$$\tau = G\gamma + \eta\dot{\gamma}. \quad (1.28)$$

Уравнение кинетики деформации получают, интегрируя выражение (1.28):

$$\gamma(t) = \tau/G[1 - \exp(-t/\lambda_t)], \quad (1.29)$$

где $\lambda_t = \eta/G$ — период упругого последействия.

Скорость деформации

$$\dot{\gamma}(t) = \tau/\eta \exp(-t/\lambda_t). \quad (1.30)$$

При $t \rightarrow \infty$, $\dot{\gamma}(t) = 0$ и $\gamma = \text{const}$ достигается состояние равновесия. При разгрузке негуковского тела деформация медленно уменьшается, что может быть описано уравнением

$$\gamma(t) = \tau/G[\exp(-t_1/\lambda_t) - 1] \exp(-t/\lambda_t). \quad (1.31)$$

Сложные вязкоупругие тела, которые обладают упругим последействием и релаксацией, могут быть описаны уравнением Максвелла — Томсона:

$$\tau = G\dot{\gamma} + \lambda_1\ddot{\gamma} - \lambda_2\dot{\tau} - \lambda_3\tau. \quad (1.32)$$

где λ_1 — период упругого последействия (ползучести); λ_2 — период релаксации.

Течение реальных твердых тел наблюдается после превышения критического напряжения — предела текучести. При этом, кроме обратимой упругой деформации, наблюдается остаточная пластичная деформация. При дальнейшем нагружении достигается предел прочности, при превышении которого твердое тело разрушается. Это явление наблюдается в таких процессах, как дробление и резка, и поэтому имеет технологическое значение. Если разрушение происходит без существенного изменения формы, говорят о хрупком разрушении. Если разрушению предшествует значительное изменение формы, говорят о вязком разрушении.

Простейшим случаем пластичного твердого тела является тело Бингама. При нагрузке ниже предела текучести ($\tau < \tau_0$) оно ведет себя как гуковское тело ($\tau = G\gamma$), выше ($\tau \geq \tau_0$) — как жидкость ($\tau = \eta\dot{\gamma} + \tau_0 - \eta/G\dot{\tau}$). Такие деформационные свойства наблюдаются у прессованных дрожжей, картофеля и другого растительного сырья.

Многочисленные реальные твердые тела обладают мгновенной обратимой упругостью и запаздывающей упругостью, а после превышения предела текучести проявляют пластичное течение. Подобный характер деформации обнаружен у пшеничного теста [15]. Ниже предела текучести τ_0 оно ведет себя как тело Максвелла — Томсона согласно уравнению (1.32), а после превышения предела текучести ($\tau \geq \tau_0$) подчиняется следующему закону:

$$\tau = \eta\dot{\gamma} + \lambda_1\ddot{\gamma} - \lambda_2\dot{\tau} - \lambda_3\tau + \tau_0. \quad (1.33)$$

1.5. ОПИСАНИЕ СВОЙСТВ РЕОЛОГИЧЕСКИХ ТЕЛ С ПОМОЩЬЮ МЕХАНИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

При составлении механических моделей исходят из предположения, что деформация сложного тела является результатом наложения деформаций элементарных механических моделей, отражающих основные реологические свойства.

К основным реологическим свойствам, которые наблюдаются у реальных тел, относятся вязкость, упругость и пластичность.

Механической моделью вязкой жидкости является демфер (рис. 1.7, а), или тело Ньютона. Соответствующей математической моделью является реологическое уравнение состояния ньютоновского тела для простого сдвига $\tau = \eta\dot{\gamma}$, а реологической константой — вязкость η .

Модель упругого твердого тела является пружина (рис. 1.7, б), или тело Гука. Соответствующей математической моделью является реологическое уравнение гуковского твердого тела для простого сдвига $\tau = G\gamma$ (для растяжения — сжатия $\sigma = E\varepsilon$), а реологической константой — модуль сдвига G .

Модель идеально пластичного тела изображается в виде пары трения и определяется как тело Сен-Венана (рис. 1.7, в). Оно неподатливо при нагрузке ниже предела текучести, а после его превышения неограниченно деформируется. Предел текучести θ является реологической константой элемента пластичности. Реологические уравнения состояния при $\sigma < \theta_0$ или $\tau_1 < \tau_0$ имеют вид: $\varepsilon_1 = 0$; $\varepsilon_1 = 0$; $\gamma_1 = 0$; $\dot{\gamma}_1 = 0$; при $\sigma_2 \geq \theta_0$ или $\tau_2 \geq \tau_0$ — $\sigma = \theta_0$; $\varepsilon_2 \rightarrow \infty$; $\tau = \tau_0$; $\gamma_2 \rightarrow \infty$; $\dot{\gamma}_2 \rightarrow \infty$.

При изучении структурно-механических свойств пищевых продуктов их испытывают на разрушение, которому предшествуют мгновенные необратимые деформации.

Модель твердого тела, или тело Рэнкина, изображается как пара сцепленных пластин (рис. 1.7, з). Реологическая константа данного элемента — предел прочности $\tau_B(\sigma_B)$. Если при осевом нагружении достичь предела прочности, сцепленные пластины необратимо разъединяются. Для этого тела действительны две области нагружения:

- 1) $\sigma_1 < \sigma_B$; $\varepsilon_1 = 0$; $\dot{\varepsilon}_1 = 0$;
- 2) $\sigma_2 = \sigma_B$; $\varepsilon_2 \rightarrow \infty$; $\dot{\varepsilon}_2 \rightarrow \infty$.

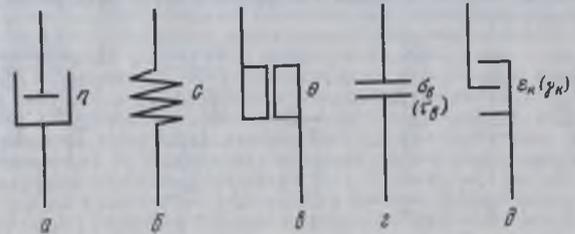


Рис. 1.7. Механические модели, отражающие элементарные реологические свойства: а — тело Ньютона; б — тело Гука; в — тело Сен-Венана; г — тело Рэнкина; д — тело Пелега

Модель твердого тела, учитывающая мгновенную необратимую деформацию, была введена Пелегом [14]. При нагружении тело Пелега (рис. 1.7, д) сначала деформируется в пределах $0 \leq \epsilon \leq \epsilon_k$, а после достижения контакта ($\epsilon = \epsilon_k$) ведет себя как жесткое тело.

При последовательном соединении все тела имеют одинаковое напряжение σ , а их деформации складываются:

$$\sigma = \sigma_i; \epsilon = \sum \epsilon_i.$$

При параллельном соединении все тела деформируются на одинаковую величину ϵ , а общее напряжение модели состоит из напряжений отдельных тел: $\sigma = \sum \sigma_i; \epsilon = \epsilon_i$.

Для элементарных модельных тел справедливо правило сложения производных напряжений и деформаций по времени: $\dot{\sigma} = \sum \dot{\sigma}_i; \dot{\epsilon} = \sum \dot{\epsilon}_i$.

Простейшие реологические модели показаны на рис. 1.8, а их обзор приведен в работе [18].

Деформационное поведение элементарных и сложных модельных тел при одноосном напряженном состоянии может быть описано единым дифференциальным уравнением вида

$$\sigma + A_1 \dot{\sigma} + A_2 \ddot{\sigma} + A_3 \ddot{\sigma} + \dots = B_0 \epsilon + B_1 \dot{\epsilon} + B_2 \ddot{\epsilon} + B_3 \ddot{\epsilon} + \dots + C. \quad (1.34)$$

В левой части этого уравнения находятся напряжение σ и его производные по времени $\dot{\sigma}$, $\ddot{\sigma}$ и $\ddot{\sigma}$, а также константы материала A_1, A_2, A_3, \dots . В правой части — деформация ϵ , ее производные $\dot{\epsilon}$, $\ddot{\epsilon}$ и $\ddot{\epsilon}$, а также константы материала $B_0, B_1, B_2, B_3, \dots$ и коэффициент C . У элементарных модельных тел существует только одна константа, в то время как другие имеют нулевые значения.

Согласно уравнению (1.34) твердыми телами считают такие, которые в структурном дифференциальном уравнении содержат коэффициент B_0 , в то время как коэффициент C равен нулю. Негуковские вязкоупругие твердые тела в соответствующих дифференциальных уравнениях, кроме коэффициента B_0 , содержат еще коэффициенты B_1 и A_1 , причем $C = 0$. Негуковские упругопластичные твердые тела имеют дополнительно коэффициент $C > 0$.

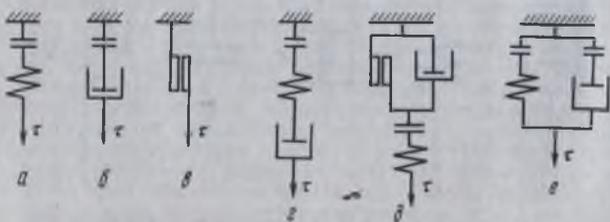


Рис. 1.8. Механические модели с элементом разрушения:
а — тело Гука; б — тело Ньютона; в — тело Сен-Венана; г — тело Максвелла;
д — тело Кельвина; е — тело Бингама

Жидкостями считают все тела, дифференциальные уравнения которых содержат коэффициент B_1 и не содержат коэффициентов B_0 и C . Чисто ньютоновскую жидкость характеризует только коэффициент $B_1 > 0$, неньютоновскую — наличие коэффициентов A_1, A_2, A_3, B_2, B_3 . Неньютоновские жидкости с пределом текучести содержат, кроме того, коэффициент $C > 0$.

1.6. ПРОЧНОСТНЫЕ И КОМПРЕССИОННЫЕ СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

Прочностью называют сопротивление тела действию внешних сил, которые приводят тела к течению или разрушению. У гуковских тел скорость деформации не влияет на предел прочности, так что различий в статической и динамической прочности не существует.

У негуковских тел (к которым принадлежат почти все твердые пищевые продукты), которые обладают как упругими, так и пластичными и вязкими свойствами, прочность зависит от скорости деформации. Минимальной прочностью обладают тела при статическом или квазистатическом нагружении, при котором вязкоупругие напряжения полностью релаксируют. Разрушение наступает только после превышения предела текучести и развития пластичной деформации. Максимальной прочности негуковские тела достигают при крайне высокой скорости нагружения. В этом случае вязкоупругие напряжения практически не релаксируют, предел прочности наступает непосредственно за пределом текучести, пластичная деформация отсутствует, поэтому наблюдается хрупкий излом. На практике нагружение проводят при скорости деформации, которая лежит между этими граничными условиями, так что соответствующая динамическая прочность достигается при скорости выше минимального и ниже максимального значения.

Простейшим видом нагружения для анализа реологического поведения твердых пищевых продуктов является сжатие между двумя плоскопараллельными пластинами на универсальных измерительных приборах («Инстрон», «Цвик», «Кёгель») или пенетрометрах [18]. В первом случае исследуемый образец кольцевого или призматического поперечного сечения с первоначальной площадью A_0 и первоначальной высотой h_0 нагружают с постоянной скоростью v . Возникающую при этом силу сжатия измеряют как функцию высоты пробы $F(h)$.

При использовании пенетрометра образец нагружают с постоянной силой сжатия F , а высоту измеряют как функцию времени $h(t)$.

Для определения реологических констант необходимо рассчитать напряжения и деформации, возникающие при сжатии образца. У хрупких материалов до разрушения наблюдают только малые деформации, описываемые простыми уравнениями (1.4). У множества твердых пищевых продуктов при сжатии наблюдают большие деформации, которые предшествуют разрушению и ведут к существенному изменению величин A_0 и h_0 .

Исследуемый цилиндрический образец первоначальной высотой h_0 и площадью поперечного сечения A_0 нагружают с постоянной скоростью v (рис. 1.9). Обозначим высоту образца, уменьшающуюся при сжатии, как функцию времени $h(t)$; возрастающая при этом площадь попереч-

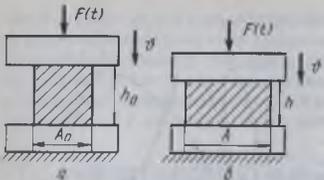


Рис. 1.9. Изменения образца при нагружении на сжатие:
 а — образец перед нагружением, б — образец во время нагружения

ного сечения составляет A . Сжимающая сила, которая измеряется прибором, является функцией относительного сжатия K и растет, как правило, при увеличении деформации.

Относительное сжатие выражают формулой

$$K = \frac{h_0 - h}{h_0} 100\% \quad (1.35)$$

При $v = \text{const}$ высота образца при нагружении изменяется по формуле

$$h = h_0 - vt \quad (1.36)$$

Деформация образца в направлении действия силы определяется по формуле

$$\epsilon = (h_0 - h)/h \quad (1.37)$$

а скорость деформации — по формуле

$$\dot{\epsilon} = v/h = v/(h_0 - vt) \quad (1.38)$$

Поделив числитель и знаменатель выражения (1.38) на h_0 , получают

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_0 / (1 - \dot{\epsilon}_0 t) \quad (1.39)$$

где $\dot{\epsilon}_0$ — начальная скорость деформации.

С использованием регрессионного анализа были найдены [13] общие соотношения изменения поперечного сечения образца при сжатии:

$$\frac{A}{A_0} = b_0 + b_1 \frac{\dot{\epsilon}_0 t}{1 - \dot{\epsilon}_0 t} \quad (1.40)$$

Коэффициенты b_0 и b_1 являются константами материала и должны быть определены экспериментально. Для несжимаемых материалов $b_0 = b_1 = 1$.

Для сжимающего напряжения справедлива формула

$$\sigma(t) = F(t)/A; \quad (1.41)$$

с учетом (1.40)

$$\sigma(t) = \frac{F(t)}{A_0} \left(b_0 + \frac{b_1 \dot{\epsilon}_0 t}{1 - \dot{\epsilon}_0 t} \right)^{-1} \quad (1.42)$$

Реологические параметры материала получают, преобразуя измеряемую прибором сжимающую силу по уравнениям (1.38), (1.41), (1.42). При этом учитывают, что большинство твердых пищевых продуктов обладает сложными вязкоупругими или упругопластичными свойствами, поэтому у них наблюдается нелинейная зависимость между напряжением и деформацией. Дополнительное влияние на результаты измерений

оказывают скорость нагружения, высота образца h_0 и скорость деформации $\dot{\epsilon}$ (рис. 1.10).

Если у вязкоупругих материалов перед достижением предела прочности σ_s в момент времени t_0 прекратить сжатие и сохранять деформацию постоянной, то происходит релаксация напряжения (рис. 1.11). Математическое описание такого поведения требует учета производных напряжения и деформации по времени в соответствии с дифференциальным уравнением (1.34). При выводе этого уравнения и входящих в него констант материала можно использовать механические модели [18].

При компрессионных измерениях с помощью пенетromетра образец нагружают между двумя плоскопараллельными пластинами с постоянной силой F . При этом фиксируют изменение высоты образца $h_0 - h = \Delta h$. После преобразования измеренных величин в напряжения и деформацию в соответствии с уравнениями (1.38) и (1.41) получают зависимости между напряжением и деформацией при различных нагрузках F_i ($i=1, 2, 3$).

Деформация твердых пищевых продуктов с негуковскими свойствами при достаточно больших нагрузках зависит от времени. Кинетика деформации сложных реологических материалов при увеличении нагрузки существенно изменяется (рис. 1.12). При разгрузке образца в пенетromетре мгновенная упругая и замедленная упругая деформации полностью исчезают, а вязкая и пластичная деформации остаются постоянными во времени. Обработка кривой кинетики деформации при нагрузке и разгрузке для различных напряжений в области $0,1\sigma_s \leq \sigma_i \leq \sigma_s$ позволяет определить константы материала и деформационное поведение на основе соответствующей механической модели и относящихся к ней дифференциальных уравнений.

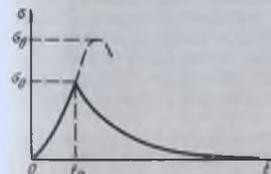


Рис. 1.11. Падение напряжения яблочной мякоти вследствие релаксации после прекращения сжатия [18]

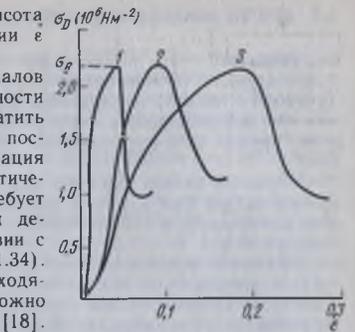


Рис. 1.10. Кривые деформации — напряжения шоколада при различной скорости деформации (в мм/мин):
 1 — 20; 2 — 10; 3 — 5

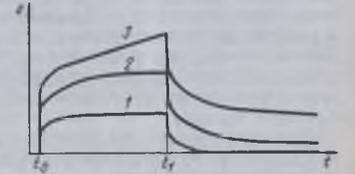


Рис. 1.12. Кривые кинетики деформации яблок при постоянном напряжении (в Н/мм²) [18]:
 1 — 0,034; 2 — 0,139; 3 — 0,226

1.7. ДРУГИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ

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

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

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

Коэффициент твердости рассчитывают по величине силы и геометрическим параметрам остаточной деформации (шарового сегмента, глубины внедрения). Между коэффициентами твердости, полученными с помощью различных методов, существуют определенные соотношения.

Мягкость — свойство, противоположное твердости.

Хрупкость — свойство твердых тел достигать разрушения без пластичной деформации. Чисто гуковские тела обнаруживают хрупкое разрушение при любой скорости деформации. У негуковских тел хрупкое разрушение наступает только при высоких скоростях деформации или низких температурах, когда теряют действие вязкие свойства.

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

Адгезия — свойство, которое основывается на взаимодействии двух различных тел на границе раздела фаз и вызывает сцепление тел. При разделении тел необходимо преодолеть силы сцепления. Прочность соединения двух тел из различных материалов зависит от площади и состояния поверхности контакта между телами.

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

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

1.8. КОНСИСТЕНЦИЯ И ТЕКСТУРА ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

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

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

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

Пищевые продукты, помимо консистенции, обладают текстурой.

Текстура — физико-структурные свойства вещества, в частности продукта, воспринимаемые органами слуха, зрения и осязания и вызывающие у человека определенные ощущения при потреблении (откусывании, разжевывании, проглатывании) [7, 9, 11, 17]. Комплекс ощущений при потреблении пищи, который называется органолептическим, приводит потребителя к предпочтению или отказу от пищевых продуктов. Для создания высококачественных пищевых продуктов необходимо целенаправленно воздействовать на их органолептические свойства.

Консистенция и вязкость относятся к текстуре и представляют собой два из множества возможных ее отличительных признаков (рис. 1.13).

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

Инструментальные измерительные методы для определения отдельных кинестетических признаков можно разделить на три группы [7, 8, 9, 13, 16]:

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

2 — эмпирические методы, при которых продукты подвергаются вос-

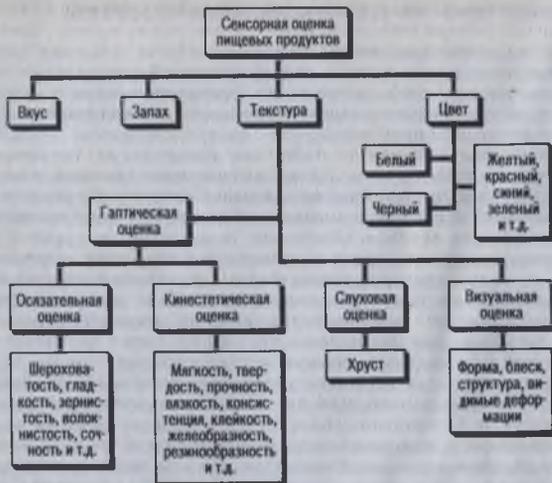


Рис. 1.13. Классификация сенсорной оценки качества и текстуры пищевых продуктов

производимой деформации или нагрузке при помощи измерительных приборов, не позволяющих точно определить реологические свойства. Результаты измерений представляют собой параметры консистенции. Они хорошо коррелируют с признаками текстуры, полученными при органолептической оценке;

3 — имитационные методы, при которых пищевые продукты в специальных измерительных приборах подвергаются испытаниям, имитирующим реальные нагрузки при приеме пищи, например с помощью циклических нагрузок имитируется процесс разжевывания пробы. Цель такого анализа текстуры — измерение параметров, которые соответствуют признакам текстуры продукта, полученным сенсорными методами. Это предполагает полное совпадение вида нагрузки, скорости деформации, температуры и других факторов испытания.

Вопросами зависимости между сенсорными и текстурными признаками, которые основываются на текучести и деформации продуктов, и их реологическими свойствами, определяемыми инструментально, занимается психореология [10, 16].

1.9. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

Для экспериментального определения реологических параметров материала или показателей консистенции существует множество методов, которые различаются по области применения (лабораторные и

производственные), виду измеряемой величины (например, реологические характеристики материала и показатели консистенции), принципам нагружения, степени автоматизации и др.

Для практического выбора метода измерений учитываются необходимое количество проб, точность и продолжительность измерений и другие моменты, которые зависят от конкретных конструктивных решений измерительного прибора.

Большое число реологических методов измерения предназначено для лабораторных исследований. Кроме лабораторных методов измерений, для фундаментальных научных исследований специальных реологических характеристик материалов с высокой точностью, для многократно повторяющихся исследований предпочтение отдается тем методам и приборам, которые позволяют провести измерения и обработку их результатов быстро и с минимальной зависимостью от субъективных факторов. Промышленностью ряда стран выпускаются такие приборы, измерения на которых частично или полностью автоматизированы, а результаты обрабатываются с помощью ЭВМ. Этот аспект также оказывает заметное влияние на выбор подходящего метода измерения.

Эффективное и качественное управление процессами производства пищевых продуктов часто требует контроля реологических величин в производственных условиях. Использование лабораторных методов при этом сопряжено с большими затратами времени и труда и возможно только для очень длительных процессов. По этой причине непрерывный контроль процесса должен осуществляться с привлечением методов, которые дают измерительные сигналы постоянно или в короткие интервалы времени. Эти сигналы точно отражают реологическое состояние и обеспечивают управление процессом при отклонении от заданного режима.

Методы этого типа предусматривают использование приборов или датчиков, которые измеряют реологические свойства непосредственно в технологическом процессе. Из этих объективных условий вытекают, с одной стороны, ограничения при выборе возможного принципа измерения, с другой — требования относительно автоматизации измерений и обработки результатов, а также устойчивой и надежной работоспособности в условиях непрерывной эксплуатации. Кроме того, некоторые ограничения накладываются на точность измерения, измеряемые реологические свойства материала, температуру измерения.

Методы измерений в производственном процессе используют большей частью несложные принципы, охватывающие измерение показателей консистенции или характерных величин, которые связаны с выбранными реологическими свойствами. В особых случаях необходимо иметь в распоряжении автоматизированные методы, которые позволяют с достаточной точностью проводить измерения реологических величин.

Реологические свойства твердых пищевых продуктов можно описать в простейших случаях ньютоновской вязкостью η , или ее функциями $\eta(\dot{\gamma})$ или $\eta(\tau)$, а в сложных случаях — посредством других характеристик: предела текучести; констант, зависящих от продолжительности сдвига; вязкоупругими характеристиками. Для наиболее простой оценки измеряемой величины важно, чтобы в основе принципов нагружения (принцип нагружения устанавливает вид деформации испытываемого материала и измеряемые величины, предназначенные для обработки)

лежали такие виды деформации, при которых тензоры напряжения и скорости деформации существенно упрощаются. Для определения функции течения тензор скорости деформации (скорость сдвига) необходимо измерять в максимально большом диапазоне, начиная при $\dot{\gamma} \approx 0$.

Одномерное стационарное сдвиговое течение может быть реализовано при капиллярном, плоскопараллельном, цилиндрическом и торсионном течении (рис. 1.14). Измерение одномерного сдвига лежит в основе принципа действия стандартных реометров (табл. 1.6).

Известны реометры, принцип измерений которых основан на течении Стокса вокруг падающих шариков (табл. 1.7). Расчет скорости сдвига для падающих шариков в узкой трубе чрезвычайно сложен, поэтому константы прибора определяют посредством калибровки с помощью жидкости с известной вязкостью.

Для количественного определения вязкоупругих характеристик используют реометры, основанные на одномерном осциллирующем сдвиговом течении (табл. 1.8).

Влияние вибрации на изменение структуры неньютоновских жидкостей, которое приводит к уменьшению эффективной вязкости и предела текучести, исследуют с помощью одномерного сдвигового течения в соосных цилиндрах с наложением вибрации.

Для исследования консистенции сложных неньютоновских жидкостей применяют методы, которые обеспечивают быстрые, воспроизводимые результаты измерения. Такие методы приобретают особое значение при исследовании пищевых продуктов или полуфабрикатов, реологические свойства которых быстро изменяются вследствие ферментативных, химических или физических процессов. Методы этого типа базируются на таких принципах нагружения, которые подходят для оценки характерных реологических свойств или параметров текстуры (табл. 1.9). При этом получают характеристические кривые или характеристические параметры, которые выражаются в относительных единицах.

Реологические свойства твердых пищевых продуктов значительно сложнее, чем жидкостей, и только в простейших случаях гукковского тела описываются посредством модуля Юнга E , модуля сдвига G , модуля объемной упругости E_v и коэффициента Пуассона.

Для негукковских тел характерны более сложные параметры, которые можно описать благодаря другим характеристикам, таким, как предел текучести, вязкость, период релаксации, период упругого последствия (ретардации).

При исследовании твердых пищевых продуктов также используют принципы нагружения, при которых тензоры напряжения, деформации

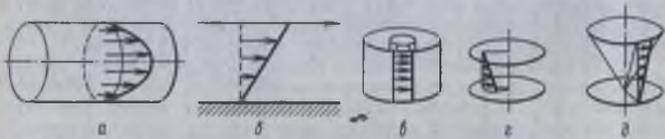


Рис. 1.14. Виды течения при одноосном стационарном сдвиге: а — капиллярное; б — плоскопараллельное; в — цилиндрическое Куэтта; г — торсионное между двумя плоскостями; д — торсионное между конусом и плоскостью

1.6. Реометры одномерного сдвигового течения

Реометр	Вид течения	Область применения, требующая к количеству исследуемого материала
Капиллярный вискозиметр постоянного давления	Капиллярное	Для ньютоновских жидкостей при малых градиентах сдвига; малое количество материала
переменного давления		Для неньютоновских жидкостей в технологических процессах; большое количество материала
высокого давления		Для высоковязких и пластичных сред, а также при высоких градиентах сдвига
Вискозиметр с каналом в виде щели широкой кольцевой	Между параллельными плоскостями	Для неньютоновских жидкостей в технологических процессах; большое количество материала
Ротационный вискозиметр с соосными цилиндрами	Цилиндрическое Куэтта	Для ньютоновских и неньютоновских жидкостей в качестве лабораторных приборов; малое количество материала
с параллельными плоскостями	Торсионное	
типа конус — плоскость	Торсионное между конусом и плоскостью	Для неньютоновских и неньютоновских жидкостей при постоянном градиенте сдвига в измерительном азоре; очень малое количество материала
типа сфера — сфера	Торсионное между шаром и сферической оболочкой	Для ньютоновских и неньютоновских жидкостей в качестве лабораторных приборов; малое количество материала

1.7. Реометры течения Стокса

Реометр	Вид течения	Область применения
Вискозиметр с падающим шариком и широкой трубкой	Стокса вокруг шарика	Для ньютоновских жидкостей с использованием различных шариков; для неньютоновских жидкостей применение ограничено
Вискозиметр с падающим шариком и узкой трубкой	Модифицированное Стокса около шарика в кольцевом зазоре	Для прозрачных ньютоновских жидкостей; для лабораторных приборов
Вискозиметр с толкаемым шариком и узкой трубкой	То же	Для ньютоновских и неньютоновских жидкостей; для лабораторных приборов

1.8. Реометры одномерного осциллирующего сдвигового течения

Тип колебаний	Рабочие органы реометра	Область применения
Вынужденные вращательные с малой амплитудой и переменной частотой	Плоскость — плоскость, конус — плоскость, коаксиальные цилиндры	Для количественного определения динамических модулей и постоянных времени вязкоупругих жидкостей
Свободные вращательные с начальными условиями	То же	Для определения реологических характеристик вязкоупругих жидкостей
Вынужденные за счет эксцентриситета оси вращения	Плоскость — плоскость, эксцентричные цилиндры	Для количественного определения динамических модулей и постоянных времени вязкоупругих жидкостей
Вынужденные из-за относительного отклонения оси вращения	Полусфера — полусферическая оболочка, конус — плоскость, цилиндр — цилиндр	То же

1.9. Методы определения консистенции и реологических характеристик материалов на основе комплексного нагружения

Принцип нагружения	Измеряемая величина	Область применения
Внедрение индентора определенной формы и размеров при заданном усилии и времени внедрения; типичные формы инденторов — конус, шар, полусфер, цилиндрический штифт, игла	Глубина внедрения по истечении определенного времени; глубина внедрения в равновесном состоянии; кинетика внедрения в течение всего времени измерения	Для пластичных и упругопластичных материалов, таких, как мягкие жиры, тесто, желе, пасты в статическом состоянии
Перемешивание жидкости при определенных траекториях движения, геометрии сосуда, количестве и температуре материала и определенной частоте вращения	Крутящий момент	Для жидких и вязких суспензий, эмульсий, пенообразных масс с малым пределом текучести или при его отсутствии
Замес вязких масс и теста в определенном месильном устройстве при определенных геометрии месильной камеры, количестве и температуре материала, частоте вращения	То же	Для вязких масс и теста; для процесса тестообразования; для процессов изменения структуры при механическом нагружении или введении добавок
Экструдирование пластичных масс через узкие отверстия определенной геометрии при постоянных скорости экструдирования и температуре	Давление при определенной скорости экструдирования; количество экструдированного материала	Для пластичных и упругопластичных масс в динамическом состоянии
Падение тела определенной геометрической формы на определенном отрезке специальной трубы, наполненной вязкой жидкостью с заданной температурой	Время падения	Для вязких растворов или суспензий с частицами грубодисперсных компонентов
Колебательное нагружение с определенной амплитудой и частотой	Затухание колебаний; резонансная частота	То же
Растекание вязкой или вязкоупругой массы определенного количества и первоначальной формы при постоянной температуре под действием сил тяжести	Уменьшение высоты; увеличение площади	Для малого количества вязких или вязкоупругих масс

и скорости деформации существенно упрощаются. К ним относятся одноосные сжатие или растяжение, простой сдвиг между параллельными плоскостями, кручение цилиндрического стержня и изотропное сжатие (рис. 1.15). При исследовании вязкоупругих пищевых продуктов необходимо учитывать влияние температуры, скорости деформации и кинетики нагружения. Область малых деформаций при измерении, как правило, превышает. Предел текучести и предел прочности имеют динамический характер.

При постоянной скорости нагружения получают зависимость между напряжением и деформацией, которая для вязкоупругих твердых тел является функцией скорости деформации. Вычисленные при этом характеристики называются «кажущимися», или эффективными, так как они имеют значение только для определенной скорости нагружения.

Нагружение с постоянной скоростью деформации и внезапной остаточной ниже предела прочности используют для изучения релаксации напряжений.

При постоянном напряжении получают кривые изменяющейся во времени деформации (кинетику деформации). Постепенно повышая напряжение после достижения состояния равновесия, получают семейство кривых кинетики деформации. Обработывая эти кривые, получают математическую модель и определяют константы материала.

При очень сложных реологических свойствах твердых тел, особенно при наличии анизотропных структурных элементов (поры, волокна), реологическое описание пищевых продуктов может осуществляться только с помощью параметров текстуры или показателей консистенции. Для этого наряду с обычными принципами измерения для твердых пищевых продуктов применяются такие, которые имитируют или типичные механические процессы при переработке материалов, или нагружение продуктов питания при потреблении. Сюда относятся раздавливание, резание, сжатие (табл. 1.10).

Для инструментального определения твердости как сопротивления пластичному проникновению более твердого тела используют инденторы круглой, конусообразной или пирамидальной формы, которые вдавливают в исследуемые материалы. Вследствие анизотропных свойств пищевых материалов твердость зависит от места нагружения, так что следует различать микро- и макротвердость. Для определения макротвердости

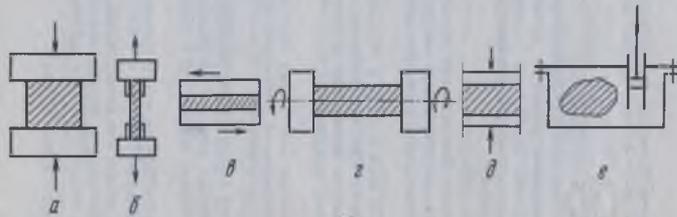


Рис. 1.15. Принципы нагружения твердых тел:
а — одноосное сжатие; б — одноосное растяжение; в — одноосный сдвиг; з — кручение; д — всестороннее сжатие при двумерной компрессии; е — всестороннее (гидростатическое) давление

1.10. Принципы измерений для определения характеристик консистенции или параметров текстуры твердых пищевых продуктов

Принцип измерения	Измеряемая величина
Сжатие образца заданных размеров и формы между двумя параллельными пластинами при постоянной нагрузке или постоянной скорости смещения пластин	Относительное сжатие через определенное время, а также в равновесном состоянии; сжимающее усилие при заданном относительном сжатии; максимальное сжимающее усилие; характерные величины кривой сжатия; полная кривая сжатия
Сплющивание между двумя рабочими органами определенных размеров и формы при постоянной скорости смещения рабочих органов	Максимальная сила сплющивания; полная кривая сплющивания
Резание образца струной или ножом с постоянной скоростью	Сила при внедрении режущего инструмента
Срез плоского образца между верхним и нижним лезвиями	Сила среза

применяют инденторы конусообразной или пирамидальной формы. Макротвердость является средней твердостью больших по площади образцов. Для ее измерения более подходят тела круглой формы. Показатели твердости определяются по остаточной деформации отпечатка при определенных размерах индентора, нагружающей силе, а также скорости деформации. Вследствие относительного характера измерения твердости сравнивать результаты измерения у различных продуктов можно только в том случае, когда используются одинаковые методы.

Внешнее трение зависит от скорости поверхностей тел, находящихся в контакте (в свою очередь, зависит от шероховатости), твердости и силы прижатия тел одно к другому. Принцип измерения при определении коэффициента трения основан на установлении силы, которая необходима для передвижения исследуемого тела с определенной поверхностью и силой прижатия по другой поверхности. Противоположная поверхность съемна, чтобы могли исследоваться различные материалы.

Принципы измерения адгезии и склеивающей способности основаны на определении силы, необходимой для отделения контактной поверхности от прилипшего материала. Для этого между двумя одинаковыми поверхностями помещают исследуемый материал и плотно их прижимают. Отделяют их посредством нормального или тангенциального усилия. Если испытуемый материал полностью отделяется от контактных поверхностей, речь идет об адгезии. Толщина слоя испытуемого материала в этом случае не оказывает влияния на результат измерения. Если после разделения поверхностей испытуемый материал частично остается на поверхности контакта, отделение происходит посредством преодоления адгезии и когезии и речь идет об измерении склеивающей способности. В этом случае толщина слоя испытуемого материала влияет на результаты измерений и должна учитываться в исследованиях.

Укрупненная классификация приборов, предназначенных для исследования описанных выше структурно-механических свойств и текстуры пищевых продуктов и полуфабрикатов, приведена в табл. 1.11.

1.11. Классификация реометров

Реометры	Вид нагрузки (течения)	Измеряемая величина	Область применения
Вискозиметры капиллярные	Одномерное сдвиговое течение	Реологические характеристики	Фруктовые и овощные соки, молоко, кефир, сливки, растительное масло, скроби, творог, мясной и рыбный фарши, пасты, конфетные массы, тесто
ротационные шариковые колебательные	То же Течение Стокса Одномерное и двумерное сдвиговое течение Многомерное пенетрационное течение	Пределное напряжение сдвига, параметры текстуры	Твердые жиры, желе, тесто, каши хлеба, фрукты, овощи, сыр, колбаса, мясо, шоколад
Пенетрометры	Сжатие образца	Предел прочности при сжатии, объемная вязкость, параметры текстуры	Твердообразные пищевые продукты
Компрессионные приборы	Сжатие образца	Объемная вязкость, параметры текстуры	То же
Универсальные приборы типа «Илстрон»	Растяжение, сжатие, изгиб, сдвиг и другие простейшие виды нагружения исследуемого продукта	Прочностные характеристики, параметры текстуры	То же
Трибометры	Сдвиг	Фрикционные характеристики	
Адгезиометры	Отрыв контактирующего элемента от поверхности исследуемого материала	Адгезионные характеристики	

2. КАПИЛЛЯРНЫЕ ВИСКОЗИМЕТРЫ

2.1. ТЕОРИЯ КАПИЛЛЯРНЫХ ВИСКОЗИМЕТРОВ

Теория, кроме гипотез сплошности и непрерывности, использует следующие допущения и ограничения: скорость жидкости на стенке принимается равной нулю, продукт считается несжимаемым; реологические характеристики неизменны по длине и не зависят от времени, т. е. на течение не оказывают влияния процессы тиксотропии, реопексии и релаксации. Однако отмечены случаи проскальзывания продукта относительно стенки, т. е. скорость на стенке не равна нулю [1, 14]. Теория предусматривает, например, для степенных жидкостей при индексе течения, равном нулю, «стержневой» режим движения, при котором вся масса перемещается как твердый стержень и скорость на стенке равна среднеобъемной скорости потока, а градиент скорости на стенке стремится к бесконечности.

Основной предпосылкой научной обоснованности и объективности данных, полученных на капиллярных вискозиметрах, является отсутствие турбулизации потока, т. е. режим движения должен быть ламинарным или структурным. Режим движения характеризуется критерием Рейнольдса Re , который представляет собой безразмерное числовое значение, пропорциональное отношению кинетической энергии потока $m\omega^2/2$ (где m — масса; ω — среднеобъемная скорость) к работе сил вязкого сопротивления Pl (где P — сила сопротивления; l — длина):

$$Re = \rho d \omega / \eta, \quad (2.1)$$

где ρ — плотность жидкости, $кг/м^3$; d — диаметр трубки, $м$; η — вязкость жидкости, $Па \cdot с$, или ее эквивалент.

Критерий Рейнольдса не должен превышать 150, а длительность истечения жидкости не должна быть меньше 100 с (ориентировочный показатель для стеклянных капиллярных вискозиметров). При измерении вязкости воды вискозиметром Оствальда при длине капилляра 0,1 м, диаметре 0,0005 м время истечения рекомендуют выбрать больше 100 с, т. е. подбирать соответствующий объем жидкости (2–5 мл).

В общем случае теория капиллярной вискозиметрии рассматривает равномерное (силы инерции равны нулю) прямолинейное (центробежные силы равны нулю) движение в горизонтальной трубке (силы тяжести проектируются на ось, совпадающую с направлением движения, и равны нулю).

Касательное напряжение θ на боковой поверхности выделенного цилиндра

$$\theta = (\rho/2l) r, \quad (2.2)$$

где p — перепад давления на торцах цилиндра, Па; l — длина цилиндра, м; r — радиус цилиндра, м.

Из (2.2) видно, что напряжение на оси трубы равно нулю, а на ее стенке θ_c при радиусе R или диаметре d — наибольшее:

$$\theta_c = (p/4l)d. \quad (2.3)$$

Сопоставляя (2.2) и (2.3), получаем значение напряжения на любом расстоянии от оси трубы:

$$\theta = (\theta_c/R)r.$$

Представим истинный градиент скорости $\partial u(r)/\partial r$, где $u(r)$ — скорость слоя радиусом r , в виде функции напряжения сдвига $\dot{\gamma}(\theta)$:

$$-\partial u(r)/\partial r = \dot{\gamma}(\theta). \quad (2.4)$$

Знак «—» показывает, что скорость с увеличением радиуса уменьшается. Интегрирование в пределах от r до R дает

$$-[u(R) - u(r)] = \int_r^R \dot{\gamma}(\theta) dr.$$

Поскольку проскальзывание отсутствует, то $u(R) = 0$. Подача жидкости dV_c через элементарный слой радиусом r и толщиной dr с точностью до бесконечно малой второго порядка определяется в соответствии с уравнением расхода (подачи)

$$V_c = \int_F dV_c = \int_0^R u(r) dF = \pi R^2 \omega. \quad (2.5)$$

где dF — площадь живого сечения элементарного слоя; $\omega = V_c/F$ — среднеобъемная скорость потока, м/с (здесь F — площадь живого сечения потока, м²), следующим выражением:

$$dV_c = 2\pi r u(r) dr. \quad (2.6)$$

Для решения дифференциального уравнения (2.6) интегрируют левую и правую части соответственно в пределах от 0 до V_c и от 0 до R . Интеграл левой части равен V_c , интеграл правой имеет вид:

$$\int_0^R 2\pi r u(r) dr.$$

Тогда интегральное выражение можно представить в самом общем виде:

$$\frac{4V_c}{\pi R^3} = \frac{4}{\theta_c^3} \int_0^{\theta_c} \theta^2 \dot{\gamma}(\theta) d\theta. \quad (2.7)$$

Полученное уравнение справедливо только в том случае, если закон изменения $\dot{\gamma}(\theta)$ выражается одной непрерывной функцией. Если функция

не непрерывна, то для каждого непрерывного участка следует брать свой интеграл в соответствующих пределах. Например, по уравнению Шведова — Бингама ядро потока движется как твердый стержень, т. е. градиент скорости в нем равен нулю, и первый интеграл берется в пределах от 0 до θ_0 (в пристенном слое градиент не равен нулю), второй интеграл имеет пределы от θ_0 до θ_c .

Для линейной ньютоновской жидкости $\dot{\gamma}(\theta) = \theta/\eta$. Элементарное интегрирование уравнения (2.7) позволяет получить уравнение Пуазейля:

$$V_c = \frac{\pi p d^4}{128 \eta l}, \text{ или } \frac{4V_c}{\pi R^3} = \frac{\theta_c}{\eta},$$

$$\text{или } \theta_c = \eta \frac{4V_c}{\pi R^3} = \eta \frac{32V_c}{\pi d^3}. \quad (2.8)$$

представляющее собой основной теоретический закон капиллярной вискозиметрии ньютоновской жидкости (оно используется и для неньютоновских жидкостей, но тогда под понятием вязкость условно подразумевается эффективная вязкость).

Имея в виду, что расход (подача) V_c и среднеобъемная скорость ω связаны соотношением $V_c = \pi d^2/4 \omega = V/\tau$, где τ — продолжительность протекания объема жидкости V , получаем

$$\theta_c = \eta \frac{8\omega}{d} = \eta \frac{4V_c}{\pi R^3}. \quad (2.9)$$

В этих выражениях по аналогии с законом вязкого сопротивления Ньютона

$$\theta_c = \frac{pR}{2l} = \frac{pd}{4l} \text{ — consistente переменная — «напряжение сдвига»;$$

$$\dot{\gamma} = \frac{32V_c}{\pi d^3} = \frac{8\omega}{d} \text{ — consistente переменная — «градиент скорости».$$

Применительно к теории капиллярной вискозиметрии уравнение Пуазейля (2.8) можно записать в следующем виде:

$$\eta = \frac{\pi p d^4}{128 V l} \tau. \quad (2.10)$$

Для линейной системы Шведова — Бингама

$$\theta = \theta_0 + \eta_{пл} \dot{\gamma}(\theta), \text{ или } \dot{\gamma}(\theta) = (\theta - \theta_0)/\eta_{пл}. \quad (2.11)$$

где θ_0 — предельное напряжение сдвига, Па; $\eta_{пл}$ — пластичная вязкость, Па·с.

Подставляя выражение (2.11) в общее уравнение (2.7), получаем в правой части два интеграла:

$$\frac{4V_c}{\pi R^3} = \frac{4}{\theta_c^3} \left\{ \int_0^{\theta_0} \theta^2 \dot{\gamma}(\theta) d\theta + \int_{\theta_0}^{\theta_c} \theta^2 (\theta - \theta_0)/\eta_{пл} d\theta \right\}, \quad (2.12)$$

где первый интеграл равен нулю, поскольку в ядре потока при $0 \leq r \leq R_0$ и $0 \leq \theta \leq \theta_0$ градиент скорости $\dot{\gamma}(0) = 0$.

Интегрирование второго слагаемого дает уравнение Букингама:

$$\frac{4V_c}{\pi R^3} = \frac{\theta_c}{\eta_{на}} \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{\theta_0}{\theta_c} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{\theta_0}{\theta_c} \right)^4 \right]. \quad (2.13)$$

Учитывая, что $\theta_c = (pd)/(4l)$ и $\theta_0 = (pd_0)/(4l)$, где $d_0 = 2R_0$ — диаметр ядра потока, уравнению (2.13) можно придать вид, подобный уравнению Пуазейля:

$$V_c = \frac{\pi p d^4}{128 \eta_{на} l} \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{d_0}{d} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{d_0}{d} \right)^4 \right] = \frac{\pi p d^4}{128 \eta_{на} l} f \left(\frac{d_0}{d} \right). \quad (2.14)$$

Запись этого уравнения в consistentных переменных имеет вид:

$$\frac{pd}{4l} = \eta_{на} \frac{32V_c}{\pi d^3} [1/f(d_0/d)]. \quad (2.15)$$

Графические изображения функции ядра потока $f(d_0/d)$ и ее обратного значения представлены на рис. 2.1.

Для нелинейной модели Кэссона

$$\theta^{1/2} = \theta_0^{1/2} + |\eta_K \dot{\gamma}(\theta)|^{1/2}; \quad \dot{\gamma}(\theta) = (\theta^{1/2} - \theta_0^{1/2})^2 / \eta_K, \quad (2.16)$$

где η_K — вязкость по Кэссону, Па·с.

По аналогии с (2.12) можно записать

$$\frac{4V_c}{\pi R^3} = \frac{4}{\theta_0^3} \left\{ \int_0^{\theta_0} \theta^2 \dot{\gamma}(\theta) d\theta + \int_{\theta_0}^{\theta_c} \theta^2 (\theta^{1/2} - \theta_0^{1/2})^2 / \eta_K d\theta \right\}. \quad (2.17)$$

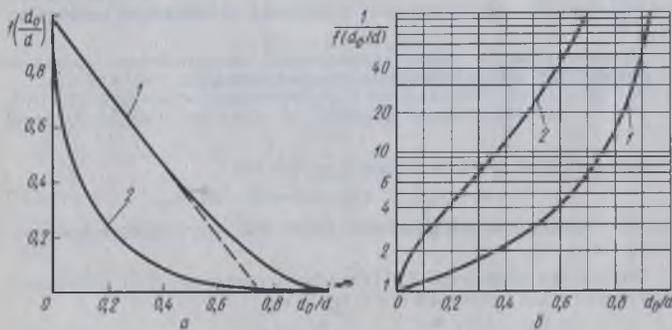


Рис. 2.1. Функция ядра потока (а) и обратная функция (б): 1 — по уравнению Букингама; 2 — по уравнению Кэссона

Интегрирование второго слагаемого позволяет получить расчетное уравнение:

$$\frac{4V_c}{\pi R^3} = \frac{\theta_c}{\eta_K} \left[1 - \frac{16}{7} \left(\frac{\theta_0}{\theta_c} \right)^{1/2} + \frac{4}{3} \left(\frac{\theta_0}{\theta_c} \right) - \frac{1}{21} \left(\frac{\theta_0}{\theta_c} \right)^4 \right]. \quad (2.18)$$

Учитывая те же соображения, что и при преобразовании уравнения (2.13), приведем уравнения к виду Пуазейля:

$$V_c = \frac{\pi p d^4}{128 \eta_K l} \left[1 - \frac{16}{7} \left(\frac{d_0}{d} \right)^{1/2} + \frac{4}{3} \left(\frac{d_0}{d} \right) - \frac{1}{21} \left(\frac{d_0}{d} \right)^4 \right] = \frac{\pi p d^4}{128 \eta_K l} f \left(\frac{d_0}{d} \right). \quad (2.19)$$

В consistentных переменных оно записывается в следующем виде:

$$\frac{pd}{4l} = \eta_K \frac{32V_c}{\pi d^3} [1/f(d_0/d)]. \quad (2.20)$$

Графические изображения $f(d_0/d)$ и ее обратного значения представлены на рис. 2.1.

Анализ уравнений (2.14) и (2.19) показал, что при $d_0 = 0$ (предельное напряжение сдвига отсутствует) жидкость течет как истинно вязкая по закону Пуазейля; при $d_0 \rightarrow d$ (т. е. при $\theta_0 \rightarrow \theta_c$) функция приближается к нулю и течение прекращается либо, для обеспечения подачи, давление стремится к бесконечности. Резкое увеличение давления для жидкости Кэссона начинается при $d_0/d > 0,5$, для жидкости Бингама — при $d_0/d > 0,8$.

Для нелинейной степенной жидкости уравнение течения имеет вид

$$\theta = B^* |\dot{\gamma}(\theta)|^n, \quad (2.21)$$

где B^* — коэффициент, пропорциональный вязкости, Па·с; n — индекс течения.

Для придания коэффициенту B^* смысла эффективной вязкости B^* при единичном (вообще произвольно выбранном) значении градиента скорости $\dot{\gamma}_1$, не зависящем от напряжения, умножаем правую часть уравнения на

$$\dot{\gamma}_1^{n-1} / \dot{\gamma}_1^{n-1} = \dot{\gamma}_1^{n-1} \dot{\gamma}_1^{1-n} = \dot{\gamma}_1^{n-1+1-n} = \dot{\gamma}_1^0 = 1.$$

Тогда $B^* \dot{\gamma}_1^{n-1} = B_0^*$, или $B^* = B_0^* \dot{\gamma}_1^{1-n}$, а градиент скорости $[\dot{\gamma}_*(\theta)]^n \dot{\gamma}_1^{1-n} = [\dot{\gamma}(\theta) / \dot{\gamma}_1]^n \dot{\gamma}_1 = [\dot{\gamma}_*(\theta)]^n \dot{\gamma}_1$, где $\dot{\gamma}_*(\theta)$ — безразмерный градиент скорости.

С учетом сделанных преобразований уравнение (2.7) при $\dot{\gamma}(\theta) = \dot{\gamma}_*(\theta) \dot{\gamma}_1$ принимает вид:

$$\frac{4V_c}{\pi R^3} = \frac{4}{\theta_0^3} \int_0^{\theta_0} \theta^2 \dot{\gamma}_*(\theta) \dot{\gamma}_1 d\theta. \quad (2.22)$$

При этом уравнение (2.21) претерпевает следующие изменения:

$$\theta = B^* |\dot{\gamma}_*(\theta)|^n \dot{\gamma}_1; \quad \dot{\gamma}_*(\theta) = \{ \theta / (B^* \dot{\gamma}_1) \}^{1/n}. \quad (2.23)$$

Изложенный метод позволяет из уравнения (2.21) получить выражение для определения эффективной (переменной) вязкости:

$$\theta = B^* |\dot{\gamma}(\theta)|^{n-1} \dot{\gamma}(\theta) \dot{\gamma}_1^{1-n} \dot{\gamma}_1 = B^* |\dot{\gamma}_*(\theta)|^{n-1} \dot{\gamma}(\theta) = \eta_{эф} \dot{\gamma}(\theta), \quad (2.24)$$

где $\eta_{эф} = B\dot{\gamma}_*(\theta)^{n-1}$ — эффективная вязкость, Па·с; $n-1 = m_1$ — темп разрушения структуры, который меньше нуля для псевдопластичных систем и больше нуля для дилатантных систем.

Логарифмируя последнее выражение для эффективной вязкости, получим

$$\lg \eta_{эф} = \lg B\dot{\gamma}_* + m_1 \lg[\dot{\gamma}_*(\theta)]. \quad (2.25)$$

Эта логарифмическая зависимость представляет собой линию, не выходящую из начала координат, где эффективная вязкость $B\dot{\gamma}_*$ соответствует значению относительного градиента $\dot{\gamma}_* = \dot{\gamma}/\dot{\gamma}_1 = 1$, а $\dot{\gamma}_1$, как отмечено выше, имеет произвольно выбранное значение. Следовательно, угол наклона линии, т. е. темп разрушения структуры m_1 в точке или на участке, можно определить как отношение дифференциалов логарифмов:

$$m_1 = \frac{\partial(\lg \eta_{эф})}{\partial(\lg \dot{\gamma}_*(\theta))} = \frac{\partial(\lg \theta - \lg[\dot{\gamma}(\theta)])}{\partial(\lg \dot{\gamma}_*(\theta))} = \frac{\partial \lg \theta}{\partial(\lg \dot{\gamma}_*(\theta))} - 1 = n - 1. \quad (2.26)$$

Если в логарифмических шкалах получается прямая линия, то темп разрушения структуры постоянен и равен отношению логарифмов. Если получается кривая, то ее следует аппроксимировать отдельными прямолинейными участками. В этом случае темп разрушения меняется скачками, а при отношении дифференциалов — монотонно.

Подставив (2.23) в (2.22) и проинтегрировав, получим

$$\frac{4V_c}{\pi R^3} = \frac{4n}{3n+1} \dot{\gamma}_1 \left(\frac{\theta_c}{B\dot{\gamma}_1} \right)^{1/n}. \quad (2.27)$$

Эта зависимость при $n=1$ превращается в уравнение Пуазейля (2.8).

В общем случае давление по длине капилляра может изменяться нелинейно, тогда, заменяя напряжение сдвига на стенке его значением по (2.9), получим

$$\frac{4V_c}{\pi R^3} = \frac{4n\dot{\gamma}_1}{3n+1} \left[\frac{R}{2B\dot{\gamma}_1} \left(\frac{\partial p}{\partial l} \right) \right]^{1/n}, \quad (2.28)$$

где $\partial p/\partial l$ — градиент давления по длине трубы.

Зависимость (2.28) можно представить в нескольких вариантах: относительно расхода, напряжения или перепада давления. Для теории капиллярной вискозиметрии представим уравнение (2.27) в consistentных переменных:

$$\theta_c = B\dot{\gamma}_1 \left(\frac{3n+1}{4n} \right)^n \left(\frac{8\omega}{\dot{\gamma}_1 d} \right)^n, \quad (2.29)$$

где $B\dot{\gamma}_1 \left(\frac{3n+1}{4n} \right)^n = A_1$ — напряжение сдвига на стенке трубы при единичном значении относительного среднего градиента скорости, Па; $\frac{8\omega}{\dot{\gamma}_1 d} = \dot{\gamma}_*$ — относительный градиент скорости на стенке (consistentная переменная); $n = \frac{\partial(\lg[\rho d/(4V_c)])}{\partial(\lg[8\omega/(\dot{\gamma}_1 d)])}$ — индекс течения; если в логарифмических шкалах экспериментальная кривая спрямляется, то он равен отношению логарифмов.

Тогда уравнение (2.29) упрощается:

$$\theta_c = A_1 \dot{\gamma}_*^n. \quad (2.30)$$

Зная consistentные переменные из опытов, отложив экспериментальные точки в логарифмических шкалах и проведя прямую линию, по формуле (2.30) легко определить A_1 и n , а далее вычислить вязкость:

$$B\dot{\gamma}_* = A_1 \dot{\gamma}_1^{-1} \left(\frac{4n}{3n+1} \right)^n = A_1 \dot{\gamma}_1^{-1} f_1(n), \quad (2.31)$$

где $f_1(n) = \left(\frac{4n}{3n+1} \right)^n$ — функция индекса течения (рис. 2.2).

В частном случае для ньютоновской жидкости при индексе течения, равном единице, формулы (2.29) и (2.31) превращаются в уравнение Пуазейля (2.8).

Уравнение (2.29) можно представить также как напряжение сдвига на стенке в зависимости от истинного относительного градиента скорости:

$$\dot{\gamma}_{*ист} = \frac{3n+1}{4n} \cdot \frac{8\omega}{\dot{\gamma}_1 d}, \quad (2.32)$$

т. е. в виде:

$$\theta_c = (B\dot{\gamma}_1 \dot{\gamma}_{*ист})^n. \quad (2.33)$$

Для облегчения расчетов по формуле (2.29) на рис. 2.3 построена функция

$$f_2(n, \dot{\gamma}_*) = \left(\frac{3n+1}{4n} \cdot \frac{8\omega}{\dot{\gamma}_1 d} \right)^n. \quad (2.34)$$

Индекс течения в дифференциальном уравнении течения и в consistentных переменных, если в логарифмических шкалах получается

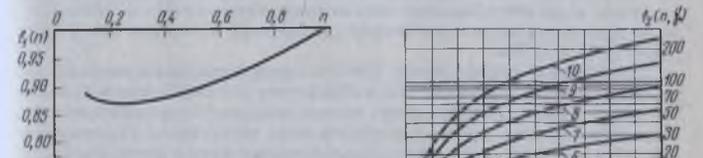
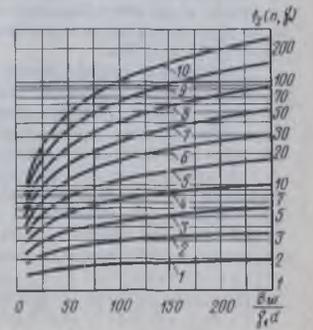


Рис. 2.2. Функция индекса течения в капиллярных вискозиметрах

Рис. 2.3. Функция индекса течения и среднего градиента скорости в зависимости от числовых значений градиента скорости при различных индексах течения: 1—0,1; 2—0,2; ...; 10—1,0.



прямая линия, одинаков. В общем случае для двух названных уравнений индексы течения могут различаться [6]. Тогда по формуле (2.30) определяют средний индекс течения n' , а затем истинный градиент скорости на стенке:

$$\left(\frac{\partial u}{\partial r}\right)_c = \frac{3n'+1}{4n'} \cdot \frac{8w}{d}$$

В дифференциальное уравнение (2.21) входит истинный индекс течения n , который связан со средним n' следующими соотношениями:

$$n = \frac{\partial(\ln \theta_c)}{\partial[\ln\{(3n'+1)/(4n') \cdot (8w/d)\}]} = \frac{n'}{1 - (3n'+1)^{-1} \partial n' / \partial(\ln \theta_c)}; \quad (2.35)$$

$$\frac{1}{n} = \frac{1}{n'} + \partial\left(\ln \frac{3n'+1}{4n'}\right) / \partial(\ln \theta_c).$$

Вопрос о равенстве индексов течения или применения того или иного его значения решается экспериментально. При постоянных n кривые течения имеют одинаковую форму, но раздвинуты по оси градиентов скорости пропорционально значению $(3n+1)/(4n)$.

Градиент скорости по живому сечению потока определяется эпюрой скоростей $u(r)$. Если эпюру удается описать математической зависимостью, то интегрирование уравнения (2.7) обычно не представляет затруднений. Для установления вида функций $\dot{\gamma}(\theta)$ и $u(r)$ используют данные вискозиметрии, описав поведение продукта той или иной математической моделью, или исследуют режим движения, применяя дифференциальный метод исследования [6, 14].

Течение вязкопластичного тела, описываемого уравнением Букингама, может быть представлено в виде трех зон: центральная часть потока (ядро) движется как твердый стержень с максимальной скоростью, испытывая незначительные деформации; в следующем цилиндрическом слое — промежуточном — скорость уменьшается несколько быстрее, чем в ядре; в пристенном слое скорость достигает нулевого значения, т. е. тончайший слой продукта прилипает к стенке трубы вследствие высокой адгезии. Такой механизм движения может вызывать перемещение к стенке мельчайших частиц третьей фазы, особенно заметное, если они обладают пониженной когезионной способностью к двум другим фазам и повышенной адгезионной способностью к материалу стенки трубы.

Структурный режим может быть осложнен проскальзыванием продукта относительно стенки, что наблюдается у пластичных высококонцентрированных грубодисперсных систем, например при движении обезжиренного творога или измельченного мяса со средним размером частиц 0,003 м и более, если содержание жировых частиц очень мало.

Значительно расширяет представление о режимах течения модель движения степенной жидкости, эпюры относительных скоростей которой при тчении по круглой трубе показаны на рис. 2.4.

Абсолютные значения локальной и среднеобъемной скоростей при отсутствии проскальзывания вычисляют по выражениям

$$\alpha = \left[1 - (r/R)^n\right]^{\frac{n+1}{n}} \frac{R \dot{\gamma}_c n}{1+n} \left[\frac{R}{2\dot{\gamma}_c B_*^*} (\partial p / \partial l)\right]^{1/n}; \quad (2.36)$$

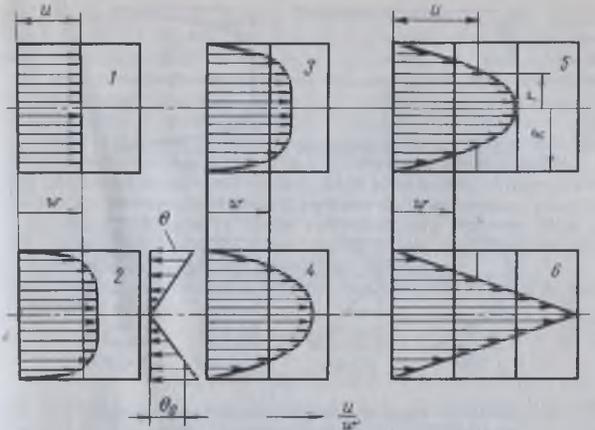


Рис. 2.4. Эпюры относительных скоростей при тчении по круглой трубе степенной жидкости, имеющей различные индексы течения: 1 — 0; 2 — 0,1; 3 — 0,2; 4 — 0,5; 5 — 1,0; 6 — ∞ ; w — средняя скорость по объемному расходу; u — локальная скорость элементарного слоя; θ — напряжение сдвига; θ_c — предельное напряжение сдвига

$$w = \frac{R \dot{\gamma}_c n}{1+3n} \left[\frac{R}{2\dot{\gamma}_c B_*^*} (\partial p / \partial l)\right]^{1/n} \quad (2.37)$$

где u — локальная скорость, т. е. скорость элементарного слоя, расположенного на расстоянии r от оси трубы, м/с; w — средняя скорость потока, определяемая по уравнению расхода, м/с; R — внутренний радиус трубы, м; n — индекс течения; $\partial p / \partial l$ — градиент давления по длине трубы, Па/м; B_*^* — эффективная вязкость при единичном градиенте скорости, Па·с.

Скорость жидкости в центре трубы легко определяется из (2.36) при $r = 0$.

Для всех эпюр характерно то, что объем заштрихованного тела вращения равен объемной секундной подаче жидкости, вычисляемой по уравнению расхода, а среднеобъемная скорость постоянна.

По аналогии с эпюрами скоростей на рис. 2.5 построены эпюры градиентов скоростей, вычисленных по уравнению

$$\dot{\gamma}(\theta) = \frac{\partial u(r)}{\partial r} = w \frac{3n+1}{n} (r/R)^{1/n} \frac{1}{R} \quad (2.38)$$

Определены числовые значения максимального градиента скорости на стенке в долях радиуса трубы, если среднеобъемная скорость постоянна для всех случаев, например равна 1 м/с. Для вычисления градиента на стенке и относительной (условной) толщины градиентного слоя построены графики их зависимости от индекса течения (рис. 2.6).

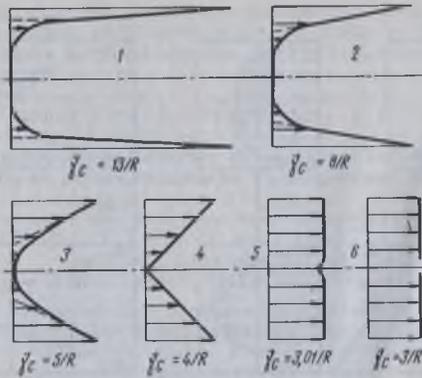


Рис. 2.5. Эпюры градиентов скоростей при течении по круглой трубе степенной жидкости, имеющей различные индексы течения: 1—0,1; 2—0,2; 3—0,5; 4—1,0; 5—100; 6—1000

Кривая 1 для предельно дилатантных систем (бесконечно большой индекс течения) имеет нижний предел, равный 3, кривая 2 имеет верхний предел, равный 1.

Сравнение эпюр скоростей и градиентов скоростей показывает, что при малых индексах течения (0,1; 0,2; 0,3) относительная скорость смещения в ядре потока очень мала, градиент скорости практически равен нулю. Это позволяет распространить действие закона степенной жидкости на вязкопластичные системы, обладающие предельным напряжением сдвига, что значительно облегчает практические расчеты и повышает их точность и достоверность.

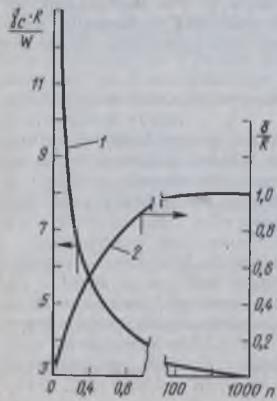


Рис. 2.6. Зависимость симплекса кинематического подобия (1) и относительной толщины градиентного слоя (2) от индекса течения

ленной ошибкой, то чем больше параметров, тем больше вероятная ошибка в расчетах. Кроме того, следует отметить, что кривые течения многих вязкопластичных систем (при скоростях, не приближающихся к нулю) можно аппроксимировать на отдельных участках прямыми линиями двухпараметрической степенной модели, если построение графиков проводить в логарифмических шкалах. Поэтому для практических целей зачастую отпадает необходимость в усложнении исходной дифференциальной модели, если учитывать отмеченное выше.

При движении псевдопластичных, вязкопластичных и других систем с высокими скоростями их структура может быть предельно разрушена, тогда начинает действовать закон ньютоновского течения. При дальнейшем увеличении скорости может развиваться турбулизация потока, и все приведенные уравнения перестают работать.

Представляет несомненный интерес интегрирование общего уравнения Гершеля — Балкли [12]:

$$\theta = \theta_0 + B_0^* \dot{\gamma}^{1-n} [\dot{\gamma}(\theta)]^n, \quad (2.39)$$

или

$$\dot{\gamma}(\theta) = (\theta - \theta_0)^{1/n} / (B_0^* \dot{\gamma}_1^{1-n})^{1/n}, \quad (2.40)$$

которое обобщает математические модели течения истинно вязкой (2.8), бингамовской (2.11 и 2.13), степенной (2.21 и 2.27) и других жидкостей. Привести результаты интегрирования тем более необходимо, что многие исследователи используют дифференциальную модель (2.39), где градиент скорости определяется по зависимости (2.4), подставляя в нее интегральные консистентные переменные по (2.9). Такое действие принципиально неверно, и в лучшем случае можно говорить об использовании трехпараметрического уравнения вида

$$pd/(4l) = \theta_0 + K(8w/d)^n, \quad (2.41)$$

где K и n — константы, подобные по смыслу B_0^* и n в уравнении (2.21); θ_0 — предельное напряжение сдвига, Па; $\theta_0 = pd_0/(4l)$.

Подставляя в общее уравнение (2.7) значение градиента скорости по (2.40), получаем два интеграла, аналогичных (2.12). Первый равен нулю, а второй дает расчетную зависимость

$$\frac{4V_c}{\pi R^3} = \frac{4}{\theta_1} (B_0^* \dot{\gamma}_1^{1-n})^{-1} n (\theta_c - \theta_0)^{\frac{n+1}{n}} \times \left[\frac{(\theta_c - \theta_0)^{\frac{1}{n}}}{3n+1} + \frac{2\theta_0(\theta_c - \theta_0)}{2n+1} + \frac{\theta_0^{\frac{1}{n}}}{n+1} \right], \quad (2.42)$$

Преобразования, аналогичные (2.13), позволяют получить зависимость, которая обобщает (2.14) при $n = 1$ и (2.27) при $n \neq 1$, но при наличии предельного напряжения сдвига:

$$\frac{4V_c}{\pi R^3} = \frac{4n\dot{\gamma}_1}{\pi R^3} \left(\frac{\theta_c}{B_0^* \dot{\gamma}_1} \right)^{1/n} \times \left\{ (1-X)^{1/n} \left[1 - \frac{X}{2n+1} - \frac{2nX^2}{(2n+1)(n+1)} - \frac{2n^2X^3}{(2n+1)(n+1)} \right] \right\}, \quad (2.43)$$

где $X = d_0/d$ — симплекс геометрического подобия бингамовского течения потока жидкости.

Обозначив многочлен, заключенный в фигурную скобку, через $f_3(n, d_0/d)$, получим

$$\frac{4V_p}{\pi R^3} = \frac{4n}{3n+1} \left(\frac{\theta_0}{B\delta\dot{\gamma}^{1-n}} \right)^{1/n} f_3(n, d_0/d), \quad (2.44)$$

где $f_3(n, d_0/d)$ — функция ядра потока (рис. 2.7).

Решая уравнение (2.44) в consistentных переменных по аналогии с (2.29), имеем

$$\theta_0 = B\delta\dot{\gamma}^n f_3(n, \dot{\gamma}) [1/f_3(n, d_0/d)]^n, \quad (2.45)$$

где $f_2(n, \dot{\gamma})$ — функция, аналогичная (2.34), приведенной на рис. 2.3.

Наиболее полное представление о течении самых различных систем дает обобщенная модель нелинейной вязкопластичной среды Шульмана [15]:

$$\theta^{1/a} = \theta_0^{1/a} + (\eta, \dot{\gamma})^{1/b}, \quad (2.46)$$

частные случаи решения которой рассмотрены выше. При $a=1$; $1/b=n$ она становится моделью Гершеля — Балкли и при $\theta_0=0$ — степенной; при $a=b=2$ — моделью Кэссона; при $a=b=1$ — моделью Шведова — Бингама и при $\theta_0=0$ — моделью Ньютона.

Проводя обобщение экспериментальных реометрических данных в consistentных переменных или в соответствии с первой водопроводной формулой

$$Eu = f\left(\frac{1}{Re}, \frac{l}{d}\right), \text{ или } p = \frac{K}{Re^a} \cdot \frac{l}{d} \rho \frac{w^2}{2}, \quad (2.47)$$

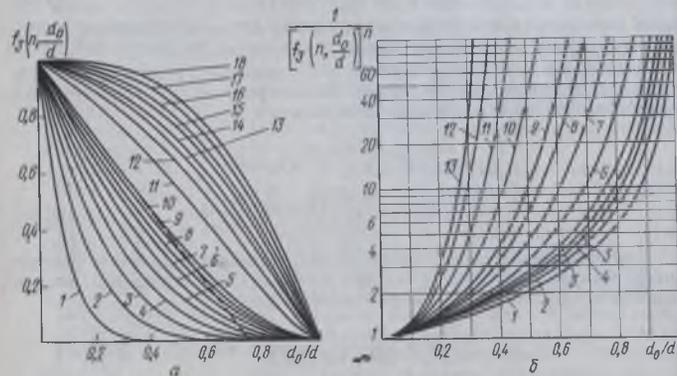


Рис. 2.7. Функция ядра потока (а) и обратная функция (б) по уравнению Гершеля — Балкли при различных индексах течения: $a=1 \div 10-0,1+1,0$; $11 \div 14-2 \div 5$; $15-7$; $16-10$; $17-20$; $18-100$; $b=1-0,1$; $2-0,3$; $3-0,5$; $4-0,7$; $5-1,0$; $6-2$; $7-4$; $8-7$; $9-10$; $10-20$; $11-40$; $12-70$; $13-100$

где $Eu = p/(\rho w^2)$ — критерий Эйлера, представляющий собой отношение работы сил давления p к кинетической энергии потока; K и a — эмпирические коэффициенты ($K=64$; $a=1$); l — длина трубы или капилляра,

можно перейти к определению вязкости и оценить существенные аспекты поведения продукта в трубе или капилляре.

Для степенной жидкости по (2.21) критерий Рейнольдса имеет вид:

$$Re_{cr} = \frac{d^n w^{2-n} \rho}{B\delta 8^{n-1}}, \quad (2.48)$$

Часто используют модификацию уравнения Букингама (2.14) и (2.15), аппроксимируя трехчлен какой-либо функцией. Критерий Рейнольдса приобретает вид:

$$Re^* = \frac{wd\rho}{\eta_{пл}(1+bU)}, \quad (2.49)$$

где $wd\rho/\eta_{пл} = Re_{пл}$ — критерий Рейнольдса, вычисленный по пластичной вязкости; $U = \theta_0 d/(\eta_{пл})$ — критерий Ильюшина.

Виды аппроксимаций и значения коэффициентов к формулам (2.47) и (2.49) при $a=1$ даны в табл. 2.1.

2.1. Обобщенные критерии Рейнольдса

Значение коэф-фициентов		Вид аппроксимации	Средняя толщина слоя сдвига	Диапазон изменения $\sqrt{d_0/d}$
b	K			
$1/8$	64	$1-d_0/d$	$0,2R$	В граничных точках $w=0, d_0/d=1$; $w \rightarrow \infty, d_0/d=0$
$1/8$	75	$0,855-d_0/d$	$0,25R$	$0,4 \div 0,8$
$1/6$	64	$1-(1/3)d_0/d$	$0,33R$	$0 \div 0,5$
$1/3$	64	$1-(2/3)d_0/d$	$0,66R$	$0 \div 0,25$
$1/2$	64	$1-4d_0/d$	R	В граничной точке $d_0/d=0$
$1/20$	168,5	$0,38-0,4d_0/d$	$0,1R$	$0,6 \div 0,95$
$1/25$	200	$0,32(1-d_0/d)$	$0,08R$	$0,75 \div 1,0$

Следует отметить, что уравнение Букингама (2.13), которому придавали существенное значение до разработки теории нелинейных моделей, в последнее время используется значительно реже вследствие явных преимуществ в теоретическом и практическом аспектах последних.

2.2. КОНСТРУКЦИИ КАПИЛЛЯРНЫХ ВИСКОЗИМЕТРОВ И РАБОТА НА НИХ

Вискозиметры капиллярного типа применяются для определения вязкости материалов, обладающих относительно небольшой ее величиной: мяскостного бульона, крови и топленого жира, подсолнечных и соевых

мисцелл, растворов мыла, миндального и арахисового масел, кондитерского жира.

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

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

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

В опытах на капиллярных вискозиметрах получают зависимость расхода массы Q от перепада давлений Δp . Если опыты проводят на одном капилляре, то напряжение сдвига на стенке капилляра τ (в Па) рассчитывают по формуле

$$\tau = \Delta p R [2(L + nR)], \quad (2.50)$$

где R — радиус капилляра, м; L — длина капилляра, м; n — поправка, учитывающая концевые эффекты.

Когда используются два капилляра одного радиуса, но разной длины, то τ определяют по формуле

$$\tau = R(p_1 - p_2) / [2(L_1 - L_2)]. \quad (2.51)$$

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

$$\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_{\text{ср}} [3 + d \lg \dot{\gamma}_{\text{ср}} / (d \lg \tau)], \quad (2.52)$$

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

Капиллярные вискозиметры можно условно разделить на три группы: стеклокапиллярные, цилиндр — поршень и приборы истечения. К первой группе приборов относятся простейшие вискозиметры, представляющие собой U-образные трубки, в одно из колен которых помещен капилляр (рис. 2.8).

В вискозиметре Уббелодде (рис. 2.8, а) для истечения жидкости необходимо в одном из колен принудительно создавать давление или разрежение. Капилляр в приборе располагается вертикально, что представляет определенные трудности при работе с жидкостями, обладающими значительной вязкостью и поверхностным натяжением. Для таких случаев М. П. Воларович и Н. Н. Кулаков предложили вискозиметр с горизонтальным капилляром; в нем исключается необходимость введения поправки на гидростатическое давление столба исследуемого материала.

Перед измерением вязкости жидкость заливают через трубку 1 в резервуар 2 до уровня между рисками m_3 — m_4 . Затем прибор в вертикальном положении погружают в жидкостный термостат до уровня немного выше резервуара 6 и выдерживают 30 мин при заданной температуре. После этого при закрытой трубке 8 жидкость засасывается в резервуары 5 и 6 грушей, надетой на трубку 7. Далее трубки 7 и 8 соединяются

с атмосферой и определяется время истечения жидкости из резервуара 6 через капилляр 4 в резервуары 3 и 2. Время истечения отсчитывается при снижении уровня жидкости в трубке 7 с резервуарами 5 и 6 от риски m_1 до риски m_2 . Зная время истечения жидкости, находят измеряемую вязкость.

Капиллярные вискозиметры ВПЖ (типа Уббелодде) позволяют определять кинематическую вязкость жидкости в диапазоне от 0,6 до 10^4 $\text{мм}^2/\text{с}$ при температуре не выше 100°C . Измерение вязкости сводится к определению времени истечения через капилляр заданного количества жидкости из измерительного резервуара.

В вискозиметре Оствальда (рис. 2.8, б) перетекание жидкости из одного колена в другое происходит под воздействием гидростатического давления: из емкости с рисками (m_1 — m_2) исследуемый материал протекает через капилляр в емкость с риской m_3 под действием собственной массы. Определяя время истечения, находят вязкость по уравнению Пуазейля.

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

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

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

$$\eta/\eta_0 = \tau p / (\tau_0 p_0), \quad \text{или} \quad \eta = \eta_0 [\tau p / (\tau_0 p_0)], \quad (2.53)$$



Рис. 2.8. Капиллярные стеклянные вискозиметры: а — Уббелодде; б — Оствальда; в — Оствальда — Фенске; г — Канон — Фенске

где η_0 , η — вязкость соответственно стандартной и исследуемой жидкости, Па·с; ρ_0 , ρ — плотность соответственно стандартной и исследуемой жидкости, кг/м³; τ_0 , τ — время истечения соответственно стандартной и исследуемой жидкости, с.

На вискозиметре Оствальда — Фенске (рис. 2.8, в) можно определять вязкость в пределах от 1 до 8000 мм²/с, находя время перемещения материала от уровня m_1 до уровня m_2 .

Вискозиметр Канон — Фенске (рис. 2.8, г) применяется для определения вязкости непрозрачных материалов. Он имеет набор из одиннадцати капилляров диаметром от 0,3 до 4 мм, что позволяет определять скорость сдвига в пределах от 1 до 20 000 с⁻¹, кинематическую вязкость — в пределах от 0,6 до 10 000 мм²/с. Испытание заключается в определении времени перемещения материала из емкости 1 через капилляр 2 сначала до уровня m_1 , а затем до m_2 и m_3 . Постоянные капилляры разные для емкостей 3 и 4, что необходимо учитывать при расчете вязкости.

В лабораторной практике используются стеклянные вискозиметры многих авторов, причем во всех приборах перемещение материала происходит или под действием собственной массы, или под действием внешнего вакуума. Общим для всех приборов этого типа является наличие капилляра, устройства для измерения расхода или объема жидкости и системы, обеспечивающей создание гидростатического давления. В качестве капилляра может быть использована трубка диаметром от долей миллиметра до 2—3 мм для измерения вязкости ньютоновских и маловязких неньютоновских жидкостей. Получаемые результаты, как правило, инвариантны, т. е. не зависят от диаметра трубки. Для неньютоновских жидкостей с более высокой вязкостью и вязкопластичных систем диаметр может достигать 10 мм и более, а результаты измерений зачастую зависят от диаметра, т. е. неинвариантны.

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

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

$$1 - \frac{V_0}{Fh} \left(\frac{\rho - \rho_t}{\rho_t} \right), \quad (2.54)$$

где V_0 — общий объем залитой жидкости, м³; F — площадь сечения нижнего резервуара на уровне жидкости, м²; h — средний напор, м; ρ и ρ_t — плотность при температуре соответственно заполнения и измерения, кг/м³.

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

$$\eta = K_t \rho \tau, \quad (2.55)$$

где K_t — константа прибора при температуре измерения; τ — время истечения, с.

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

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

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

Вискозиметры ВПЖ-1, ВПЖ-2 и ВПЖ-4 рекомендуются использовать для оценки качества желатина по его вязкости. Измерения следует проводить при температуре 40 °С и концентрации 10 %. Прибор ВПЖ-1 позволяет определять вязкость мелассы и мелассных растворов при изменении температуры от 20 до 120 °С и концентрации сухих веществ от 7 до 79 % [13, 20].

С помощью вискозиметра Оствальда изучалась зависимость вязкости от температуры для мясокостного бульона и технической дефибрированной крови, виноградного сока, а также вязкость водно-спиртовых и водно-спиртово-сахарных растворов [2, 6, 17]. В области температур 40—95 °С зависимость вязкости мясокостного бульона от температуры описывается степенным уравнением. С увеличением температуры и уменьшением концентрации сухих веществ вязкость бульона снижается. Например, при концентрации 16 % вязкость равна $6,67 \cdot 10^{-3}$ Па·с, а при 90 °С — $2,69 \cdot 10^{-3}$ Па·с.

Вязкость топленого говяжьего жира при температуре 50 °С равна $29 \cdot 10^{-3}$ Па·с, а при 90 °С — $10 \cdot 10^{-3}$ Па·с, вязкость рыбьего жира соответственно равна $11,5 \cdot 10^{-3}$ и $3,7 \cdot 10^{-3}$ Па·с [4, 6].

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

Вискозиметр типа Арвесон с гидравлическим приводом (рис. 2.9, а) состоит из цилиндра 5, поршня 3, перемещение которого происходит от нагнетаемой жидкости 2. Привод шестеренного насоса 7 осуществляется от электродвигателя 8. Давление в гидравлической системе контролируется манометром 1. Изучаемая масса 4 при помощи поршня 3 продавливается через капилляр 6, при этом замеряются давление и скорость выпрессовывания.

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

Вискозиметр Б. М. Азарова предназначен для изучения реологических свойств высоковязких тестовых и конфетных масс [7, 19]. Он состоит (рис. 2.9, б) из рамы, системы силового гидравлического привода 1, рабочего цилиндра 2 с рубашкой 3 для термостатирующей жидкости, блока электротензометрической аппаратуры. Гидропривод состоит из насоса высокого давления, масляного бака, силового гидравлического цилиндра, двух дроссельных кранов и манометра. Рабочий цилиндр 2 с дном 5 снабжен поршнем 6 и капилляром 4. Цилиндр, дном и капилляр имеют водяные рубашки 3, соединенные с термостатом. Электротензометрическая аппаратура состоит из датчика давления, встроенного в дно цилиндра, датчика температуры, установленного в канале капилляра, усилителя и осциллографа.

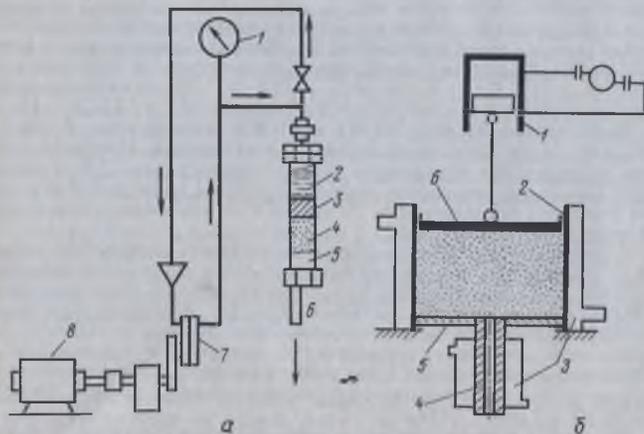


Рис. 2.9. Вискозиметры с гидравлическим приводом: а — типа Арвесон; б — Азарова

Расход материала определяется при помощи резательного механизма, который представляет собой два электромагнита-соленоида, на сердечниках которых закреплен специальный нож-струна, подвешенный под обрез капилляра. Испытуемая масса загружается в цилиндр и закрывается сверху поршнем. Приложенная к массе посредством силового цилиндра нагрузка измеряется датчиком давления. Установка позволяет развивать нагрузку на массу до $6 \cdot 10^4 \text{ Н}$ и поддерживать температуру массы постоянной в диапазоне от 20 до $70 \text{ }^\circ\text{C}$.

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

Для установления величины потерь давления используется метод двух капилляров: сначала эксперимент проводится с капилляром определенной длины, затем — с той же массой на другом капилляре с другой длиной, но того же диаметра. Опыты проводили с капиллярами длиной 10 , 100 и 150 мм . Входные потери, как показали результаты опытов, не превышают $5-7\%$ от общих потерь, что позволяет проводить капиллярную вискозиметрию макаронного теста на одном капилляре при отношении длины капилляра к диаметру более 15 .

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

$$\eta_{пл} = a_1 \dot{\gamma} (a_2 W - a_3), \quad (2.56)$$

где $\eta_{пл}$ — пластичная вязкость, $\text{Па} \cdot \text{с}$; $\dot{\gamma}$ — скорость сдвига, с^{-1} ; W — влажность теста, $\%$; a_1, a_2, a_3 — эмпирические коэффициенты (табл. 2.2).

Получены также значения предельного напряжения сдвига (в Па) для хлебопекарного теста различной влажности (табл. 2.3).

2.2. Значения эмпирических коэффициентов, входящих в уравнение (2.56)

Сорт муки, из которого получено тесто	a_1	a_2	a_3
Высший	8000	2,76	1,83
Первый	10500	2,90	1,78
Второй	5800	1,80	1,38

2.3. Значения предельного напряжения сдвига теста различного качества

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

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

$$P = KV^n, \quad (2.57)$$

где P — аналог усилия, определяемый по формуле $P = \Delta p d / (4L)$; V — аналог скорости, определяемый по формуле $V = 8v/d$; K и n — константы уравнения (табл. 2.4). В этих формулах Δp — перепад давлений на длине L капилляра, Па; d — диаметр капилляра, м; L — длина капилляра, м; v — средняя линейная скорость массы при выходе из капилляра, м/с.

2.4. Значения констант уравнения (2.57)

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

Вискозиметр с пневматическим приводом (рис. 2.10) состоит из баллона с газом 1, цилиндра 3 с поршнем 4, капилляром 6 и термостатом 7. Изучаемая масса 5 из цилиндра выдавливается через капилляр, при этом по манометру 2 определяется давление в системе и каким-либо способом — скорость истечения материала. Например, в устройстве системы Бюрел — Северс имеется набор капилляров диаметром 0,306; 1,123 и 1,552 мм, максимальное напряжение сдвига равно 10^5 Па, вязкость — 10^4 Па·с.

Реометр РК-2 (авторы Кембловски и Киянски из Политехнического института химической инженерии в г. Лодзи, ПНР) предназначен для измерения характеристик неньютоновских материалов как с небольшой, так и с очень большой вязкостью. Прибор (рис. 2.11) может работать при давлении до 10^5 Па и температуре от -50 до $+150$ °С. Длина капилляра составляет 500 мм, что обеспечивает большое отношение длины к диаметру. Вход в капилляр закрывает клапан, который управляется электрическим током. Электросекундомер включается вместе с электромагнитом и останавливается при его отключении.

Реометр Умштетера, созданный в

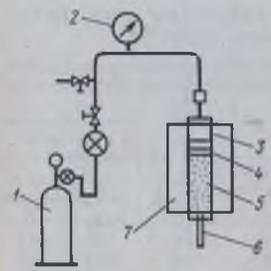


Рис. 2.10. Вискозиметры с пневматическим приводом

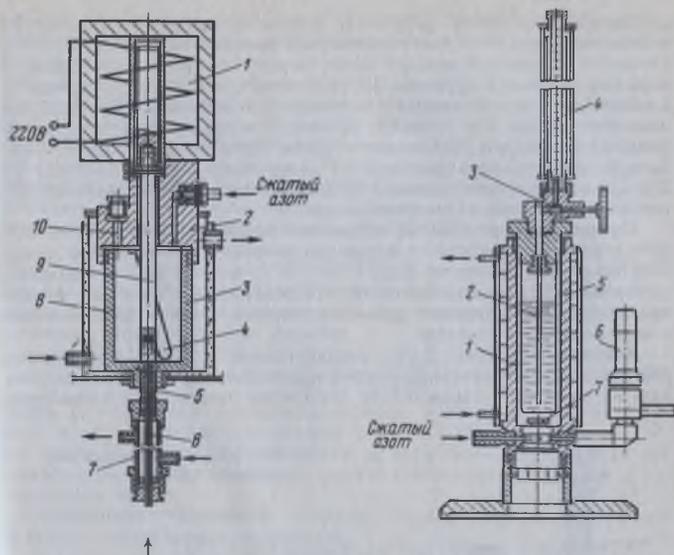


Рис. 2.11. Измерительная часть реометра РК-2:

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

Рис. 2.12. Вискозиметр Умштетера

том же институте, представляет собой вискозиметр с капилляром, находящимся в вискозиметрической емкости [21]. Прибор (рис. 2.12) может работать при высоких давлениях и температурах. После открытия игельчатого клапана 3, расположенного на выходе из трубки, материал с помощью сжатого азота заданного давления перемещается из капилляра 2 в бюретку 4, находящуюся над вискозиметрической емкостью 1, заключенной в термориюющий сосуд 5. Такое решение позволяет непосредственно определить объем материала, прошедшего капилляр. Прибор снабжен клапаном безопасности 6 и датчиком 7 для измерения температуры массы. Недостатком является ограниченная длина капилляра, что вызывает при обработке результатов наблюдений необходимость учета входных эффектов.

Широкое распространение, особенно в последние годы, получили вискозиметры, рабочий поршень которых приводится при помощи механических силовозбудителей: пружин, механических передач, от электродвигателей, грузов и т. п.

Вискозиметр АКВ-5 (рис. 2.13) состоит из камеры 2, заполняемой исследуемой массой и заканчивающейся капилляром 1. В камеру входит шток 3, проталкивающий массу через капилляр; шток движется вниз под давлением пружины 5. Перед испытанием пружина сжимается с помощью винта 6, который перемещается вертикально посредством вращения втулки 8 с ручкой 7. В шток 3 вставляется держатель карандаша 4, которым производится запись перемещения штока на барабане 9, приводимом в движение от синхронного электродвигателя 10. При записи получают кривые, по которым определяют вязкопластичные характеристики исследуемой массы.

На **вискозиметре АКВ-2М** определяют эффективную вязкость яблочного сока в зависимости от изменения концентрации взвесей в диапазоне скоростей сдвига от 0 до $4 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$; течение сока описывается уравнением Оствальда. Выяснено, что осветленные соки при течении практически не проявляют аномалии вязкости и могут быть отнесены к ньютоновским жидкостям.

Консистометр (рис. 2.14), разработанный в ПНР, предназначен для определения вязкости фруктовых и овощных пюре, а также для анализа их качества и консистенции. Испытание заключается в измерении

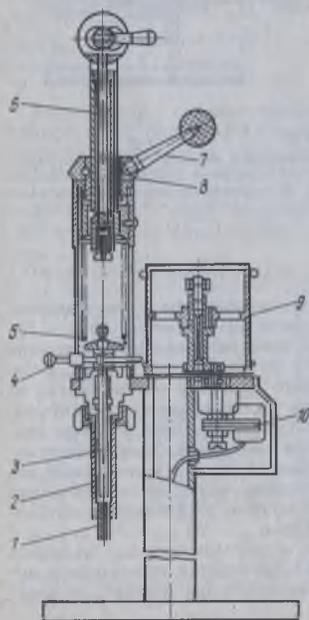
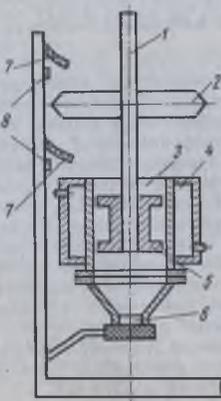


Рис. 2.13. Капиллярный вискозиметр АКВ-5

Рис. 2.14. Консистометр для фруктовых и овощных пюре



времени истечения пищевой массы из цилиндра 3 через калиброванное отверстие 6 под давлением массы поршня 5 и грузов, устанавливаемых на стержень 1. Скорость поршня почти постоянна, так как ускорение движения компенсируется трением между поршнем и стенкой цилиндра. Время опыта устанавливается по электросекундомеру, который включается и выключается кнопками 8 и пружинами 7 при прохождении диска 2 сверху вниз. Изотермические условия поддерживаются прокачкой воды от термостата по рубашке 4. Постоянство массы грузов и скорости поршня обеспечивает одинаковое напряжение сдвига во время опыта, следовательно, время истечения массы является реологическим фактором, как бы «кажущейся» вязкостью. Расчет ведется по формуле

$$L_S = tB\rho_c \quad (2.58)$$

где L_S — реологический фактор, соответствующий «кажущейся» вязкости, Па·с; t — время истечения, с; B — геометрическая постоянная установки, определяемая по формуле

$$B = \frac{gD^2\pi}{128FS} \ln \frac{S+H_1}{S+H_2} \quad (2.59)$$

(здесь g — ускорение свободного падения, м/с^2 ; D — диаметр отверстия, м; F — площадь поперечного сечения рабочего цилиндра, м^2 ; S — длина калиброванного отверстия, м; H_1 и H_2 — расстояние от выходного отверстия до положения поршня соответственно в конце и начале опыта, м);

ρ_c — суммарная «плотность» поршня, грузов и пищевой массы (в кг/м^3), определяемая по формуле

$$\rho_c = 4[M_n + M_r + F(H_2 - H_1)\rho_m] / [\pi D^2(H_2 - H_1)] \quad (2.60)$$

(здесь M_n и M_r — масса соответственно поршня и грузов, кг; ρ_m — плотность пищевой массы, кг/м^3).

Расхождение результатов определения времени истечения концентрированных томатных продуктов и яблочного пюре не должно превышать 1 с, томатного сока — 0,1 с.

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

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

Вакуумный капиллярный вискозиметр (рис. 2.15), созданный в Киевском НПО «Пищемаш» [9], предназначен для определения вязкости мучного теста, отформованных тестовых заготовок без предваритель-

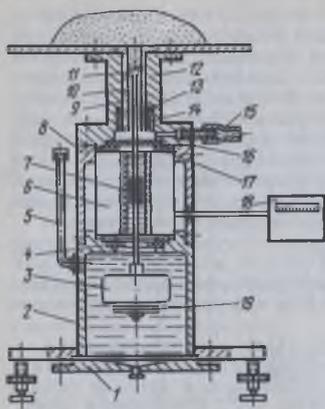


Рис. 2.15. Вакуумный вискозиметр

плоскости стола. При этом усилие выталкивания плавающей системы должно быть минимальным.

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

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

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

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

Вискозиметры переменного уровня, или свободного истечения, — приборы, принцип действия которых основан на истечении материала под действием собственной массы [3]. Основным узлом в них является емкость с расположенной внизу калиброванной трубкой. Расход жидкости поддерживается постоянным, а уровень ее изменяется пропорционально вязкости. Измеряя высоту уровня, находят значение исследуемой вязкости.

ного разрушения структуры. Основным рабочим органом прибора является сменный капилляр 10, изготовленный из органического стекла. Капилляр вставлен во втулку 12, к которой сверху прикреплен предметный стол. Втулка закреплена на корпусе, состоящем из двух соединенных между собой гильз 2 и 8. Гильза 2 крышкой 1 прижимается к основанию прибора. Внутри капилляра во втулках 4 и 16 свободно перемещается стержень 9, сверху заканчивающийся насадкой 11. Снизу к стержню прикреплен поплавок 3, который погружен в масло с низкой вязкостью, к средней части — сердечник 7. Масса поплавковой системы регулируется шайбами 19 так, чтобы верхняя плоскость насадки 11 в исходном положении находилась в

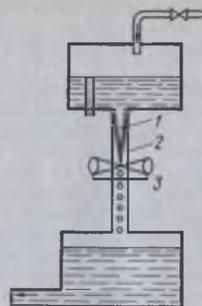


Рис. 2.16. Вискозиметр постоянного уровня

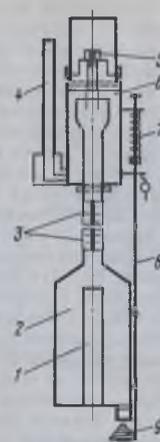


Рис. 2.17. Производственный капиллярный вискозиметр постоянного уровня

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

Вискозиметры постоянного уровня (рис. 2.16) основаны на наблюдении за характером струи жидкости, вытекающей из капилляра, по которому судят о величине вязкости. На определенном расстоянии от сопла-капилляра 1 происходит дробление струи, причем чем меньше вязкость жидкости, тем меньше расстояние до места дробления. Следящее устройство в виде каретки с фотоэлементом 3 перемещается вдоль трубки 2. При прохождении фотоэлементом точки дробления в цепи меняется фототок, который регистрируется вторичным прибором.

Капиллярный вискозиметр для определения вязкости жидкостей в производственных условиях показан на рис. 2.17 [18]. Его можно погружать в емкость с небольшим объемом жидкости, и нет необходимости отбора ее пробы. Глубина погружения отмечается по смачиванию градуированной трубки 3. Жидкость входит в трубку 1 и заполняет сосуд 2, при этом воздух вытесняется и поступает в сосуд 6. Дебит воздуха в капилляре при установившемся движении будет равным скорости поступления жидкости в сосуд 2. При этом скорость воздуха, проходящего через капилляр 5, измеряется по поднятию воды в трубке 4, играющей роль манометра. Таким образом, чтобы получить определенное значение, отмеченное на трубке 4, в зависимости от вязкости жидкости погружение должно быть различным: чем больше вязкость, тем больше должна быть глубина погружения. После проведения опыта

нажимают на стержень 8, который удерживается пружиной 7, и жидкость через клапан 9 вытекает из прибора. В зависимости от диаметра трубки 1 можно измерять и вязкость суспензий, содержащих взвешенные частицы определенного размера.

Вискозиметр для измерения вязкости суспензий, в которых твердую фазу необходимо поддерживать во взвешенном состоянии, снабжают перемешивающими устройствами. В корпус вискозиметра 6 (рис. 2.18) вливают исследуемую жидкость через воронку 3 с краном 4. Перемешивание осуществляется лопастями 7, расположенными на валу 5, приводимом от электродвигателя 1. Вал укреплен в корпусе вискозиметра уплотнением 2. Скорость истечения жидкости через капилляр 8 можно менять и регулировать с помощью сжатого воздуха, поступающего через патрубок 9. Давление воздуха контролируют манометром, подсоединяемым к трубке 10. Так при разных давлениях замеряется дебит суспензии капилляром. Полученные результаты обрабатываются известным способом; можно снять кривую течения. Чтобы уменьшить влияние гидростатического давления, объем резервуара должен превышать объем протекающей жидкости при одном замере в 10—12 раз. Размер капилляра определяют из теории капиллярной вискозиметрии.

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

Вискозиметр Энглера предназначен для определения относительного времени истечения жидкости, т. е. для определения вязкости в градусах Энглера. На рис. 2.19 дана схема такого вискозиметра марки ОВ-108 (ВНР). Резервуар 5 заполняется испытуемой жидкостью до указателя уровня 7 (около 200 см³). После удаления палочки 2 жидкость вытекает через трубку 9. При этом определяется время вытекания $\tau_{ж}$. Контрольный опыт проводится на таком же количестве дистиллированной воды с определением времени ее вытекания ($\tau_{в}$). Вязкость в градусах Энглера определяется отношением

$$^{\circ}E = \tau_{ж} / \tau_{в}. \quad (2.61)$$

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

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

$$\eta = (7,24 ^{\circ}E - 6,25 / ^{\circ}E) \rho / 10^6, \quad (2.62)$$

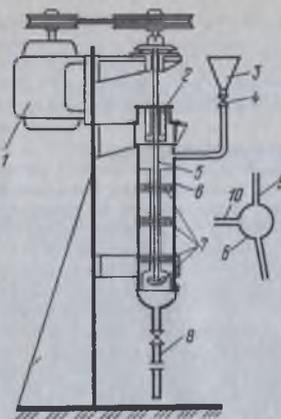


Рис. 2.18. Вискозиметр для суспензий

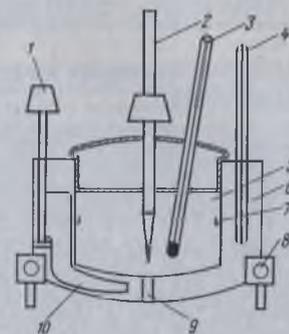


Рис. 2.19. Вискозиметр Энглера

где η — динамическая вязкость, Па·с; $^{\circ}E$ — вязкость в градусах Энглера; ρ — плотность жидкости, кг/м³.

Вискозиметр Энглера применяли для маловязких пищевых продуктов: мясокостных бульонов, растворов желатина, молочных изделий и т.п. По данным А. А. Соколова [16], вязкость стандартного раствора клея (17,75 % сухого вещества) при 30 °С находится в пределах от 1,8 до 6 °E (от 0,01 до 0,045 Па·с). Вязкость мясокостного бульона при этих же условиях равна 2,1 °E (около 0,013 Па·с). Растворы желатина той же концентрации при 40 °С имеют вязкость от 15 до 40 °E (от 0,11 до 0,3 Па·с).

Вискозиметр Редвуда (рис. 2.20) имеет небольшую емкость 2 для исследуемой жидкости, которая вытекает из нее при открывании короткого капилляра 6. Отверстие для истечения жидкости закрывается шариком на палочке 3. Жидкость вытекает в мензурку, расположенную под прибором. Температура термостатирующей жидкости в емкости 4 с мешалкой 5 находится по термометру 1. Вязкость жид-

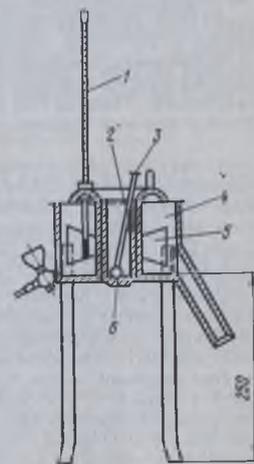


Рис. 2.20. Вискозиметр Редвуда

кости в градусах Редвуда определяется по времени истечения жидкости объемом 25—75 см³.

Вискозиметр Форда представляет собой стакан с коротким капилляром. Время истечения определяется в пределах от 10 до 300 с при комнатной температуре; по этому времени судят о вязкости жидкости.

2.3. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ И РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ

Методика реометрии предусматривает использование таких экспериментальных станков, которые в общем случае позволяют определять и варьировать в установленных пределах следующие величины.

1. Геометрические факторы: линейные размеры (длина l и диаметр d трубки и др.). Размеры установок при изучении течения вязкопластичных продуктов должны приближаться к производственным; использование подобных, но меньшего размера, моделей может оказаться недопустимым, так как распределение скоростей по живому сечению потока и степень разрушения структуры будут подобны при небольших изменениях характерного линейного размера. Геометрические факторы определяют линейными измерениями, а для капилляров с малым диаметром (миллиметры или доли миллиметра) — градуировкой по эталонной жидкости или специальными методами, например путем заполнения стеклянного капилляра ртутью и определением размеров под микроскопом или по массе ртути.

2. Кинематические факторы: средняя скорость (w , м/с) потока в канале; распределение скоростей и деформаций по сечению продукта; объемный (V_c , м³/с), весовой (G_c , Н/с) или массовый (M_c , кг/с) секундные расходы. Скорость или расход определяют расходомерами или объемно-весовым методом по уравнению расхода:

$$V_c = wF; G_c = \rho g V_c; M_c = \rho V_c, \quad (2.63)$$

где F — площадь живого сечения канала, м²; ρ — плотность продукта, кг/м³; g — ускорение силы тяжести ($g = 9,8$ м/с²).

3. Динамические факторы: давление p (в Па) в начале канала (потери давления вдоль канала) или удельное усилие сопротивления. Они являются, как правило, зависимыми переменными, и их определяют опытным путем с помощью специальных датчиков. Для истинно вязкой жидкости потери давления пропорциональны расходу (скорости) в первой степени (ламинарный режим) и в степени 1,75 или 2,0 (турбулентный режим). При течении коагуляционно-тиксотропной структуры потери давления могут быть представлены пропорциональными скорости в степени n , т. е. индексу течения, который для многих пищевых продуктов находится в пределах от 0,1 до 0,3 и реже (для сред Кэссона) достигает 0,5. Поэтому, если скорость или расход представить в виде функции от давления, как это делают в гидравлике, возможны существенные ошибки при вычислении расхода. К динамическим факторам относятся также реологические свойства. Плотность, которая является существенной характеристикой в гидравлике, при течении многих пище-

вых продуктов можно не учитывать в качестве самостоятельного показателя, если она изменяется в пределах $\pm 5\%$ от среднего значения.

4. Энергетические факторы: расход энергии или развиваемая мощность, аналогичные по своей сущности динамическим факторам, определяются обычно самопишущими приборами по площади на диаграммной ленте.

5. Технологические факторы: температура, концентрация сухих веществ, размер частиц дисперсной фазы, степень предварительного механического или теплового воздействия на продукт и т. д. При этом варьирование температуры, как правило, предусматривается самой конструкцией прибора, т. е. прибор с продуктом помещают в термостат.

Основная цель реометрии — определение какой-либо физической величины материала и ее зависимости от технологических факторов для расчета рабочих органов машин и аппаратов, оценка и управление качеством продукта.

Особо следует подчеркнуть, что зависимости между технологическими и физическими величинами выражаются, как правило, плавными кривыми. Переломы на кривых, экстремальные значения величин соответствуют обычно качественным изменениям в системе, например появлению новой фазы или переходу твердой фазы в жидкую (температурная зависимость вязкости жира). В подобных случаях явлению может быть дано теоретическое обоснование.

В исследованиях задаются необходимым количеством независимых параметров и определяют для данной комбинации значения зависимых переменных. Обычно для экспериментатора первоначальная форма записи — таблица, в простейшем случае с двумя переменными. Табличная запись результатов точно соответствует данным измерений и может служить для любого количества переменных, однако не позволяет проследить характер их взаимного изменения и подобрать уравнение для описания процесса. Следующий этап обработки данных — построение графиков, которые наглядно иллюстрируют взаимные изменения переменных.

Точность воспроизведения результатов измерений на графиках обусловлена масштабом. Выбор взаимного масштаба по осям координат может подчеркнуть физический смысл изменения переменных, дать большую или меньшую кривизну линии, различный угол наклона ее к осям координат. Масштаб может быть любым, но только опыты и опытность позволяют выбрать тот, который даст наиболее выразительную кривую каждого процесса. Желательно, когда представляется возможным, выбрать одинаковый масштаб общей длины изменения x и y . Кроме того, выбор масштаба должен учитывать возможные ошибки эксперимента, поэтому слишком большой масштаб обычно выбирать не имеет смысла.

Часто в обычных равномерных шкалах по полученным точкам нельзя провести прямую линию, а подобрать уравнение кривой сложно. Для «спрямления» кривой и подбора уравнения прямой линии используют неравномерные шкалы, чаще всего логарифмические и полулогарифмические. Проще пользоваться специальной бумагой или сеткой, у которой по осям координат в определенном масштабе отложены логарифмы чисел. «Спрявленные» кривые описываются степенными, показательными или логарифмическими уравнениями. В том случае, когда

«спрямление» кривых не достигается, применяют обратные, квадратичные и другие шкалы. Однако через экспериментальные точки можно провести множество кривых, удовлетворяющих различным уравнениям. Поэтому предпочтение следует отдавать такому теоретическому уравнению, которое по возможности более точно описывает физическую сущность процесса. Если неизвестен вид уравнения, то эмпирическая зависимость должна быть наиболее простой, а вычисляемые по ней значения должны укладываться в пределы ошибки опыта.

Часто в результате эксперимента имеется зависимость между тремя переменными. В этом случае можно пользоваться пространственной или плоской системой координат, получая семейство кривых. Например, зависимость $z = f(y, x)$ можно получить в виде $z = f(x)$, когда $y = \text{const}$, т. е. каждому постоянному значению y будет соответствовать своя кривая $z(x)$.

Если эксперимент описывается четырьмя или более переменными, то можно получить семейство кривых, изучая связь между двумя переменными, считая остальные постоянными. Лучший результат достигается значительно проще, если изучается связь между критериями подобия, полученными из дифференциальных уравнений или общих соображений о размерностях.

В лабораторных условиях вязкость сред определяют на специальных стендах. Принципиальные схемы стендов для измерения вязкости капиллярными вискозиметрами состоят из вискозиметров, помещенных в открытый или герметичный сосуд, и термостатов. Термостатирование исследуемой жидкости в приборе занимает от 10 до 30 мин в зависимости от объема. За это время температура достигает температуры жидкости в термостате и восстанавливается структура, т. е. создаются условия, идентичные предыдущему измерению. При кратковременном термостатировании температурные ошибки дают существенные отклонения значений вязкости от истинной ее величины.

Стенд для измерения вязкости стеклянным капиллярным вискозиметром при различной температуре показан на рис. 2.21, а. Он включает вискозиметр 1, сосуд с термостатирующей жидкостью 2 и ультратермостат 3.

При измерениях вязкости вискозиметрами типа Уббелодде необходимо с одной стороны капилляра создавать давление или вакуум. Для этого используют установку (см. рис. 2.21, б), состоящую из воздушного насоса 1, который может работать как компрессор или вакуум-насос, бутылки-моностата 2 объемом 8—10 л с пробкой, U-образного жидкостного манометра 3 или микроманометра, сосуда 4, который является ловушкой жидкости, выбрасываемой из манометра, и трехходового крана 5 для регулирования подачи воздуха. Перед началом измерения давление во всех емкостях должно быть выравнено. Избыточное давление при течении жидкости по капилляру создает возможность турбулизации потока, поэтому проверку на ламинарность по критерию Рейнольдса следует провести особенно тщательно.

Общими условиями в методике работы на всех приборах являются компоновка стенда и строгая горизонтальная или вертикальная установка прибора; заполнение сухого тщательно промытого прибора исследуемым продуктом и его термостатирование при выбранной температуре; измерение времени истечения определенного объема, которое обуслов-

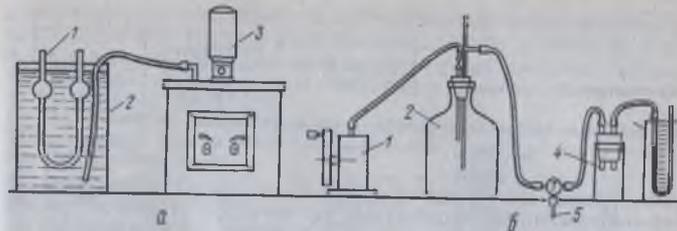


Рис. 2.21. Стенды для измерения вязкости: а — при различной температуре; б — при различном напряжении сдвига

лено вязкостью и разностью высот или гидростатических давлений. Перед рабочими измерениями приборы градуируют по эталонной жидкости — дистиллированной воде, сахарному раствору или касторовому маслу (табл. 2.5 и 2.6).

2.5. Вязкость жидкостей ($\eta \cdot 10^3$, Па·с) для градуировки вискозиметров

Температура, °С	Раствор сахара* при концентрации, кг на 1 кг раствора			Касторовое масло**
	0,20	0,40	0,60	
0	3,818	14,820	—	—
5	3,166	11,600	—	3760
10	2,662	9,830	113,90	2418
15	2,275	7,496	74,90	1514
20	1,967	6,223	56,70	986
25	1,710	5,206	44,02	651
30	1,510	4,398	34,01	451
35	1,336	3,776	26,62	316
40	1,197	3,261	21,30	231

* Раствор очищенного тростникового сахара в воде.

** Плотность при 5 °С — 970,7 кг/м³, при 40 °С — 946,4 кг/м³.

У абсолютных приборов, не требующих градуировки, константы определяют по размерам рабочих органов в соответствии с уравнением Пуазейля (2.10). При вычислении констант прибора геометрические измерения для узких капилляров необходимо проводить с чрезвычайно высокой точностью.

Для определения полной относительной ошибки измерения вязкости жидкообразных продуктов в зависимости от размера капилляра на рис. 2.22 приведена диаграмма Барра. Она построена для оптимальной длины капилляра 0,1 м и среднего напора (разности высот жидкости в двух резервуарах) 0,05 м. Если средний напор удваивается, т. е. равен длине капилляра, то линии переносятся параллельно вверх на 0,15 единицы шкалы по оси ординат. Для пользования графиком определяют

2.6. Зависимость физических свойств воды от температуры

Температура, °C	Плотность ρ , кг/м ³	Вязкость $\eta \cdot 10^3$, Па·с	Коэффициент температурного расширения $\beta \cdot 10^5$, 1/K	Для интервала температур, °C
0	999,8	1,792	5	От 4 до 10
4	1000,0	—	15	От 10 до 20
10	999,7	1,308	30,2	От 20 до 50
20	998,2	1,005		
30	995,7	0,801		
40	992,2	0,656		
50	988,1	0,549	55,6	От 60 до 70
60	983,2	0,469		
70	977,8	0,406		
80	971,8	0,357	71,9	От 90 до 100
90	965,3	0,317		
100	958,4	0,284		

ожидаемые диапазоны изменения вязкости и плотности, находят логарифм их отношения; точка пересечения горизонтали с линией выбранной ошибки дает на оси абсцисс максимально допустимый диаметр капилляра для этих условий. Область левее наклонной линии имеет меньшие, а правее — большие ошибки, чем указано на самой линии. Графики применимы также при определении пригодности имеющегося вискозиметра для данных измерений. В этом случае построение начинают с оси абсцисс. Диаграмма учитывает необходимость создания ламинарного режима и влияние кинетической энергии струи на показания прибора.

Чрезмерное уменьшение диаметра капилляра при наличии двойного электрического слоя у стенки ведет к ограничению действия закона Пуазейля. Он теряет свое значение при наличии двойного электрического слоя с ζ -потенциалом в 50 мВ, если капилляр имеет радиус порядка коллоидной частицы.

У абсолютных приборов капилляр тщательно проверяют на эллипсность сечения, конусность и «гофрированность» по длине. Для этого заполняют его ртутью и рассматривают под микроскопом или проектором, одновременно измеряя диаметр. Объемно-массовым способом при известной длине капилляра можно вычислить его диаметр по объему ртути. Для относительных при-

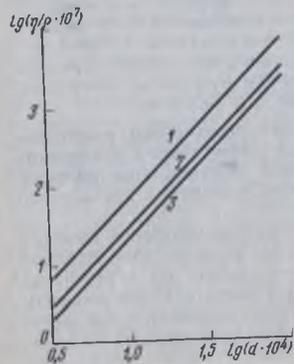


Рис. 2.22. Диаграмма Барра для определения максимально допустимого диаметра капилляра (в м) при относительной ошибке измерения, не превышающей (в %): 1 — 0,1; 2 — 0,5; 3 — 1

боров возможные погрешности такого рода автоматически учитываются при градуировке. 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.

Для наиболее распространенных приборов методика определения реологических характеристик принципиально остается неизменной и кратко изложена ниже.

Вискозиметр Оствальда обычно используют как относительный прибор. На полную градуировочную диаграмму наносят экспериментально полученные время истечения τ_v и вязкость воды η_v . В расчетную формулу вязкости жидкости (2.53) входят плотность воды ρ_0 и исследуемой жидкости ρ , которую определяют параллельно с вискозиметрическими измерениями. Для вычисления вязкости используется формула (2.55).

Меняя давление истечения, можно построить градуировочные реограммы $1/\tau_v = f(\rho_v)$ или в консистентных переменных по формуле (2.9) $\dot{\gamma}_v = f(\theta_v)$, которые позволяют вычислить константы для рабочих измерений. Аналогичные графики строят для результатов измерений исследуемой жидкости. При этом первая функция, хотя и является относительной (условной), может быть построена в процессе измерений и характеризует правильность их проведения.

Предпочтительнее вискозиметрические данные обрабатывать на графиках по формулам (2.30) и (2.31). При этом для ньютоновской жидкости произведение $A_1 \dot{\gamma}_v^{-1}$ соответствует ее вязкости. При наличии аномалии вязкости можно определить кажущиеся или действительные значения предельного напряжения сдвига как отрезка, отсекаемого реологической кривой на оси абсцисс.

Капиллярная реометрия неньютоновских (высоковязких, вязкопластичных и др.) систем принципиально не отличается от реометрии маловязких жидкостей. Однако аппаратное оформление экспериментальных стенов имеет свои особенности: продукт помещают в цилиндр, к которому сбоку или к донышку крепятся сменные капилляры (трубки). Для изменения температуры может быть предусмотрена водяная рубашка на цилиндре и на трубке. Давление истечения создают поршнем или сжатым воздухом, величину давления измеряют либо через силу давления поршня, либо датчиком на трубке (см. рис. 2.9).

Методика измерений принципиально не отличается от описанной для стеклянных вискозиметров: цилиндр плотно, без пустот, заполняют продуктом; включают систему привода поршня; после выхода продукта из конца трубки и достижения установившегося режима включают отсчетчик времени и собирают продукт с последующим определением его массы и объема; по формуле (2.63) определяют подачу и среднюю скорость, одновременно с этим записывают давление истечения. Количество продукта, собранное за одно измерение, должно быть возможно большим с целью уменьшения ошибок, которые могут быть обусловлены различной плотностью укладки продукта по высоте цилиндра, наличием воздушных пузырьков, неравномерностью движения поршня, неоднородностью образца.

В отличие от стеклянных вискозиметров такого типа реометры, как правило, не подлежат градуировке, поскольку неньютоновские системы довольно плохо воспроизводят численные значения свойств (нормальной считается ошибка до $\pm 10\%$).

Методика расчета реологических характеристик для каждой постоянной температуры, но изменяющегося от измерения к измерению давления выполняется в 4 этапа.

1. Определяют истинный перепад давлений Δp (в Па):

$$\Delta p = p - \sum \delta p, \quad (2.64)$$

где p — давление на продукт в капиллярном (типа Уббелоде) вискозиметре, показание манометра или давление грузов, Па; $\sum \delta p$ — сумма поправок на давление, уменьшающих действительное давление истечения (см. табл. 2.7), Па.

Примечание. После каждого измерения для оценки правильности опыта наносят точку в осях координат $1/\tau = f(p)$ или, наоборот, $p = f(1/\tau)$, при условии, что количество продукта всегда постоянно. При несоблюдении этого условия работает график $\rho V/\tau = f(p)$.

2. По истинному перепаду давлений и средней скорости (подаче) вычисляются консистентные переменные [формула (2.9)], составляется таблица. Для этих вычислений может быть использована ЭВМ. Если известна модель течения, то на основании первичных данных ЭВМ выдает значения реологических характеристик.

3. Строится зависимость между консистентными переменными в равномерных шкалах. Если получается прямая линия, выходящая из начала координат, то жидкость относится к ньютоновской с вязкостью, определяемой по формуле (2.9). Кривая линия, выходящая из начала координат, указывает на наличие аномалии вязкости. Тогда следует эти же данные нанести на бумагу с логарифмическими шкалами. Если все точки ложатся на одну, две, три прямые линии, то жидкость относится к степенной и полученные данные обрабатываются по формулам (2.21), (2.24), (2.30). Для такой жидкости эффективную вязкость при единичном значении градиента скорости [см. пояснения к формуле (2.21)] определяют по формулам (2.30) — (2.31). Для уточнения расчетов по формуле (2.32) определяют истинный градиент скорости.

4. Зависимость между консистентными переменными, построенная в равномерных шкалах и не выходящая из начала координат, указывает на наличие предельного напряжения сдвига. Отрезок, отсекаемый этой линией на оси напряжений, будет равен (с последующей проверкой, т. е. этот отрезок можно немного уменьшать или увеличивать) предельному напряжению сдвига [см. формулы (2.11) — (2.13), (2.16) — (2.18), (2.39) — (2.43), (2.46)]. Тогда в соответствии с названными формулами следует рассчитывать предельное напряжение сдвига, вязкость по Бингаму, Кэссону или Шульману. Причем каждая из них вдоль всей кривой должна иметь постоянное значение. Для расчета следует брать не экспериментальные точки, а точки, лежащие на плавной кривой, которая проходит около экспериментальных точек. Эту кривую можно корректировать, т. е. изменять ее положение в пределах экспериментальных точек.

В капиллярной реометрии, как и при любых измерениях, возможны случайные и систематические ошибки, которые зачастую могут переходить, при прочих равных условиях, из одного вида в другой. Например, если стеклянный капилляр стационарно установлен в специальных опорах не строго вертикально, это дает систематическую ошибку; при свободной установке капилляра для серии измерений с отклонением от вертикали каждый раз получаются случайные ошибки. Одни и те же факторы могут давать различную ошибку, например повышение температуры на 1°C для воды при 20°C изменяет ее вязкость на $2,5\%$, для касторового масла — на $8,4\%$.

Для стеклянных капилляров диаметром от долей миллиметра до $2-3$ мм, которые используются в реометрии сравнительно маловязких ньютоновских и неньютоновских жидкостей, некоторые ошибки по своей значимости могут намного превышать эти же ошибки для широких капилляров — трубок диаметром до нескольких десятков миллиметров, которые применяют в реометрии высоковязких, вязкопластичных и других неньютоновских систем. Например, высота поднятия воды h в вертикальных стеклянных капиллярах за счет поверхностного натяжения ($0,073$ Н/м) составляет $h \cdot 10^3 = 29,8/(10^3 d)$, где d — диаметр капилляра. Ошибка в $0,0001$ м ($0,1$ мм) при измерении диаметра капилляра в $0,001$ м дает по уравнению Пуазейля систематическую ошибку при измерении вязкости 40% ; такая же точность измерения длины капилляра размером $0,1$ м дает ошибку 1% и т. д. Избежать многих ошибок можно путем градуировки капилляра с помощью эталонной жидкости.

Существенную ошибку при измерениях (систематическую или случайную) может давать неточность определения времени истечения, что связано с неисправностью секундомера или с индивидуальными особенностями экспериментатора. Поэтому секундомер должен быть проградуирован по эталону, а общая длительность истечения быть не менее 100 с. При использовании самопишущих приборов скорость ленты, отметчик времени также должны быть проверены.

Основные ошибки, присущие как узким, так и широким капиллярам, приведены в табл. 2.7 [12, 15]. Пп. 1—4 частично пояснены выше и вследствие своей очевидности в более подробном объяснении не нуждаются. К п. 4 о внешнем теплоотводе и влиянии его на движение продукта пояснения даны в конце раздела.

Потери давления с кинетической энергией выходящей из капилляра струи будут ощутимы при больших скоростях сдвига. Эта поправка вычисляется по выражению [15]

$$\delta p_k = (1/\alpha) \rho V^2 / (2\pi^2 R^4), \quad (2.65)$$

где α — корректирующий коэффициент; ρ — плотность жидкости, $\text{кг}/\text{м}^3$; V — объемная подача, $\text{м}^3/\text{с}$; R — внутренний радиус капилляра, м.

Для степенных жидкостей, описываемых уравнением (2.21), коэффициент α вычисляют по формуле

$$\alpha = [(2n + 1)(5n + 3)] / [3(3n + 1)^2].$$

2.7. Виды ошибок капиллярной реометрии

№ п/п	Вид ошибки	Причина возникновения	Способ устранения
1	Систематическое существенное отклонение результатов от известных данных	Неточное измерение размеров капилляра, отклонение его формы от идеального цилиндра	Замена капилляра; измерение размеров с помощью микроскопа; градуировка по эталонной жидкости
		Турбулизация потока	Уменьшение гидростатического напора или уменьшение диаметра капилляра
2	Различное время истечения в последовательных измерениях	Непостоянство давления на входе в капилляр	Устранение утечек воздуха или жидкости, которые создают гидростатическое давление; увеличение объема ресивера; притирка поршня; ликвидация включений, препятствующих равномерному движению поршня
		Колебание температуры в термостате	Регулировка термостата
		Изменение рабочего объема жидкости в стеклянных вискозиметрах	Использование одной ли- петки
		Неполное опорожнение резервуара	Учет поверхностного натяжения; создание условий, препятствующих образованию слоя различной толщины на стенках рабочего мерного резервуара
3	Неустановившееся движение	Попадание частиц, уменьшающих живое сечение капилляра	Фильтрование жидкости*
		Уменьшение размеров живого сечения капилляра вследствие адгезии (адсорбции) на его поверхности какой-либо фазы измеряемой системы	Промывка, очистка и высушивание капилляра**
		На начальном участке капилляра эпюра скоростей и градиентов скоростей отличается от теоретической	Уменьшение относительного влияния начального участка (l_0) путем уменьшения диаметра и средней скорости и увеличения длины капилляра; выполнение условия $l_0 \geq 0,03 dRe$, более точно

Продолжение

№ п/п	Вид ошибки	Причина возникновения	Способ устранения
			$l_0 \geq \varphi(n) dRe$, где $\varphi(n)$ — функция индекса течения. При его значениях 0; 0,285; 0,5; 1,0; 1,5 она равна соответственно 0; 0,02; 0,033; 0,0575; 0,071 [15]
4	Тепловой эффект	Превращение энергии давления в тепловую у высоковязких неньютоновских жидкостей при больших напряжениях сдвига	Уменьшение давления и градиента скорости путем увеличения диаметра капилляра (например, животные жиры в маэобразном состоянии)
5	Потери кинетической энергии	Уменьшение давления за счет кинетической энергии вытекающей струи	Уменьшение скорости истечения; увеличение длины и уменьшение диаметра капилляра
6	Пристенный эффект	Проскальзывание вдоль стенки капилляра (грубодисперсные, многофазные системы)	Рифление внутренней поверхности; учет явления специальными экспериментами
7	Входной эффект	Потери давления в местном сопротивлении вискозиметра типа цилиндр—поршень	Установка датчика давления на самом капилляре на расстоянии $l > l_0$
8	Эффект нестационарности	Изменения, возникающие в системе (при движении по капилляру) за счет тиксотропии (репексии), объемного сжатия, расслоения по фазам, что может приводить к переменному градиенту давления по длине капилляра [4,14]	Уменьшение длины, увеличение диаметра капилляра; специальные методы обработки результатов реометрии

* Применение бумажных и подобных фильтров, которые могут адсорбировать какой-либо компонент из раствора, недопустимо; для фильтрования используются металлические сита и стеклянные фильтры.

** Эфир, если он долго хранился, может давать маслянистый остаток.

При $n = 0; 1; \infty$ коэффициент будет иметь значения 1,0; 0,5; 0,37.
Для вязкопластичной модели Шведова — Бингама (2.11) с ошибкой до 2,5%

$$\alpha = 0,5[1 - (d_0/d)].$$

Потери давления за счет уменьшения гидростатического напора вследствие изменения разностей уровней жидкости от h_1 до h_2 определяют по формуле

$$\delta p_r = 0,4343(h_1 - h_2) \rho g / [\lg(h_1/h_2)]. \quad (2.66)$$

Для высоковязких и вязкопластичных систем, которые не текут за счет гидростатического напора, поправка практического значения иметь не будет. Для маловязких жидкостей она может иметь определенное значение и косвенно определяет потери давления с кинетической энергией.

При выходе струи из капилляра происходит перераспределение скоростей [10]. Диаметр выходящей струи d_c отличается от диаметра капилляра d :

$$\frac{d_c}{d} = \sqrt{\frac{2n+1}{3n+1}} - 1 + \sqrt{1 + \gamma_a^2}, \quad (2.67)$$

где γ_a — средняя деформация сдвига за время действия напряжения.

Если жидкость не обладает упругим последствием, в уравнении остается один первый член, который показывает степень сжатия струи. При $n = 0; 1; \infty$ степень сжатия будет иметь соответственно значения 1; 0,87; 0,816.

Пристенный эффект может иметь место при движении грубодисперсных, многофазных систем. Он может быть осложнен прилипанием к стенке какой-либо фазы, например при движении по трубам грубоизмельченного мяса внутренняя поверхность трубы покрывается слоем жировой фазы, толщина которого постепенно увеличивается.

При выводе общего уравнения расхода (2.5) скорость на стенке была принята равной нулю ($u_{cr} = 0$). С учетом проскальзывания ($u_{cr} \neq 0$) уравнение (2.7) принимает вид [15]:

$$\frac{V_c}{\pi R^3 \theta_c} = \frac{u_{cr}}{\theta_c} \frac{1}{R} + \frac{1}{\theta_c^2} \int_0^{u_{cr}} \theta^2 \dot{\gamma}(\theta) d\theta. \quad (2.68)$$

В соответствии с этим уравнением коэффициент эффективного пристенного скольжения β (в $m^2 \cdot c / kg$)

$$\beta = u_{cr} / \theta_c \quad (2.69)$$

На наличие проскальзывания указывает расслоение линий на логарифмическом графике в consistentных переменных, т. е. для разных геометрических размеров трубки вместо одной кривой получается семейство линий.

Методика определения коэффициента проскальзывания из опытов капиллярной реометрии следующая.

1. Для капилляров одинаковой длины, но разных радиусов R строят график $V_c / (\pi R^3 \theta_c) = f(\theta_c)$, где V_c — измеренный секундный расход, m^3/c .

Если получается одна кривая, то проскальзывание отсутствует. Семейство кривых, каждая из которых соответствует своему радиусу, указывает на наличие проскальзывания.

2. Фиксируя последовательно величины напряжения сдвига на стенке (θ_c), по графику определяют соответствующие значения ординат $V_c / (\pi R^3 \theta_c)$.

3. Для каждого фиксированного значения напряжения строят новый график $V_c / (\pi R^3 \theta_c) = f(1/R)$. В соответствии с (2.68) получается семейство прямых линий (второй член уравнения характеризует движение без проскальзывания). Угол наклона линий определяет зависимость коэффициентов проскальзывания от напряжения, т. е. $\beta(\theta_c)$. Умножая каждый член уравнения (2.68) на $\pi R^3 \theta_c$, переходим к уравнению расхода $V_{c \text{ расч}} = V_c - \beta \theta_c \pi R^2$. По расчетному расходу $V_{c \text{ расч}}$ и модели, полученной из общего уравнения расхода, можно определить соответствующие реологические характеристики. При этом следует отметить, что в основе методики определения коэффициента скольжения не заложена какая-либо конкретная реологическая модель, т. е. методика универсальна.

Входовой эффект, т. е. потери давления в местном сопротивлении δp_r на входе в трубку, имеет существенное значение в реометрии. Если для определения используют универсальный стенд, то давление на входе в трубку (капилляр) можно принять равным тому, которое показывает датчик для вязкопластичных (твердообразных) систем, или давлению поршня для жидкообразных систем. При отсутствии датчика давление на входе будет меньше давления сжатого воздуха на величину силы трения поршень — цилиндр, на величину уменьшения давления по высоте цилиндра или на величину уменьшения радиального давления по сравнению с осевым за счет коэффициента бокового давления.

Входовые потери (отрезок 6—6' на рис. 2.23, в) обусловлены внезапным сужением потока. При этом эпюра скоростей на входе — плоская и на начальном участке l_n движение нестабилизированное: происходит разгон частиц вдоль оси и торможение у стенки до начала установившегося течения от сечения 3.

Методика определения потерь давления на входе в капилляр описана в следующем [5, 11].

1. По экспериментальным данным в логарифмических шкалах строят (рис. 2.23, а) зависимость давления p от среднеобъемной скорости w продукта в капилляре для разных отношений его длины к диаметру (сплошные линии). Для каждого значения диаметра будет свое семейство линий.

2. При фиксированных значениях скорости (4—5 значений) определяют по сплошным линиям рис. 2.23, а значения давления и строят график зависимости относительной длины (l/d) от давления (рис. 2.23, б). Экстраполяция линий до пересечения с осью абсцисс дает значение потерь в местных сопротивлениях. При построениях необходима корректировка положения линий с тем, чтобы зависимость местных сопротивлений от скорости для всех значений диаметров описывалась бы одной типичной математической зависимостью.

3. Проводят графическое вычитание давлений, определенных по рис. 2.23, б, из общих величин давления. Полученные пунктирные линии на рис. 2.23, а соответствуют потерям давления по длине капилляра,

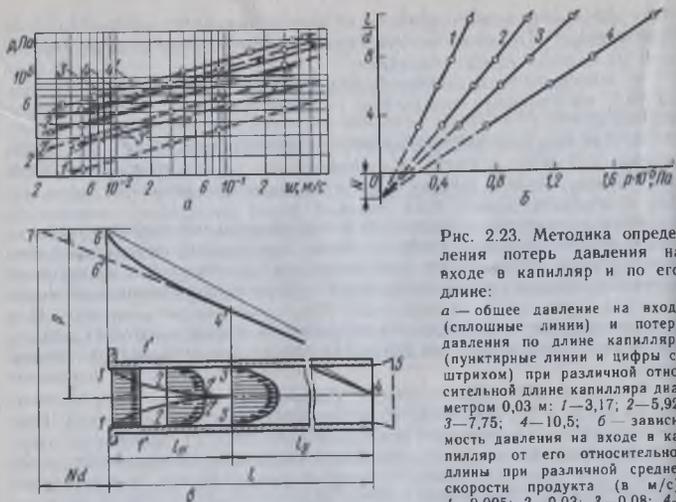


Рис. 2.23. Методика определения потерь давления на входе в капилляр и по его длине:

a — общее давление на входе (сплошные линии) и потери давления по длине капилляра (пунктирные линии и цифры со штрихом) при различной относительной длине капилляра диаметром 0,03 м: 1—3,17; 2—5,92; 3—7,75; 4—10,5; *b* — зависимость давления на входе в капилляр от его относительной длины при различной средней скорости продукта (в м/с): 1—0,005; 2—0,03; 3—0,08; 4—0,3; *в* — эпюры скоростей на

входе в капилляр (1—3) при индексе течения 0,5; действительное (4—4'—6) и «кажущееся» с учетом входного эффекта (4—4'—7) распределение давления по длине капилляра; 5 — разбухание струи продукта; 6—6' — потери давления на входе в капилляр

которое входит в расчетные формулы для прямых трубок при отсутствии других осложняющих эффектов [см. формулу (2.64)].

В ряде литературных источников [11, 15] предлагается определять при общем давлении на входе приведенную длину капилляра. Она складывается из геометрической и эквивалентной (фиктивной) длины (отрезок 6—7 на рис. 2.23, *в*). При движении продукта по капилляру эквивалентной длины потери давления равны потерям на входе. Коэффициент для расчета эквивалентной длины (*N*) определяется как отрезок, отсекаемый линиями (см. рис. 2.23, *б*) в отрицательной области ординат. (Все линии могут не пересекаться в одной точке, тогда отрезок *N* зависит от скорости истечения [5, 6].) В этом случае расчетная consistente переменная — напряжение на стенке капилляра — будет иметь вид:

$$\theta_c = \frac{\rho d}{4(l + Nd)} \quad (2.70)$$

Первичный график на рис. 2.23, *a* можно представить в consistente переменных, однако такое построение усложняет расчеты. Изложенная методика разделения общего давления на потери в местных сопротивлениях и по длине, по нашему мнению, дает больше информации о процессах истечения.

Эффект нестационарности при течении жидкостей, реологические характеристики которых зависят от давления и длительности пребывания

в капилляре, можно учесть, используя дифференциальный метод исследования. Для этого длину капилляра разбивают на элементарные отрезки Δl_i , на каждом из которых реологические характеристики принимают имеющими постоянное значение. Метод подобен двумерному реологическому [10].

При известных общем давлении и законе его изменения по длине для отрезков длиной Δl_i определяется перепад давлений Δp_i ; для зависящих от времени действия напряжения систем вводится промежуток $\Delta t_i = \Delta l_i / w$. Расчеты выполняют по выровненной кривой $\theta_c(\gamma_*)$ с помощью ЭВМ по формулам (2.29)—(2.31).

Важное значение в реометрии имеет правильный выбор математической модели течения продукта. Модель определяет реограмма (кривая течения) при условии, что константы, вычисленные вдоль всей кривой течения, остаются неизменными. Правильность выбранной модели могут подтвердить эпюры скоростей и деформаций. Рассмотрим в качестве типичного примера течение мясного фарша по трубам длиной 1,33 и 2,62 м при различных скоростях продукта и температурах стенки [14]. В соответствии с разработанной ранее методикой [6] использовали разрезанную по оси трубу, которую заполняли продуктом, снимали со стенда, в торец заполненной трубы помещали тонкий слой подкрашенного продукта, устанавливали трубу на стенд и с заданной скоростью прокачивали продукт на определенное расстояние. Затем трубу снимали, замораживали продукт в ней и разрезали его по оси. Эпюры деформаций фотографировали (рис. 2.24).

Опытные эпюры скоростей строили путем деления длины удаления соответствующей точки от начала трубы на время замера. Одновременно при известной средней скорости строили теоретическую эпюру с последующей проверкой по формуле (2.36). Как видно из рис. 2.24, теоретическая и экспериментальная эпюры скоростей хорошо совпадают. Эпюры градиентов скоростей строили по формуле (2.38).

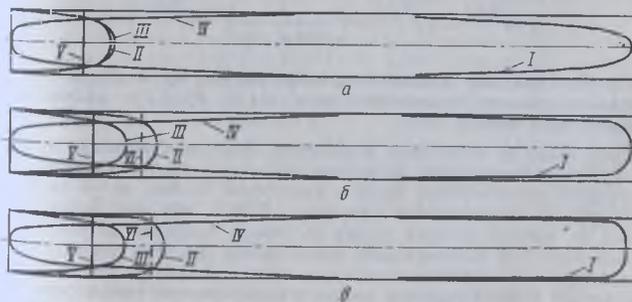


Рис. 2.24. Эпюры деформационного поведения мясного фарша по поперечному сечению потока при различных температурах стенки трубы (в °С): *a*—20; *b*—37; *в*—44; I — опытная эпюра деформаций; II — опытная эпюра скоростей; III — расчетная эпюра скоростей; IV — эпюра градиентов скоростей; V — средняя скорость потока; VI — средняя скорость потока в трубопроводе с равномерно обогреваемой стенкой

При рассмотрении эпюр установлено, что к стенке трубы прилипает слой малой толщины тонкодисперсного вещества, состоящий из мельчайших частичек фарша, жира и т. д., затем движется промежуточный слой и, наконец, ядро потока в виде квазитвердого стержня. Анализ экспериментальных эпюр позволяет отнести мясной фарш к степенным жидкостям и использовать для расчета его течения соответствующие уравнения.

При течения в трубе с равномерно обогреваемой стенкой (см. рис. 2.24, б, в) эпюры скоростей (II) и деформаций (I) по живому сечению потока видоизменяются. Это вызвано тем, что наличие температурного градиента в пристенном слое приводит к уменьшению его вязкости и, следовательно, повышению текучести кольцевого слоя по сравнению с текучестью в объеме.

Наибольшие деформации мясной фарш испытывает в пристенном слое, где происходит резкое изменение скорости. Ядро потока движется в виде квазитвердого стержня.

Наличие двух зон — пристенного слоя толщиной $\delta = R - R_1$ и основного потока радиусом R_1 — позволяет представить подачу мясного фарша в круглой трубе из трех составляющих общего расхода: пристенного слоя, твердого стержня и приращения за счет его деформации. Индекс течения n в диапазоне температур 20—45°C в пределах ошибки эксперимента считали постоянным.

В результате теоретического анализа [см. также (2.28) и (2.24)] течения мясного фарша получено уравнение для определения расхода V_c в круглой трубе с равномерно обогреваемой стенкой:

$$V_c = \frac{\pi n \gamma_1}{3n+1} \left(\frac{\partial p}{\partial l} \right)^{1/n} \left[\left(\frac{1}{2B_{\delta}^* \gamma_{\delta}^{1-n} \gamma_1} \right)^{1/n} \times \right. \\ \left. \times \left(R^{\frac{3n+1}{n}} - R_1^{\frac{3n+1}{n}} \right) + \left(\frac{1}{2B_{\delta}^* \gamma_{\delta}^{1-n} \gamma_1} \right)^{1/n} R_1^{\frac{3n+1}{n}} \right], \quad (2.71)$$

где $\partial p / \partial l$ — градиент давления по длине трубки, Па/м; $B_{\delta}^* \gamma_{\delta}^{1-n}$ — эффективная вязкость пристенного слоя, Па·с; $B_{\delta}^* \gamma_{\delta}^{1-n}$ — эффективная вязкость ядра потока, Па·с.

Как видно из последнего выражения, благодаря наличию пристенного слоя с пониженной вязкостью секундная подача увеличивается пропорционально первому члену в квадратной скобке, но уменьшается относительно теоретической [формула (2.28)], так как радиус ядра потока R_1 меньше радиуса трубки R . Эпюры скоростей на рис. 2.24 и данные табл. 2.8 подтверждают такой вывод. Из этих данных, кроме того, следует, что обогрев стенки при прочих равных условиях ведет к увеличению средней скорости потока и выравниванию эпюры скоростей. При этом общая температура продукта, как показали эксперименты и расчеты, увеличивается всего на 1—2°C. Приведенные данные указывают и на влияние внешнего теплоподвода на реологию продукта в трубах, т. е. на необходимость тщательного темперирования продукта в реометрии (ср. с п. 4 табл. 2.7, где речь идет о внутреннем тепловом эффекте).

2.В. Основные характеристики потоков фарша в трубе

Характеристика	Позиции по рис. 2.24		
	а	б	в
Температура стенки трубы, °С	20	37	44
Расстояние от входа в трубу до вершины эпюры деформаций, м	1,065	1,315	1,110
Средняя опытная скорость продукта, м/с	0,59	1,09	1,17
Опытная скорость по оси трубы, м/с	0,76	1,20	1,23
Расчетная скорость по оси трубы, м/с	0,80	0,95	0,95
Расчетный максимальный градиент скорости, 1/с	89	106	106
Отношение максимальной скорости по оси к средней	1,29	1,10	1,05

Таким образом, методика капиллярной реометрии позволяет получить научно обоснованные, объективные величины реологических характеристик. При этом особое внимание уделено ньютоновской и степенной жидкостям, так как большинство пищевых продуктов соответствует именно этим моделям, особенно, если рассматривается зона развитого течения, т. е. лавинного разрушения структуры. Модель Гершеля — Балкли в этой зоне также можно представить в виде двухпараметрической степенной зависимости.

3. РОТАЦИОННЫЕ ВИСКОЗИМЕТРЫ

3.1. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ, НАЗНАЧЕНИЕ И КЛАССИФИКАЦИЯ

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

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

Вискозиметры ротационного типа по сравнению с другими обладают рядом преимуществ, особенно при испытании материалов с большой вязкостью; они надежны в эксплуатации и могут применяться как для экспресс-измерений, так и для непрерывного измерения вязкости с целью регулирования технологического процесса. Обязательным условием процесса измерения является создание и поддержание в рабочем зазоре ламинарного движения продукта. Так как реологические характеристики пищевых материалов в значительной степени зависят от температуры, необходимо обеспечить контроль температуры продукта в измерительном зазоре, а также предусмотреть возможность стабилизации этой температуры. Конструкция вискозиметра должна быть удобной в работе, обеспечивать простоту заправки и очистки измерительного зазора.

Для получения достоверных данных необходимо, чтобы вискозиметр обладал высокой степенью надежности в работе. Обязательным требованием, предъявляемым к ротационным вискозиметрам, особенно индивидуального изготовления, является метрологическая обеспеченность поверки характеристик прибора.

Наряду со многими достоинствами ротационные вискозиметры имеют и недостатки, вызываемые тепловыделениями в слое испытуемой пищевой массы, находящейся в узком кольцевом зазоре. Поэтому необходимо работать в условиях, при которых выделение теплоты заведомо ничтожно, либо пользоваться методами пересчета экспериментальных данных с учетом тепловыделений.

Вязкость η (в Па·с) продукта при сдвиге и момент на бесконечно

длинном роторе связаны следующим образом:

$$\eta = M_c K / \omega, \text{ или } M_c = \eta \omega / K, \quad (3.1)$$

где M_c — момент сил сопротивления на внутреннем роторе, Н·м; K — коэффициент, зависящий от геометрических размеров и формы поверхностей, соприкасающихся с продуктом, м^{-3} ; ω — угловая скорость внутреннего цилиндра, с^{-1} .

Из (3.1) следует, что для определения вязкости продукта необходимо знать M_c , K и ω . Обычно для данного типоразмера воспринимающего элемента вискозиметра коэффициент K известен; задаются ω и определяют момент на воспринимающем элементе при помощи чувствительного элемента или задаются M_c (например, при помощи падающих грузов) и определяют угловую скорость.

Преобразовательные элементы ротационных вискозиметров можно условно разделить на следующие виды (рис. 3.1): воспринимающий — соприкасающееся с продуктом тело; чувствительный — устройство, уравнивающее момент на воспринимающем элементе; элемент отсчета — устройство, преобразующее сигнал чувствительного элемента в отклонение указателя регистрирующего прибора.

Точность вискозиметров оценивается методом подсчета погрешности измерения по воспроизводимости. Этот метод позволяет определить статические погрешности приборов. Однако практически контроль характеристик ротационных вискозиметров ведется по эталонным жидкостям, которые имеют стабильную зависимость вязкости от температуры.

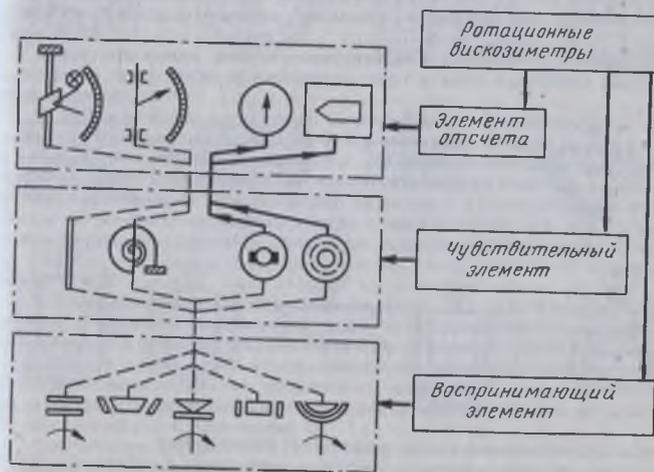


Рис. 3.1. Преобразовательные элементы ротационных вискозиметров [8]

Таковыми свойствами обладают трансформаторное масло, медицинское касторовое масло, растворы пихтового бальзама в касторовом масле. Из маловязких жидкостей стабильные вязкостные характеристики имеют этиловый и изопропиловый спирты. В качестве образцовых вискозиметров в СССР применяются отечественные капиллярные вискозиметры типа ВПЖ и прецизионные вискозиметры с падающим шариком типа «Хепплер» (ГДР), обеспечивающие измерение вязкости прозрачных жидкостей с точностью 0,5%.

В исследовательских и технологических заводских лабораториях встречаются многие разновидности ротационных вискозиметров, которые условно можно классифицировать по двум признакам: по форме воспринимающего элемента и сосуда с исследуемой пищевой средой (рис. 3.2); по методу измерения момента сопротивления, обусловленного физико-механическими свойствами среды.

Форма воспринимающего элемента (ротора) зависит от вида исследуемого материала (ньютоновский или неньютоновский) и диапазона измеряемых значений вязкости. При анализе таких жидкостей, как водные растворы, вино, жидкое масло при повышенной температуре, вязкость которых не зависит от скорости сдвига в измерительном зазоре, применяют роторы любой формы (наиболее часто цилиндр — ци-

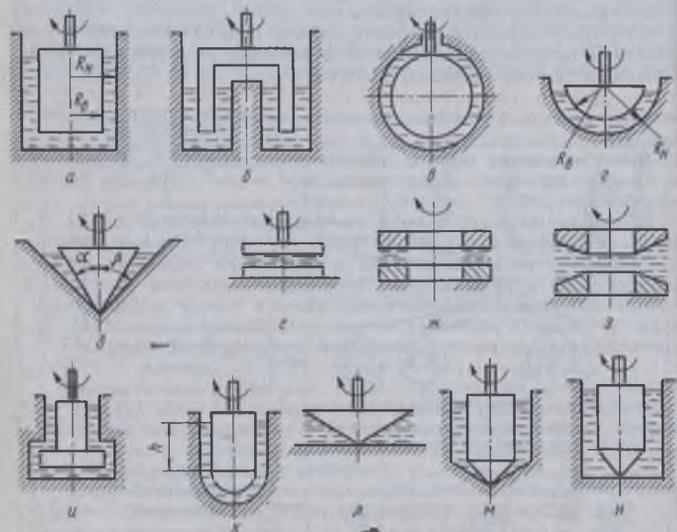


Рис. 3.2. Принципиальные схемы ротационных вискозиметров:

а, б — коаксиальные цилиндры; в — сфера; г — полусфера; д — конус; е — плоскопараллельные пластины; ж — плоские кольца; з — конические кольца; и — комбинация цилиндр — диск; к — комбинация цилиндр — полусфера; л — комбинация конус — диск; м — комбинация цилиндр — конус; н — комбинация цилиндр — конус — диск

линдр или конус — конус). Неньютоновские материалы, вязкость которых зависит от скорости сдвига, можно испытывать на ротационных вискозиметрах, имеющих измерительные поверхности типа цилиндр — цилиндр с малым рабочим зазором. Для исследования высоковязких материалов рекомендуется применять измерительные поверхности типа конус — плоскость с углом между конусом и плоскостью 3—5° или конус — конус с рабочим зазором от 0,2 до 0,5 мм. Такие типы роторов позволяют получать в рабочем зазоре равномерное распределение напряжений сдвига. Для измерения очень малых вязкостей ньютоновских жидкостей применяют воспринимающие поверхности колокольного типа.

Наибольшее распространение в пищевой промышленности получили коаксиально-цилиндрические поверхности для измерения характеристик вязких и вязкопластичных продуктов (см. рис. 3.2, а, к, м).

Известны два основных варианта прибора с коаксиальными цилиндрами. В первом испытуемый материал помещается в зазор между роторами, один из которых приводится в равномерное вращательное движение, а другой цилиндр подвешен на упругой нити или упруго связан с измерительной системой. Вязкость вычисляется по скорости первого цилиндра и по углу поворота второго цилиндра относительно его начального положения. Этот метод применяется в основном для исследования маловязких жидкостей и газов.

Во втором варианте внешний цилиндр неподвижен, внутренний приводится во вращение с помощью падающего груза или электродвигателя через силоизмерительную систему.

Уравнения основных реологических характеристик для перечисленных типов воспринимающих элементов вискозиметров приведены в табл. 3.1.

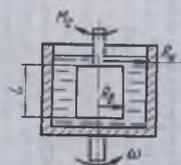
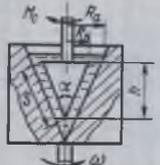
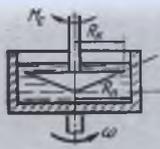
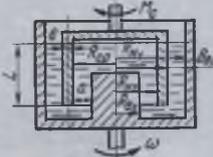
Метод измерения момента сопротивления позволяет подразделить вискозиметры на приборы непосредственной оценки и приборы нулевого сравнения [8].

В приборе непосредственной оценки (рис. 3.3) рабочий ротор 3 через вал 5 соединен с пружиной 6. На валу имеется диск со шкалой 7, а на корпусе — указатель вязкости 8. Синхронным электродвигателем 1 через редуктор 2 приводится во вращение внешний цилиндр 4 с исследуемым материалом. При вращении цилиндра 4 за счет вязкости материала на роторе 3 возникает момент сопротивления. Так как ротор 3 валом связан с пружиной 6, последняя деформируется и закручивается на угол, пропорциональный определенному числу делений на шкале отсчета.

В вискозиметре нулевого сравнения (рис. 3.4) чувствительным элементом 9 является асинхронный двигатель с полым ротором, который неподвижен в момент отсчета вязкости. Вращение цилиндра 7 осуществляется синхронным электродвигателем 6 через редуктор 5. Под действием вязкостных сил испытуемого материала во вращение приводятся воспринимающий цилиндр 8, ротор чувствительного элемента 9 и диск — указатель равновесия 10.

Для измерения вязкости в обмотку управления чувствительного элемента 9 с делителя напряжения 1 от питателя 4 подается напряжение, которое вызывает момент, равный моменту сопротивления на роторе. При равенстве моментов ротор 8, чувствительный элемент 9 и диск

3.1. Расчетные уравнения реологических характеристик для наиболее распространенных воспринимающих элементов ротационных вискозиметров

Тип воспринимающего элемента	Измерительные поверхности	Эффективная вязкость	Скорость сдвига	Напряжение сдвига
Цилиндр — цилиндр		$\eta = \frac{M_c (R_2^2 - R_1^2)}{\omega R_1^2 R_2^2 \cdot 4\pi L} \text{ г}$	$\dot{\gamma} = \frac{2\omega R_1^2 R_2^2}{r^2 (R_2^2 - R_1^2)}$	$\tau = \frac{M_c}{2\pi L r^2} \text{ г}$
Конус — конус		$\eta = \frac{M_c A (R_2 - R_1)}{\pi S^2 R_1^2 R_2 \omega} \text{ г}$	$\dot{\gamma} = \omega R_1 \frac{1 \text{ г} \alpha}{R_2 - R_1}$	$\tau = \frac{M_c A \text{ г} \alpha}{\pi S^2 R_1^2} \text{ г}$
Конус — плоскость		$\eta = \frac{3M_c \epsilon}{2\pi \omega R_1^3} \text{ г}$ при $3^\circ \leq \epsilon \leq 5^\circ$	$\dot{\gamma} = \frac{\omega}{\epsilon}$	$\tau = \frac{3M_c}{2\pi R_1^3 \eta} \text{ г}$
Колокол		$\eta = \frac{M_c \text{ г}}{4\pi L \omega \left(\frac{R_{21}^2 R_{21}^2}{R_{21}^2 - R_{21}^2} + \frac{R_{22}^2 R_{22}^2}{R_{22}^2 - R_{22}^2} \right)}$ $\eta = \frac{M_c (a - e)}{2\pi R_{cp}^2 L \omega} \text{ г}$		

Примечание. M_c — момент сопротивления на воспринимающем цилиндре; R_2 — радиус наружного цилиндра; R_1 — радиус воспринимающего цилиндра; L — глубина погружения воспринимающего цилиндра в рабочий зазор; ω — угловая скорость вращения наружного цилиндра; g — ускорение свободного падения; r — радиус слоя, в котором определяются скорость и напряжение сдвига; R_{21} — радиус обечайки; R_{21} — наружный радиус воспринимающего цилиндра; R_{22} — внутренний радиус воспринимающего цилиндра; R_{22} — радиус ротора; a — ширина рабочего зазора; e — толщина стенки воспринимающего цилиндра; R_{cp} — средний радиус воспринимающего цилиндра; h — высота конуса; S — длина образующей конуса; R_k — радиус основания воспринимающего конуса; α — угол при вершине конуса; ϵ — угол между конусом и плоскостью.

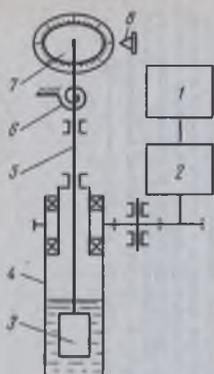


Рис. 3.3. Принципиальная схема вискозиметра непосредственной оценки [8]

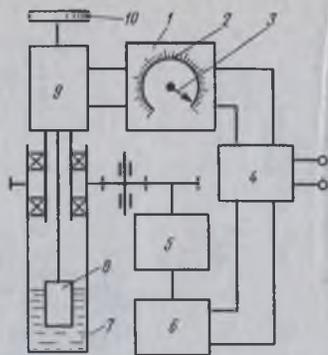


Рис. 3.4. Принципиальная схема вискозиметра нулевого сравнения [8]

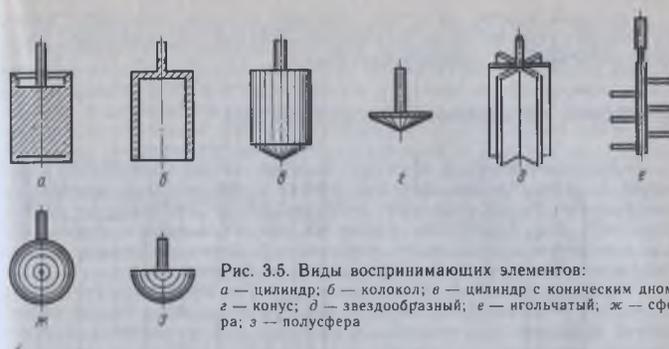


Рис. 3.5. Виды воспринимающих элементов:
 а — цилиндр; б — колокол; в — цилиндр с коническим дном;
 г — конус; д — звездообразный; е — игольчатый; ж — сфера;
 з — полусфера

применяют роторы в виде цилиндра с коническим основанием (рис. 3.5, в), а для высоковязких материалов, которые трудно удаляются после измерений, используются конические роторы (рис. 3.5, г). При испытании пищевых масс со слабыми адгезионными свойствами на роторы наносят рифли. Для грубых дисперсных и неомогенных материалов применяют звездообразные (рис. 3.5, д) или игольчатые (рис. 3.5, е) роторы. Теоретические основы течения ньютоновских жидкостей разработаны для типов а, в и г. Но только для самых простых случаев (цилиндр — цилиндр и конус — плоскость) имеются достаточно точные методы определения значений касательных напряжений и скорости сдвига. Приборы с такими роторами позволяют определить действительную кривую течения неньютоновского материала.

Вискозиметры с коаксиальными цилиндрами образуют самую большую и разнообразную в конструктивном плане группу приборов, работающих по одному из следующих принципов: 1) вращается внутренний цилиндр и на нем измеряется момент; 2) вращается внутренний цилиндр, а момент измеряется на внешнем цилиндре; 3) вращается внешний цилиндр, а момент измеряется на внутреннем цилиндре; 4) вращается внешний цилиндр и на нем измеряется момент. На практике чаще применяют 1-й, 2-й и 3-й принципы. По 1-му прикладывается определенный момент и измеряются обороты ротора или, наоборот, задается частота вращения ротора и измеряется момент. 2-й и 3-й принципы позволяют при определенной частоте вращения одного ротора замерять момент на другом неподвижном роторе.

Для получения постоянной частоты вращения ротора применяют чаще всего синхронный электродвигатель или двигатель постоянного тока с устройствами автоматической стабилизации вращения. В настоящее время выпускаются вискозиметры, снабженные автоматическим устройством для изменения частоты вращения по определенной программе. Устройство соединяют с самописцем или шлейфовым осциллографом, записывающим непосредственно кривую течения изучаемого материала.

10 останавливаются. По указателю 3 шкалы отсчета 2 находится величина вязкости.

Вискозиметры могут быть дискретного или непрерывного измерения с механическим или электрическим чувствительным элементом, могут иметь показывающее или записывающее устройство отсчета момента (вязкости).

Чувствительный элемент вискозиметра может находиться в неподвижном (статическом) или подвижном (динамическом) состоянии равновесия. Статические элементы применяются в приборах для экспресс-измерений вязкости и в лабораторных ротационных вискозиметрах. Такие чувствительные элементы созданы на основе механических упругих элементов — пружин, стержней, растяжек, асинхронных электродвигателей с полым ротором или ротором в виде «беличьего колеса», сельсинных пар. В качестве динамических чувствительных элементов используются различного рода электрические машины — асинхронные, постоянного тока, синхронные, реактивные.

Вид и конструктивное исполнение воспринимающих элементов и сосудов для жидкости влияют на технические характеристики вискозиметра, в основном на диапазон измерения вязкости. Наиболее распространенный вид ротора — цилиндр (рис. 3.5, а), который применяют для жидкостей средней и высокой вязкости (от 50 до 10^6 МПа · с). Для измерения вязкости при больших числах Рейнольдса дно цилиндрического ротора должно быть выполнено в виде чаши, что уменьшает влияние торцового зазора на результат измерения. Колоколообразные роторы (рис. 3.5, б) применяют для жидкостей низкой вязкости (от 2 до 10^3 МПа · с), таких, как масла, фруктовые соки, разбавленные растворы. Для испытаний материалов со средним значением вязкости

Крутящий момент на роторе наиболее надежно измеряется одним из электрических методов: электродинамическим, индукционным, электростатическим или электромагнитным.

3.2. ТЕОРИЯ РОТАЦИОННЫХ ВИСКОЗИМЕТРОВ

Ротационные приборы обладают большей универсальностью по сравнению с капиллярными, так как наряду с вязкостью и предельным напряжением сдвига позволяют измерять другие реологические характеристики. Для маловязких жидкостей они используются редко, зато для измерения характеристик высоковязких, вязкопластичных и т. п. систем они нашли чрезвычайно широкое применение.

Теория ротационной реометрии использует принципиально те же допущения и ограничения, которые были рассмотрены в теории капиллярной вискозиметрии: гипотезы сплошности и непрерывности; нулевая скорость жидкости на стенке неподвижного цилиндра и равенство окружной скорости и скорости стенки вращающегося цилиндра; жидкость считается изотропной: движение должно быть установившееся, т. е. характерные параметры зависят только от координат рассматриваемой точки, но не зависят от времени; режим движения в коаксиальном зазоре должен быть ламинарным, турбулизация потока не допускается.

Для коаксиального зазора ротационного вискозиметра, имея в виду, что линейная скорость u элементарного слоя и угловая скорость ω на расстоянии r (в м) от оси вращения связаны соотношением $u = \omega r$, критерий Рейнольдса приобретает вид:

$$Re = \rho \Omega R^2 / \eta = \Omega R^2 / \nu, \quad (3.2)$$

где ρ — плотность, кг/м³; Ω и R — соответственно угловая скорость (в с⁻¹) и радиус вращающегося цилиндра (в м); если вращается внутренний цилиндр, то они имеют индекс «в», наружный — индекс «н» (обычно рассматривается вращение внутреннего цилиндра, поэтому угловая скорость дается без индекса, а внутренний и наружный радиусы имеют указанные индексы); η — динамическая вязкость, Па · с; $\nu = \eta / \rho$ — кинематическая вязкость, м²/с.

При работе на ротационных вискозиметрах, если вращается внутренний цилиндр, комплекс Ω_n / ν не должен превышать $70 \cdot 10^4$ м⁻², если наружный — $0,1900 / [R_n(R_n - R_v)]$.

Часто при измерении реологических характеристик вязкопластичных дисперсных систем возможно проскальзывание рабочей поверхности относительно продукта [2]. Во избежание этого рабочие поверхности изготавливают рифлеными. Например, вискозиметр «Реотест» с гладким ротором оказался непригодным для измерения вязкости измельченного на волчке мяса. Для колбасных фаршей, особенно повышенной влажности, в области не очень высоких градиентов скорости этот прибор применим и дает показания, совпадающие с данными, полученными на ротационном вискозиметре Воларовича [5]. Для шоколадных масс при градиентах скорости от 2 до 30 с⁻¹ показания двух названных приборов также совпадают [12].

Ротационные вискозиметры — первичные, теоретически обоснованные приборы, позволяющие получить практически однородные поля напряжений и деформаций при сколь угодно малых и больших деформациях сдвига. Значения характеристик получают исходя из параметров прибора и результатов эксперимента. Однако возможна градуировка прибора по эталонной жидкости, например по касторовому маслу или сахарному раствору. Применение anomalно вязких систем для градуировки нецелесообразно в связи с тем, что возможны существенные ошибки как при градуировке, так и при использовании этих данных для расчета характеристик натуральных систем. При исследовании структурно-механических свойств с помощью ротационных вискозиметров особо важное значение приобретают верный учет и выбор размеров рабочих органов прибора, математической модели для обобщения экспериментальных данных, влияния торца цилиндра на показания прибора, толщины градиентного слоя и величины градиента скорости.

Размеры измерительных роторов могут влиять на показания прибора. В литературе пока нет общего мнения на этот счет, однако некоторые рекомендации по выбору размеров рабочих органов приборов можно сформулировать следующим образом: оптимальной будет наименьшая величина кольцевого рабочего зазора, при которой сдвиг распространяется на всю толщину материала, но при равномерном распределении давления по высоте зазора. Последнее уменьшает предпосылки проявления эффекта Вайссенберга. Величина зазора должна быть на порядок выше размера частиц, чтобы исключить механическое заклинивание при измерениях и иметь равномерно изменяющийся градиент скорости.

В вискозиметрах типа РВ-8 с уменьшением зазора уменьшается ошибка от возмущения потока вязкой жидкости, создаваемого стыком цилиндрической и сферической частей ротора. Например, для тонкоизмельченного мясного фарша оптимальное отношение наружного радиуса ротора R_v к внутреннему радиусу стакана R_n лежит в области 0,85—0,90 при радиусе ротора 0,016—0,018 м.

При разработке теории прибора исходная модель, выбранная для вывода интегральных расчетных формул, должна возможно более точно описывать существенные сдвиговые свойства тела в данной области напряжений и градиентов скорости. Следует отметить, что в паспортах к приборам РВ-8 и РВ-4 для расчета сдвиговых свойств приведены формулы, полученные исходя из модели Бингама. Эта модель применима к пралиновым конфетным массам [12]. Она же была использована для обобщений экспериментальных данных по мясным фаршам, хотя они следуют этой модели довольно приблизительно. Во всех случаях для обобщения экспериментальных данных можно рекомендовать в первом приближении уравнения, полученные из закона Ньютона, где вязкость может иметь смысл либо эффективной, либо ньютоновской [см. (2.10) и (2.24)].

Измерительный ротор соприкасается с продуктом не только боковой поверхностью, но и торцом. Сопrotивление на торце учитывают следующим образом: измерения проводят при двух-трех высотах продукта в рабочем зазоре; экстраполяция линий на графике крутящий момент — высота после пересечения с осью абсцисс дает в отрицательной области отрезок эквивалентной длины $h_{эки}$, который нужно прибавить к общему значению высоты продукта. Эквивалентная длина показывает высоту

цилиндрической части ротора, на которой сопротивления будут такие же, как на торце.

В некоторых конструкциях ротора вискозиметра «Реотест» плоский торец заменен вогнутой воздушной подушкой, что оправдало себя при работе с вязкими жидкостями. Для вязкопластичных систем такая форма неприемлема. При исследовании таких систем даже в зоне плоского торца возникают значительные нормальные напряжения, которые обуславливают выход продукта из зазора и наматывание его на внутренний цилиндр. Сжатый воздух в воздушной подушке резко усиливает эти эффекты. Для вязкопластичных систем, на наш взгляд, целесообразно применять вискозиметры с сочетанием измерительных плоскостей различной формы, например коническо-цилиндрические или полусфероцилиндрические. Ротационные вискозиметры типа РВ-8 системы Воларовича имеют сферический торец в сочетании с цилиндрической поверхностью (см. рис. 3.2, к).

В качестве типичного примера рассмотрим течение продукта в коаксиальном зазоре цилиндрического вискозиметра (см. рис. 3.2, а), который имеет неподвижный цилиндр (стакан) радиусом R_n и ротор радиусом R_b , вращающийся с угловой скоростью Ω (в с^{-1}). Текущее значение угловой скорости ω изменяется от $\omega = \Omega$ при R_b до $\omega = 0$ при R_n . Аналогично меняется окружная скорость на стенке цилиндра: от $w = \Omega R_b$ до $w = 0$.

При изучении деформационного поведения вязкопластичных тел в коаксиальном зазоре при достаточной его ширине можно обнаружить условно три деформируемых слоя (в ряде случаев слоев может быть более трех). Первый слой — у вращающегося цилиндра, имеет наибольший градиент скорости, во втором слое он постепенно уменьшается, а в третьем — практически равен нулю — здесь возможны деформации типа ползучести. У вязких и высоковязких жидкостей, а также у вязкопластичных тел при узком зазоре градиентный слой распространяется на всю ширину кольца.

Толщина градиентного слоя определяет величину градиента скорости. Если обозначить толщину градиентного слоя Δr , причем в общем случае $\Delta r \leq R_n - R_b$, то, зная окружную скорость боковой поверхности ротора w (в м/с)

$$w = \Omega R_b = 2\pi N R_b, \quad (3.3)$$

где N — частота вращения ротора, с^{-1} ,

градиент скорости $\dot{\gamma}$ ($1/\text{с}$) приближенно можно представить в виде линейной зависимости

$$\dot{\gamma} = w / (R_n - R_b) = w / \Delta r, \quad (3.4)$$

из которой видно, что толщина слоя определяет величину градиента. Поэтому в расчетных формулах под наружным радиусом R_n следовало бы понимать не геометрический радиус стакана, а радиус градиентного слоя, т. е. $R'_n = R_n + \Delta r$. Однако достаточно точно определить величину Δr чрезвычайно сложно, в связи с чем названный метод расчета (по R'_n) не получил распространения.

Истинный градиент скорости любого слоя на расстоянии r от оси вращения

$$\dot{\gamma} = \frac{du}{dr} = -\frac{d(\omega r)}{dr} = -\left(r \frac{d\omega}{dr} + \omega\right) = -r \frac{d\omega}{dr}, \quad (3.5)$$

где знак «—» показывает, что скорость при увеличении радиуса убывает.

Напряжение сдвига в коаксиальном зазоре возникает в результате относительного смещения слоев; ω характеризует вращение всего продукта как целого, поэтому в возникновении касательных напряжений не участвует и может быть опущена.

После разделения переменных и интегрирования выражения (3.5) в пределах от Ω до 0 и от R_b до R_n с учетом уравнения (3.3) получим логарифмический закон для вычисления градиента скорости:

$$\dot{\gamma} = \Omega / \left(2,3 \lg \frac{R_n}{R_b}\right) = 2\pi N / \left(2,3 \lg \frac{R_n}{R_b}\right). \quad (3.6)$$

Сравнивая выражения (3.4) и (3.6) с учетом уравнения (3.3), можно заметить, что градиент скорости определяется окружной скоростью вращения ротора, т. е.

$$\dot{\gamma} = a w, \quad (3.7)$$

где a — коэффициент, вычисляемый при различных способах расчета градиента скорости, м^{-1} (табл. 3.2).

3.2. Формулы для расчета градиента скорости

Вид формулы и название системы	Номер формулы	Значение коэффициента a , м^{-1}
Средний градиент	3.4	$1/\Delta r$, где $\Delta r = R_n - R_b$
Логарифмический градиент	3.6	$1/[R_b \cdot 2,3 \lg(R_n/R_b)]$
Градиент для ньютоновских жидкостей (индекс течения 1)	3.22	$2/[R_b \{1 - (R_b/R_n)^2\}]$
Градиент для степенной жидкости (псевдопластичная или дилатантная)	3.11	$2/[n R_b \{1 - (R_b/R_n)^{2/n}\}]$
То же, по [3]	—	$2/[n R_b \{(r/R_b)^{2/n} - (r/R_n)^{2/n}\}]$

Решение в общем виде, т. е. без определения заранее математической модели тела, дает теоретическую формулу:

$$\Omega = \frac{1}{2} \int_{\dot{\gamma}_0}^{\dot{\gamma}_n} \dot{\gamma}(\theta) d\theta, \quad (3.8)$$

где $\dot{\gamma}(\theta)$ — функция градиента скорости от напряжения сдвига.

Интегрирование уравнения течения степенной жидкости (2.21) с учетом (3.8) позволяет получить зависимость в consistentных переменных

$$\frac{M}{2\pi l R_n^2} = B_1^* \left\{ \frac{2\Omega}{n [1 - (R_b/R_n)^{2/n}]} \right\}^n, \quad (3.9)$$

где M — вращающий момент, $\text{кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}^2$; l — высота части ротора, соприкасающаяся с продуктом, или приведенная высота, м.

В последнем уравнении левый член представляет собой консистентную переменную — напряжение сдвига на внутреннем вращающемся роторе:

$$\theta = M/(2\pi l R_0^2). \quad (3.10)$$

Правый член в фигурных скобках — консистентная переменная — градиент скорости на роторе:

$$\dot{\gamma} = 2\Omega_1/n[1 - (R_n/R_n)^{2/n}]. \quad (3.11)$$

Уравнение (3.9) можно представить через эффективную вязкость при единичном градиенте скорости:

$$\frac{M}{2\pi l R_0^2} = B_0^* \dot{\gamma}_1 \left\{ \frac{2\Omega_1}{\dot{\gamma}_1 n [1 - (R_n/R_n)^{2/n}]} \right\}^n, \quad (3.12)$$

где B_0^* — эффективная вязкость (в $\text{Па} \cdot \text{с}$), соответствующая относительному градиенту скорости, равному единице ($\dot{\gamma}_* = \dot{\gamma}/\dot{\gamma}_1 = 1$); $\dot{\gamma}_1 = 2\Omega_1/n[1 - (R_n/R_n)^{2/n}]$ — единичное (постоянное, но произвольно выбранное) значение градиента скорости, с^{-1} ; $\Omega_1 = 2\pi N_1$ — соответствующее единичному значению градиента скорости значения угловой скорости (рад/с) и частота вращения ротора (с^{-1}) [см. уравнения (2.23) и (2.24)].

При индексе течения, равном единице, формула превращается в уравнение движения ньютоновской жидкости в кольцевом зазоре. Градиент скорости можно представить в виде функции окружной скорости (3.7) с учетом (3.3).

Недостаток уравнения (3.9) заключается в том, что оно не дает возможности проследить изменения переменных (угловой скорости, окружной скорости, градиента скорости) по слоям коаксиального зазора.

Для математического описания соответствующих эпюр выделим элементарный слой на расстоянии r от оси вращения ($R_n \leq r \leq R_w$). Напряжения, обусловленные проявлением сил вязкого сопротивления [уравнение (2.21)], для коаксиального зазора могут быть описаны выражением

$$\theta = B_1^* \left(-r \frac{d\omega}{dr} \right)^n. \quad (3.13)$$

Эпюра угловых скоростей в коаксиальном зазоре выражается зависимостью [6]

$$\omega = \Omega \left(\frac{R_n}{r} \right)^{2/n} \frac{[1 - (r/R_w)^{2/n}]}{[1 - (R_n/R_w)^{2/n}]}. \quad (3.14)$$

Эта формула может быть представлена в несколько другом виде, если числитель и знаменатель разделить на $(R_n/R_w)^{2/n}$ и числитель умножить на $(R_n/r)^{2/n}$:

$$\omega = \Omega \frac{(R_n/r)^{2/n} - 1}{(R_n/R_w)^{2/n} - 1}. \quad (3.15)$$

Из соотношения (3.14) с учетом того, что $u = \omega r$ и $\omega = \Omega R_n$, получаем эпюры окружных скоростей в коаксиальном зазоре:

$$u = \Omega R_n \left(\frac{R_n}{r} \right)^{\frac{2-n}{n}} \frac{[1 - (r/R_w)^{2/n}]}{[1 - (R_n/R_w)^{2/n}]}. \quad (3.16)$$

Из соотношения (3.5) получаем эпюру градиентов скоростей в коаксиальном зазоре:

$$\dot{\gamma} = \left(\frac{R_n}{r} \right)^{2/n} \frac{2\Omega}{n[1 - (R_n/R_w)^{2/n}]}. \quad (3.17)$$

Эпюры по приведенным формулам представлены на рис. 3.6, который выполнен в масштабе для одинаковых геометрических и кинематических параметров. Достоинство формул заключается в том, что в них не входят динамические факторы (вязкость и др.), а эпюры определяются только геометрическими, кинематическими параметрами и индексом течения.

Модель Гершеля — Балкли (2.39) для коаксиально-цилиндрического вискозиметра имеет вид:

$$\theta = \theta_0 + B_1^* \left(-r \frac{d\omega}{dr} \right)^n, \quad (3.18)$$

где $\theta_0 = M/(2\pi l R_0^2)$ — предельное напряжение сдвига, Па; R_0 — радиус градиентного слоя, м.

Для определения градиента скорости любого слоя авторами совместно с В. М. Шукиным при условии $\theta_0/\theta = (r/R_0)^2$ получены две зависимости. Первая справедлива при четном целочисленном значении $y = (2/n) + 1$, вторая — при нечетном целочисленном значении $y = (2/n) + 1$, т. е. $n = 2; 1; 2/3; 2/4; 2/5; 2/6; 2/7; 2/8; 2/9; 2/10; 2/11$; соответствующие им значения $y = 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 11; 12$.

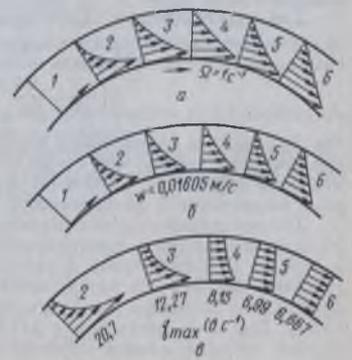


Рис. 3.6. Распределение угловых скоростей (а), окружных скоростей (б) и градиентов скоростей (в) в коаксиальном зазоре цилиндрического вискозиметра для степенной жидкости с различным индексом течения:
1 — 0; 2 — 0,1; 3 — 0,2; 4 — 0,5; 5 — 1,0;
6 — 100

Четное значение y :

$$\dot{\gamma} = \Omega \frac{[\sqrt{1-(r/R_0)^2}]^{-1} \frac{r}{R_0} - \sum_{i=1}^{\frac{n+2}{4}} \left(\frac{r}{R_0}\right)^{2i-2} [\sqrt{1-(r/R_0)^2}]^{4i-4} + \frac{\frac{n}{2} - \arcsin\left(\frac{R_0}{R_n}\right) - \sum_{i=1}^{\frac{n}{4}} \frac{1}{4i-3} \left[\left(\frac{R_0}{R_n}\right)^2 - 1\right]^{4i-3} + \sum_{i=1}^{\frac{n+2}{4}} \left(\frac{r}{R_0}\right)^{2i-2} [\sqrt{1-(r/R_0)^2}]^{4i-2}}{\sum_{i=1}^{\frac{n+2}{4}} \frac{1}{4i-1} \left[\left(\frac{R_0}{R_n}\right)^2 - 1\right]^{\frac{4i-1}{2}}} \quad (3.19)$$

Нечетное значение y :

$$\dot{\gamma} = \Omega \frac{1 - \sum_{i=1}^{\frac{n+1}{4}} [\sqrt{1-(r/R_0)^2}]^{4i-4} (r/R_0)^{2-4i} + \sum_{i=1}^{\frac{n+2}{4}} [\sqrt{1-(r/R_0)^2}]^{4i-2} (r/R_0)^{-4i}}{\ln |R_n/R_0| - \sum_{i=1}^{\frac{n+1}{4}} \frac{1}{4i-2} [(R_0/R_n)^2 - 1]^{2i-1} + \sum_{i=1}^{\frac{n+2}{4}} \frac{1}{4i} [(R_0/R_n)^2 - 1]^{2i}} \quad (3.20)$$

Примечания: 1. Максимальное значение градиента на стенке ротора при $r = R_n$.

2. Суммирование ряда производится до максимального целого числа, которое меньше полученного значения. Например, при $n = 2/9$ $(n+2)/(4n) = 2,5$ — округляется до 2; при $n = 2/6$ $(n+1)/2 = 2/3$ — округляется до нуля.

Для модели Кэссона (2.16) градиент скорости

$$\dot{\gamma} = \Omega \frac{2(1/r - 1/R_0)^2}{\left(\frac{1}{R_n} - \frac{2}{R_0}\right)^2 - \frac{1+2 \ln(R_n/R_0)}{R_0^2}} \quad (3.21)$$

где R_0 — радиус градиентного слоя, в котором происходит относительное смещение частиц; при $r > R_0$ в продукте могут возникать деформации типа ползучести, но течение отсутствует (формула получена авторами совместно с В. М. Шукиным).

Для предельного случая (максимальное значение градиента) $r = R_n$.

В теоретических и практических работах по ротационной реометрии, в отличие от капиллярной реометрии, обычно не учитывают истинный градиент скорости (по зазору между цилиндрами или максимальный у внутреннего цилиндра) по формулам (3.11), (3.17), (3.19), (3.20) и (3.21). При этом оперируют с «кажущимся» градиентом скорости при индексе течения, равном единице [см. формулу (3.11)] для систем,

течение которых описывается самыми различными математическими моделями:

$$\dot{\gamma} = 2\Omega/[1 - (R_n/R_n)^2] \quad (3.22)$$

Например, Э. Г. Штайнер представляет модель Кэссона для ротационно-цилиндрических вискозиметров в следующем виде:

$$(1 + R_n/R_n)\sqrt{\dot{\gamma}} = (1/\sqrt{\eta_n})[(1 + R_n/R_n)\sqrt{\theta_c} - 2\sqrt{\theta_0}], \quad (3.23)$$

где $\dot{\gamma}$ — «кажущаяся» скорость сдвига [градиент скорости по формуле (3.22)], с^{-1} ; θ_c — максимальное напряжение сдвига на поверхности внутреннего цилиндра по формуле (3.10), Па.

Обработку экспериментальных данных проводят в координатах $(1 + R_n/R_n)\sqrt{\theta_c} - (1 + R_n/R_n)\sqrt{\dot{\gamma}}$. Семейство прямых линий показывает, что течение продукта соответствует модели Кэссона.

В практике реометрии используют различные рабочие поверхности, простые и составные. Крутящие моменты вне зависимости от математической модели течения продукта имеют одинаковое значение для каждой рабочей поверхности роторов. Они выражаются через геометрические размеры и консистентную переменную — напряжение сдвига:

$$\text{цилиндрическая поверхность} \quad M_{ц} = 2\pi R_n^3 h \theta; \quad (3.24)$$

$$\text{полусферическая поверхность} \quad M_{пс} = (\pi R_n^3/2) \theta; \quad (3.25)$$

$$\text{плоская поверхность — диск} \quad M_{па} = \frac{2}{3} \pi R_n^3 \theta; \quad (3.26)$$

$$\text{поверхности конус — конус и конус — плоскость} \quad M_{к} = \frac{2\pi R_n^3 \theta}{3 \sin \alpha}; \quad (3.27)$$

где h — высота контакта цилиндрической части ротора с продуктом, м; θ — напряжение сдвига на поверхности ротора, Па; α — половина угла при вершине вращающегося конуса, град.

Из приведенных уравнений при известном моменте легко определить консистентную переменную — напряжение сдвига θ .

Если форма измерительной поверхности составная, то общий прикладываемый крутящий момент M , измеряемый на валу ротора, равен сумме моментов на обеих поверхностях:

$$\text{плоскоцилиндрическая (см. рис. 3.2, а)} \quad M_{пц} = 2\pi R_n^3 \theta (h + R_n/3); \quad (3.28)$$

$$\text{полусфероцилиндрическая (см. рис. 3.2, б)} \quad M_{псц} = 2\pi R_n^3 \theta (h + \pi R_n/4); \quad (3.29)$$

коническо-цилиндрическая (см. рис. 3.2, в)

$$M_{\text{кц}} = 2\pi R_0^2 \theta [h + R_c^3 / (R_0^2 \cdot 3 \sin \alpha_0)]; \quad (3.30)$$

коническо-цилиндрическая (см. рис. 3.2, и)

$$M_{\text{кц}} = 2\pi R_0^2 \theta \left(h + \frac{R_c}{3 \sin \alpha} \right), \quad (3.31)$$

где R_c — среднегеометрический радиус между ротором и неподвижным стаканом (в м), определяемый по формуле $R_c = \sqrt{2R_0^2 R_0^2 / (R_0^2 + R_0^2)}$; α_0 — угол, лежащий между мало отличающимися углами α и β и вычисляемый по среднегеометрическому радиусу R_c , град.

По этим формулам эквивалентная высота для плоскоцилиндрического ротора $h_{\text{экв}} = R_0/3$, для полусфероцилиндрического $h_{\text{экв}} = \pi R_0/4$, для коническо-цилиндрического $h_{\text{экв}} = R_c^3 / (R_0^2 \cdot 3 \sin \alpha_0)$ и $R_0 / (3 \sin \alpha)$. Тогда комбинированные измерительные органы можно считать цилиндрическими, но высоту продукта в зазоре определять по приведенной высоте: $h_{\text{пр}} = h + h_{\text{экв}}$; общий крутящий момент — по углу закручивания торсиона (с предварительной градуировкой) либо, если привод ротора реализуется от падающих грузов, по моменту на шкиве: $M = m R_{\text{шкв}} g$ (где m — общая масса грузов за вычетом массы, точнее силы, на трение в подшипниках; $R_{\text{шкв}}$ — радиус шкива).

Формулами (3.24)–(3.31) можно пользоваться для расчета предельного напряжения сдвига θ_0 (в Па) для простых поверхностей и составных:

$$\theta_0 = \frac{M_{\text{нач}}}{2\pi R_0^2 h_{\text{пр}}}, \quad (3.32)$$

где $M_{\text{нач}}$ — момент, при котором начинается вращение ротора, Н·м; обычно его определяют на пересечении кривой течения с соответствующей координатной осью методом экстраполяции до нулевого значения градиента скорости.

Для развитого течения с увеличением прикладываемого извне момента увеличиваются напряжения на боковой поверхности ротора, но по радиусу коаксиального зазора уменьшаются. Это ведет к увеличению толщины градиентного слоя $R_0 - R_0$. При $r > R_0$ в продукте возможны деформации ползучести, а на границе при $r = R_0$ действуют напряжения сдвига, равные предельному напряжению сдвига. Из этих соображений можно определить

$$\theta_0 = \frac{M}{2\pi R_0^2 h_{\text{пр}}}, \quad (3.33)$$

где M — приложенный к ротору извне крутящий момент, Н·м.

Таким образом, наибольшее напряжение на боковой поверхности ротора $\theta_{\text{max}} = M / (2\pi R_0^2 h_{\text{пр}})$. Эпюра напряжений по радиусу описывается зависимостью $\theta(r) = M / (2\pi r^2 h_{\text{пр}})$. Сравнивая эти выражения, получим

$$\theta(r) / \theta_{\text{max}} = (R_0/r)^2; \quad \theta_0 / \theta_{\text{max}} = (R_0/R_0)^2 \text{ и т. д.} \quad (3.34)$$

Поскольку напряжения сдвига и крутящие моменты равны отношению квадратов радиусов, на экспериментальных реограммах обычно получают криволинейные зависимости.

Крутящий момент сил сопротивления, равный прикладываемому моменту и возникающий при относительном смещении слоев ньютоновской жидкости с вязкостью η или неньютоновской жидкости с эффективной вязкостью $\eta_{\text{эф}}$ между двумя коаксиальными цилиндрами, определяют по формуле Маргулиса:

$$M_{\text{ц}} = \eta \cdot 2\pi R_0^2 h \frac{2\Omega}{1 - (R_0/R_0)^2}. \quad (3.35)$$

Момент между двумя полусферами вычисляют по формуле А. Д. Сокольского:

$$M_{\text{пс}} = \eta \frac{\pi^2 R_0^3}{2} \frac{8\Omega}{\pi [1 - (R_0/R_0)^3]}. \quad (3.36)$$

Для степенной жидкости (коаксиальные полусферы) А. В. Горбатым и В. М. Шукиным [6] получено уравнение

$$M_{\text{пс}} = B_{\text{пс}}^* \frac{\pi^2 R_0^3}{2} \frac{8\Gamma^2 \left(\frac{n+3}{2} \right)}{\pi \Gamma(n+3)} \left\{ \frac{12\pi N}{\pi [1 - (R_0/R_0)^3]^{\lambda} \eta} \right\}^n, \quad (3.37)$$

где $B_{\text{пс}}^*$ — коэффициент, характеризующий эффективную вязкость при единичном значении градиента скорости; по аналогии с уравнением (3.12) ему может быть придан смысл эффективной вязкости при единичном значении градиента скорости; $\Gamma \left(\frac{n+3}{2} \right)$ и $\Gamma(n+3)$ — гамма-функция от индекса течения, ее значения приведены в табл. 3.3, где λ — числовое значение величины в скобках [2].

Для полной сферической поверхности правые части формул (3.36) и (3.37) удваивают.

Для двух конических поверхностей (см. рис. 3.2, д), где половина угла конуса неподвижной поверхности составляет величину β ;

$$M_{\text{к}} = \eta \frac{2\pi R_0^3}{3 \sin \alpha} \frac{2\Omega}{\sin \alpha f(\alpha, \beta)}, \quad (3.38)$$

где $f(\alpha, \beta)$ — функция углов;

3.3. Значение гамма-функции

x	$\Gamma(x)$	x	$\Gamma(x)$	x	$\Gamma(x)$
1,5	0,8862	2,6	1,4296	3,7	4,171
1,6	0,8935	2,7	1,5447	3,8	4,694
1,7	0,9086	2,8	1,6765	3,9	5,299
1,8	0,9314	2,9	1,8274	4,0	6,000
1,9	0,9618	3,0	2,0000	4,1	6,813
2,0	1,0000	3,1	2,1980	4,2	7,757
2,1	1,0465	3,2	2,424	4,3	8,855
2,2	1,1018	3,3	2,683	4,4	10,136
2,3	1,1667	3,4	2,981	4,5	11,632
2,4	1,2422	3,5	3,323	4,6	13,381
2,5	1,3293	3,6	3,717	4,7	15,431

для двух конических поверхностей

$$I(\alpha, \beta) = \frac{\cos \alpha}{\sin^2 \alpha} - \frac{\cos \beta}{\sin^2 \beta} + \ln \frac{\operatorname{tg}(\beta/2)}{\operatorname{tg}(\alpha/2)}, \quad (3.39)$$

для поверхностей конус — плоскость, т. е. при $\beta = 90^\circ$,

$$I(\alpha, 90^\circ) = \frac{\cos \alpha}{\sin^2 \alpha} - \ln \left(\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \right). \quad (3.40)$$

Для комбинированных поверхностей соответствующие моменты, действующие на простые поверхности, складываются по аналогии с уравнениями (3.28) — (3.31). Эти действия не представляют принципиальной трудности и поэтому нами не рассматриваются.

Таким образом, формулы (3.24) — (3.31) для различных поверхностей могут быть выражены через consistente переменную — напряжение сдвига — по аналогии с формулой (3.32). Тогда дифференциальная степенная зависимость (3.13) может быть представлена в интегральном виде через consistente переменные:

$$\theta = B^* \dot{\gamma}^n = B^* \dot{\gamma}_1^n = \dot{\gamma}^n = B^* \dot{\gamma}_1 (\dot{\gamma}/\dot{\gamma}_1)^n, \quad (3.41)$$

где $\dot{\gamma}_1$ — единичное (либо фиксированное) значение градиента скорости.

Значения consistente переменных — градиентов скорости для ньютоновских жидкостей при различной форме рабочих органов (см. рис. 3.2) определяются по следующим уравнениям:

для коаксиальных цилиндров

$$\dot{\gamma}_a = \frac{4\pi N}{1 - (R_o/R_n)^2}; \quad (3.42)$$

для коаксиальных сфер или полусфер

$$\dot{\gamma}_{nc} = \frac{16N}{1 - (R_o/R_n)^3}; \quad (3.43)$$

для конических поверхностей

$$\dot{\gamma}_k = \frac{4\pi N}{\sin^2 \alpha I(\alpha, \beta)}. \quad (3.44)$$

где N — частота вращения ротора, с^{-1} ; $I(\alpha, \beta)$ — функция углов, вычисляемая по зависимостям (3.39) и (3.40).

Для степенных жидкостей consistente градиенты скорости рассчитывают по формулам:

для цилиндрических поверхностей — по (3.11); для сферических и полусферических поверхностей — по формуле

$$\dot{\gamma} = \left[\frac{8\Gamma^2 \left(\frac{n+3}{2} \right)}{\pi \Gamma(n+3)} \right]^{1/n} \frac{12\pi N}{n[1 - (R_o/R_n)^{3/n}]} \quad (3.45)$$

Зависимости эффективной вязкости от градиента скорости для кривых течения представляют собой монотонно изменяющуюся функцию, т. е. при фиксированном значении градиента скорости существует одно

значение вязкости. Следовательно, для составных поверхностей ротора необходимо в зазоре иметь одинаковую величину градиента скорости.

Для степенной жидкости и распространенной комбинированной поверхности ротора — полусфероцилиндрической, используемой, например, в ротационных вискозиметрах Воляровича, представляет интерес совместное решение уравнений (3.11) и (3.45) с целью определения соотношения радиусов, удовлетворяющих условию одинакового значения градиента скорости. После упрощений расчетное уравнение приобретает вид:

$$\left[\frac{8\Gamma^2 \left(\frac{n+3}{2} \right)}{\pi \Gamma(n+3)} \right]^{1/n} \frac{3}{1-x^{3/n}} = \frac{1}{1-x^{3/n}},$$

где $x = R_o/R_n$ — отношение радиусов. При значениях индекса течения 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0 отношения радиусов имеют величины соответственно 0,949; 0,912; 0,865; 0,839; 0,795; 0,777; 0,735; 0,724; 0,683; 0,675.

При точном или хотя бы приблизительном соблюдении названных соотношений значения эффективной вязкости будут постоянны по всей измерительной поверхности и возмущений при переходе от одной поверхности к другой не будет.

Для других моделей течения: Гершеля — Балкли [(формулы (3.19) и (3.20)], Кэссона [формула (3.21)] — получены градиенты скорости, однако в практике ротационной реометрии ими обычно не пользуются.

Таким образом, для вычисления градиента скорости применение той или иной формулы должно быть обосновано экспериментально с учетом вида математической модели, описывающей деформационное поведение продукта. Следует отметить, что при вычислении градиента скорости по различным уравнениям графические зависимости эффективной вязкости от градиента скорости могут дать семейство линий и различные значения коэффициентов к расчетным уравнениям.

Представляет принципиальный интерес рассмотрение теории полусфероцилиндрических ротационных вискозиметров системы М. П. Воляровича (см. рис. 3.2, к), поскольку практически только эти приборы выпускают серийно в СССР. Здесь необходимо подчеркнуть, что представленные зависимости можно видоизменить применительно к другим типам ротационно-цилиндрических вискозиметров.

Основные теоретические зависимости [(3.24), (3.25), (3.35), (3.36), (3.42), (3.43)] применительно к названным приборам можно обобщить и расчет ньютоновской вязкости (η) или эффективной вязкости ($\eta_{\text{эф}}$) выполнить по формуле М. П. Воляровича:

$$\eta_{\text{эф}} = K \frac{m}{N}, \quad (3.46)$$

где K — постоянная прибора, $1/(\text{м} \cdot \text{с}^2)$; m — масса вращающихся ротора Грузов, кг (за вычетом величин, компенсирующих трение в подшипниках и поправку на инерционные моменты вращающихся деталей при неустановившемся движении); N — частота вращения ротора вискозиметра, с^{-1} .

При этом величина напряжения сдвига на роторе (в Па) определяется выражением

$$\theta = K_0 m, \quad (3.47)$$

где K_0 — постоянная прибора, $1/(m \cdot c^2)$.

При определении реологических характеристик по модели Шведова — Бингама возможны два случая.

1. Сдвиг распространяется на всю толщину кольца, когда масса сдвигающей нагрузки m_0 , при которой ротор начинает вращаться, больше массы $m' = K_1 \theta_0$ (где K_1 — постоянная прибора, $m \cdot c^2$), при которой сдвиг распространяется на всю толщину кольца. Тогда пластичную вязкость η (в Па·с) вычисляют по формуле

$$\eta = \frac{K}{N} (m - m_0), \quad (3.48)$$

где m — масса вращающихся ротор грузов, кг; m_0 — значение массы грузов, которое отсекается на оси абсцисс при экстраполяции к ней прямолинейного участка реограммы, кг.

2. Сдвиг не распространяется на всю толщину кольца, когда $m_0 \leq m'$. Тогда

$$\eta = \frac{\theta_0}{N} \frac{1}{4\pi} \left(\frac{m}{m_0} - 1 - \ln \frac{m}{m_0} \right),$$

или

$$\eta = \frac{\theta_0}{N} F \left(\frac{m}{m_0} \right), \quad (3.49)$$

где $\frac{1}{4\pi} \left(\frac{m}{m_0} - 1 - \ln \frac{m}{m_0} \right)$ обозначена функциональной зависимостью $F \left(\frac{m}{m_0} \right)$ и дана в табл. 3.4.

3.4. Значение функции для расчета пластичной вязкости по модели Шведова — Бингама в коаксиально-цилиндрических вискозиметрах

m/m_0	$F(m/m_0)$	m/m_0	$F(m/m_0)$	m/m_0	$F(m/m_0)$
1,1	0,000373	4,1	0,134474	7,1	0,329608
1,2	0,001407	4,2	0,140518	7,2	0,336456
1,3	0,002996	4,3	0,146606	7,3	0,343319
1,4	0,005058	4,4	0,152737	7,4	0,350198
1,5	0,007527	4,5	0,158910	7,5	0,357091
1,6	0,010350	4,6	0,165122	7,6	0,363998
1,7	0,013485	4,7	0,171371	7,7	0,370919
1,8	0,016896	4,8	0,177657	7,8	0,377854
1,9	0,020553	4,9	0,183977	7,9	0,384801
2,0	0,024431	5,0	0,190330	8,0	0,391761
2,1	0,028508	5,1	0,196715	8,1	0,398734
2,2	0,032766	5,2	0,203131	8,2	0,405719
2,3	0,037188	5,3	0,209576	8,3	0,412716

Продолжение

m/m_0	$F(m/m_0)$	m/m_0	$F(m/m_0)$	m/m_0	$F(m/m_0)$
2,4	0,041762	5,4	0,216049	8,4	0,419724
2,5	0,046473	5,5	0,222550	8,5	0,426743
2,6	0,051312	5,6	0,229077	8,6	0,433774
2,7	0,056269	5,7	0,235630	8,7	0,440815
2,8	0,061335	5,8	0,242207	8,8	0,447867
2,9	0,066503	5,9	0,248808	8,9	0,454929
3,0	0,071766	6,0	0,255431	9,0	0,462001
3,1	0,077117	6,1	0,262077	9,1	0,469083
3,2	0,082551	6,2	0,268744	9,2	0,476175
3,3	0,088063	6,3	0,275432	9,3	0,483276
3,4	0,093648	6,4	0,282140	9,4	0,490386
3,5	0,099301	6,5	0,288867	9,5	0,497505
3,6	0,105020	6,6	0,295613	9,6	0,504633
3,7	0,110801	6,7	0,302378	9,7	0,511770
3,8	0,116639	6,8	0,309160	9,8	0,518915
3,9	0,122533	6,9	0,315959	9,9	0,526068
4,0	0,128479	7,0	0,322775	10,0	0,533230

Примечание. Приведены высокие значения m/m_0 в связи с тем, что современная техника позволяет измерять время (с записью на приборе) с точностью 0,01 с [1]; при механическом приводе ротора (вискозиметр «Реотест» и др.) также возможны высокие значения аргумента m/m_0 .

При вычислениях по формулам (3.48) и (3.49) значения величин удобнее брать непосредственно по кривой $N(m)$, которую в процессе расчета корректируют. При этом значения m/m_0 следует принимать с интервалом 0,1, чтобы использовать табличные данные без интерполяции. Если по формуле (3.49) значения пластичной вязкости увеличиваются или уменьшаются, а она должна быть постоянной, то следует изменить величину предельного напряжения сдвига. В окончательном виде кривая должна плавно проходить около всех опытных точек. При этом количество точек с каждой стороны кривой должно быть примерно одинаковым, или, что более точно, сумма положительных и отрицательных отклонений должна быть равна нулю (по среднеарифметическому методу).

Постоянные в уравнениях (3.46) — (3.49) определяют по зависимостям, в которые входит поправка на сферический торец ротора:

$$\left. \begin{aligned} K &= R_{шк} g / \left[8\pi^2 \left(\frac{R_1^2 R_2^2}{R_1^2 - R_2^2} h + \frac{R_1^2 R_2^2}{R_1^2 - R_2^2} \right) \right]; \\ K_0 &= \frac{R_{шк} g}{2\pi R_1^2 (h + \pi R_1/4)}; \\ K_1 &= 2\pi R_1^2 h / (R_{шк} g), \end{aligned} \right\} \quad (3.50)$$

где $R_{шк}$ — радиус шкива ($R_{шк} = 0,02235$ м); g — ускорение силы тяжести ($g = 9,81$ м/с²); R_1 — внутренний радиус стакана ($R_1 = 0,019$ м); R_2 — радиус ротора ($R_2 = 0,01605$ м); h — глубина погружения ротора в продукт, м.

Примечание. В скобках даны размеры вискозиметра РВ-8; для различных выпусков прибора возможны некоторые колебания размеров.

Эти константы можно вывести из полученных ранее уравнений (3.35) и (3.36) для крутящих моментов и уравнения (3.29) для напряжений сдвига. Для комбинированных измерительных поверхностей, например для полусфероцилиндрической, константу K можно считать по цилиндрической поверхности:

$$K = R_{\text{шк}} g / \left(8\pi^2 \frac{R_n^2 R_n^2}{R_n^2 - R_s^2} h_{\text{пр}} \right), \quad (3.51)$$

где приведенная высота $h_{\text{пр}} = h + h_{\text{эки}}$ и

$$h_{\text{эки}} = \frac{R_n + R_s}{R_n/R_n + R_s/R_s + 1} \approx \frac{R_n + R_s}{3}. \quad (3.52)$$

При соотношении радиусов 0,7 и более общая ошибка при определении константы по приближенному значению эквивалентной высоты не превышает 0,5%. Если ее вычислять по константе напряжения сдвига, то ошибка не превышает 1–2%.

В формулах (3.48) и (3.46) содержится некоторая ошибка, которая обусловлена тем, что при выводе константы напряжения сдвига действительная криволинейная эпюра напряжений по высоте полусферы заменена эквивалентной прямолинейной. Для приведенных размеров вискозиметра эта ошибка составляет около 1%.

По аналогии с выводом констант для полусфероцилиндрического вискозиметра [формулы (3.50)] из тех соображений можно получить подобные константы для других комбинированных геометрических форм роторов.

Если ротор приводится во вращение с заранее заданной постоянной скоростью, а крутящий (вращающий) момент измеряют торсионом (например, у вискозиметра «Реотест»), то необходима градуировка торсиона. Она может быть выполнена с помощью грузов, которые через блоки нитью соединены с ротором. Как показывает практика, статическая и динамическая градуировка дает практически совпадающие результаты. Вращающий момент в формулах (3.35) и др. определяется выражением

$$M = K^* \alpha, \quad (3.53)$$

где K^* — константа торсиона (Н·м), определяемая градуировкой; α — угол закручивания по шкале регистрирующего прибора.

Вискозиметр «Реотест» имеет выход для подключения автоматического прибора, записывающего величину крутящего момента.

В общем случае, когда математическая модель деформационного поведения продукта неизвестна, основываясь на зависимости (3.7), эффективную вязкость можно выразить через окружную скорость w (в м/с) вращения ротора:

$$\eta_{\text{эф}} = B(\omega/\omega_1)^{n-1} = B\omega_*^{1-n}, \quad (3.54)$$

где B — эффективная вязкость, Па·с, при относительной окружной скорости $\omega_* = 1$; ω_1 — единичное значение окружной скорости, м/с

(аналогично единичному значению градиента скорости $\dot{\gamma}_1$); $m = 1 - n$ — темп разрушения структуры.

Переход к вязкости $B\dot{\gamma}$ (Па·с) для квазиньютоновской жидкости (см. табл. 3.2) с учетом зависимости (3.22) можно выполнить по формуле

$$B\dot{\gamma} = B\{\dot{\gamma}_1 R_n [1 - (R_s/R_n)^2] / (2\omega_1)\}^{-m}. \quad (3.55)$$

В качестве методически общего примера перехода от вязкости B по (3.54) к вязкости $B\dot{\gamma}$ по (2.24) ниже приведены преобразования, выполненные для вискозиметра РВ-8, который имеет размеры, показанные в пояснении к формулам (3.50). По формуле (3.42) с учетом уравнения (3.3) найдем

$$\dot{\gamma} = aN = 43,85 \frac{\omega}{2\pi R_n} = 435\omega, \quad (3.56)$$

где a — коэффициент, равный 43,85.

Для $\dot{\gamma}_1 = 1$ из предыдущего соотношения $\omega_1 = 0,0023$ м/с, причем $\dot{\gamma}_1 = a\omega_1$. Перепишем уравнение (3.54) в следующем виде:

$$\eta_{\text{эф}} = B \left[\frac{1}{(\omega/\omega_1)(\omega'/\omega_1)} \right]^m \frac{B}{(\omega_1/\omega_1)^m} \left(\frac{1}{\omega/\omega_1} \right)^m = B\dot{\gamma} \left[\frac{1}{(\dot{\gamma}/a)(1/\omega_1)} \right]^m = B\dot{\gamma} \left(\frac{1}{\dot{\gamma}/\dot{\gamma}_1} \right)^m, \quad (3.57)$$

где $\omega_1 = 1$ м/с; $\dot{\gamma} = a\omega$.

Таким образом, эффективная вязкость при единичном значении градиента скорости для рассматриваемого примера описывается следующим уравнением:

$$B\dot{\gamma} = B \left(\frac{\omega_1}{\omega_1} \right)^{-m} = B \left(\frac{0,0023}{1} \right)^{-m}. \quad (3.58)$$

Если градиент скорости вычислен по какой-либо другой зависимости, например по уравнению (3.4), то $a = 340$ и $\omega_1 = 0,00295$ м/с; арифметические вычисления выполняются аналогично.

Приведенные преобразования показывают роль вида зависимости для определения градиента скорости. Этими причинами, вероятно, обусловлено мнение о несовместимости данных ротационной и капиллярной вискозиметрии, в которых градиент скорости и другие реологические характеристики вычисляли для различных условий и моделей течения.

Теоретические основы обобщения экспериментальных данных, полученных с помощью коаксиально-цилиндрических вискозиметров по течению степенной жидкости, имеют свою специфику. В этом случае уравнение (3.10) можно представить в более простой форме, учитывая, что $\Omega = 2\pi N$:

напряжение сдвига в общем виде

$$\theta = \frac{M}{2\pi R_n^2 h_{\text{пр}}}; \quad (3.59)$$

для вискозиметра РВ-8

$$\theta = \frac{gR_{\text{шк}}}{2\pi R_0^2} \frac{m}{h_{\text{пр}}}; \quad (3.60)$$

правая часть уравнения (3.10)

$$B^* \dot{\gamma}^{1-n} \left\{ \frac{4\pi}{n[1-(R_b/R_n)^{2/n}]} \right\}^n N^n = B^* N^n \quad (3.61)$$

Тогда

$$\theta = B^* N^n, \quad (3.62)$$

или для вискозиметра РВ-8

$$\theta/K_0 = m = B_m N^n, \quad (3.63)$$

где $B^* = B_0 \dot{\gamma}_0^{1-n} \left\{ \frac{4\pi}{n[1-(R_b/R_n)^{2/n}]} \right\}^n$; K_0 — константа прибора, вычисляемая по формуле (3.50).

Примечание. Индекс, отличающий коэффициенты B и градиенты скорости степенной жидкости от ньютоновской, условно опущен.

Уравнение (3.62) решают графоаналитически. При этом определяют коэффициенты B^* и n в логарифмических шкалах. Затем вычисляют B^* по формуле

$$B^* = B^* \dot{\gamma}_0^{1-n} \left\{ \frac{n}{4\pi} [1-(R_b/R_n)^{2/n}] \right\}^n = B^* \dot{\gamma}_0^{1-n} f_1(n, R_b/R_n), \quad (3.64)$$

где $f_1(n, R_b/R_n)$ — выражение в фигурной скобке в степени n (рис. 3.7, а).

Для коаксиально-сферического или полусферического вискозиметра при исследовании течения степенной жидкости с учетом уравнения (3.37) по аналогии с предыдущим имеем

$$\theta = B_{\text{пс}} N^n, \quad (3.65)$$

где θ — напряжение сдвига, определяемое по формулам: $\theta = 2M/(\pi^2 R_0^3)$ — для полусферического вискозиметра; $\theta = M/(\pi^2 R_0^3)$ — для сферического вискозиметра; $B_{\text{пс}}$ — вязкость и n — индекс течения, определяемые графоаналитически.

Тогда действительное, инвариантное значение эффективной вязкости по формуле (3.37) для единичного значения градиента скорости можно вычислить по уравнению

$$B^* = B_{\text{пс}} \dot{\gamma}_{\text{пс}}^{1-n} \frac{\pi \Gamma(n+3)}{8 \Gamma^2\left(\frac{n+3}{2}\right)} \left\{ \frac{n}{12\pi} [1-(R_b/R_n)^{2/n}] \right\}^n = B_{\text{пс}} \dot{\gamma}_{\text{пс}}^{1-n} f_1(n, R_b/R_n), \quad (3.66)$$

где $f_1(n, R_b/R_n)$ — гамма-функция от индекса течения и отношения радиусов сфер (рис. 3.7, б); $\dot{\gamma}_{\text{пс}}$ — единичное значение градиента скорости.

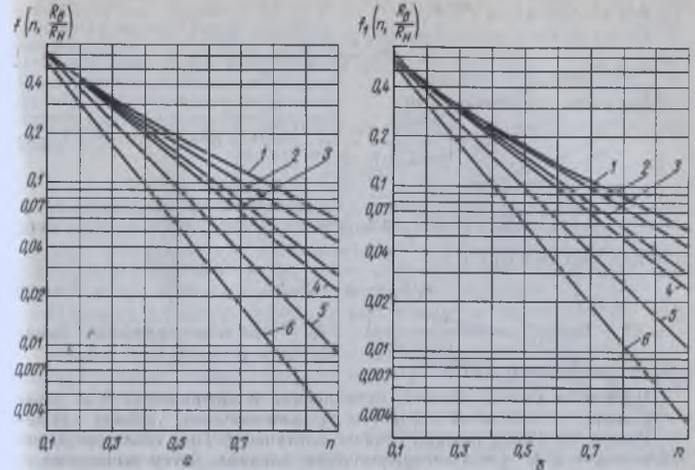


Рис. 3.7. График для определения функции течения в ротационных коаксиально-цилиндрических (а) и коаксиально-сферических (б) вискозиметрах в зависимости от индекса течения при различных отношениях радиусов роторов: 1—0,50; 2—0,675; 3—0,81; 4—0,85; 5—0,94; 6—0,98

При многократных расчетах полученные выше зависимости удобнее привести к виду уравнения (3.46). Применительно к коаксиальному полусфероцилиндрическому вискозиметру

$$\eta_{\text{эф}} = K'_{\text{ст}} \frac{M}{N} = K'_{\text{ст}} \frac{mgR_{\text{шк}}}{N} = K'_{\text{ст}} \frac{m}{N}, \quad (3.67)$$

где $K'_{\text{ст}}$ — константа вискозиметра для степенной жидкости, м^{-3} ; $M = mgR_{\text{шк}}$ — вращающий момент, $\text{Н} \cdot \text{м}$; N — частота вращения ротора, с^{-1} ; $K_{\text{ст}} = K'_{\text{ст}} g R_{\text{шк}}$ — константа вискозиметра с падающими грузами (типа вискозиметра РВ-8) для степенной жидкости, $\text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-2}$.

Приведенная высота ротора $h_{\text{пр}}$ состоит из высоты цилиндрической части h , контактирующей с продуктом, и эквивалентной высоты $h_{\text{экв}}$, которая представляет собой цилиндрическую поверхность, причем момент сопротивления вращению на ней равен моменту сопротивления вращению полусферической поверхности:

$$h_{\text{пр}} = h + h_{\text{экв}} = h + \frac{\pi R_0}{4} f_2(n, R_b/R_n). \quad (3.68)$$

Функция течения определяется по зависимости

$$f_2(n, R_b/R_n) = \left[\frac{8 \Gamma^2\left(\frac{n+3}{2}\right)}{\pi \Gamma(n+3)} \right]^{1/n} \left\{ \frac{3[1+(R_b/R_n)^{1/n}]}{1+(R_b/R_n)^{1/n} + (R_b/R_n)^{2/n}} \right\}, \quad (3.69)$$

которая для удобства вычислений приведена на рис. 3.8, а.

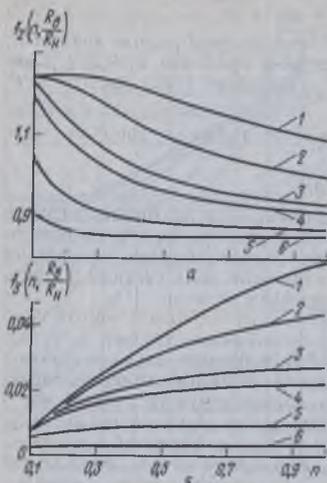


Рис. 3.8. Графики для определения функций течения при расчете эквивалентной высоты (а) и вязкостной константы (б) в коаксиальных полусферическоцилиндрических вискозиметрах в зависимости от индекса течения при различных отношениях радиусов роторов: 1—0,50; 2—0,675; 3—0,81; 4—0,85; 5—0,94; 6—0,98

Вязкостную константу вискозиметра вычисляют по уравнению

$$K_{ст} = \frac{I(n, R_n/R_n) \cdot 1}{2\pi R_n^2 \cdot h_{пр}} \quad (3.70)$$

где $f_3(n, R_n/R_n) = \frac{n}{4\pi} [1 - (R_n/R_n)^2/\eta]$ — функция течения (рис. 3.8, б).

При индексе течения, равном единице, формулы (3.67)–(3.70) принимают вид (3.46)–(3.50).

Существенное значение в теории ротационной реометрии имеет учет инерции вращающихся масс прибора. В приборах с электро-

(гидро-)приводом инерция сказывается в начальный, неустановившийся период разгона ротора и в определенной мере зависит от жесткости динамометра (торсиона), как, например, у вискозиметра «Рео-тест». В вискозиметрах, привод которых осуществляется от падающих грузов, например в вискозиметрах системы М. П. Воларовича, при малой продолжительности измерения (доли секунды) поправка на инерционность масс может иметь существенное значение. В. Г. Проселков и Ю. В. Самусенко [14] аналитически определили величину инерционной поправки для вискозиметра РВ-8, размеры рабочих органов которого указаны в пояснении к формулам (3.50), а общая масса вращающихся деталей составляла 0,588 кг.

Момент инерции I (в $\text{кг}\cdot\text{м}^2$) определялся по следующим зависимостям:

- для сплошных цилиндров $I = 0,5mR^2$;
- для сплошных полусфер $I = 0,2mR^2$;
- для полых цилиндров $I = 0,5m(R^2 + R_1^2)$,

где m — масса соответствующей детали, кг; R — наружный радиус детали, м; R_1 — внутренний радиус детали, м.

Суммарный момент инерции вращающихся деталей $I = 75,773 \times 10^{-6} \text{ кг}\cdot\text{м}^2$.

Крутящий момент от сил инерции $M_{ин}$ (в Н·м) определяется зависимостью

$$M_{ин} = \pi I \rho z / \tau^2, \quad (3.71)$$

а соответствующая ему масса грузов $m_{ин}$ (в кг) для вискозиметра РВ-8

$$m_{ин} = \pi I \rho z / (R_{шк} g \tau^2), \quad (3.72)$$

где z — общее число оборотов при неустановившемся режиме вращения; τ — длительность неустановившегося режима вращения, с; $R_{шк}$ — радиус приводного шкива к ротору, м; g — ускорение силы тяжести, $\text{м}/\text{с}^2$ ($g = 9,81 \text{ м}/\text{с}^2$).

Расчеты показывают, что при пяти оборотах ротора формула (3.72) имеет вид:

$$m_{ин} = 2,713 \cdot 10^{-3} / \tau^2.$$

Отсюда видно, что при большой длительности измерения поправка мала и даже меньше соответствующей величины трения в подшипниках. Однако, например, для вискозиметра с автоматическим измерением длительности падения грузов (доли или сотые доли секунды за пять оборотов) она может составить существенную величину [1].

Поправка на инерционность входит в качестве вычитаемого в формулы для крутящего момента или массы падающих грузов.

Наряду с определением характеристик в области лавинного разрушения структуры ротационные вискозиметры позволяют измерять характеристики в зоне практически не разрушенных структур (модули упругости, периоды релаксации и проч.). Измерения начинают после тиксо-тропного восстановления структуры. Величины деформаций отсчитывают по отклонению стрелки с помощью микроскопа или специальной лупы. Опыт проводят при небольших сдвигающих усилиях, меньших, чем предельное напряжение сдвига, с интервалом записи деформаций 10–20 с.

Модули упругости при сдвиге G (в Па) определяют по закону Гука и графическим зависимостям относительной деформации от времени действия постоянного напряжения.

$$\theta = \gamma G, \text{ или } G = \frac{l}{\gamma \theta}, \quad (3.73)$$

где θ — напряжение сдвига, Па; γ — относительная деформация продукта; γ/θ — относительная деформация, приведенная к единице напряжения сдвига, $1/\text{Па}$;

$$\gamma = \frac{\delta}{\Delta R} \cdot \frac{R_n}{l},$$

где δ — отклонение стрелки прибора, м; $\Delta R = R_n - R_v$ — толщина слоя продукта между стаканом и ротором, м; R_v, R_n — радиусы соответственно ротора и стакана; l — длина стрелки, м.

Наибольшую эффективную вязкость η'_0 (в Па·с), соответствующую началу вязкопластичного течения, находят по уравнению Ньютона:

$$\eta'_0 = \frac{\theta}{\Delta \gamma / \Delta \tau}, \text{ или } \eta'_0 = \frac{\Delta \tau}{\Delta \gamma / \theta}, \quad (3.74)$$

где $\Delta \tau$ — интервал времени, с; $\Delta \gamma / \Delta \tau$ — скорость деформации для прямолинейного участка кривой или аппроксимированного к прямой криволинейного участка с небольшой выпуклостью.

Таким образом, рассмотренные вопросы теории ротационной реометрии позволяют обоснованно обобщать экспериментальные данные с целью получения объективных характеристик пищевых продуктов.

3.3. КОНСТРУКЦИИ РОТАЦИОННЫХ ВИСКОЗИМЕТРОВ И РАБОТА НА НИХ

В технической литературе описано множество конструктивных решений ротационных вискозиметров различных типов [2, 8]. Здесь приведены описания конструкций вискозиметров, нашедших применение при изучении реологических свойств пищевых материалов.

Реометр Штормера (рис. 3.9) является наиболее простым прибором, на котором измеряют частоту вращения рабочего ротора за определенное время при постоянном напряжении сдвига. Принцип работы прибора следующий. Испытуемый материал помещают в неподвижный внешний цилиндр 1, затем поднимают его на штативе 8 до такого положения, при котором вращающийся внутренний цилиндр 2 погрузится на определенную высоту в материал. Вращение цилиндра осуществляется за счет падающего груза 7, подвешенного на нити, перекинутой через блок 6 и барабан 5. Момент от барабана передается через зубчатую передачу 4 на ось рабочего цилиндра. Таким образом, испытание проводится при известном крутящем моменте (напряжении сдвига), а частоту вращения ротора определяют по счетчику 3. Большим пре-

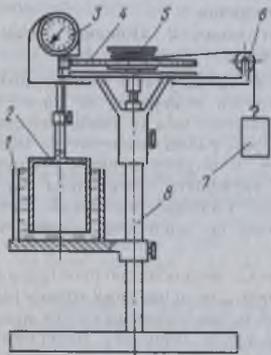


Рис. 3.9. Вискозиметр Штормера

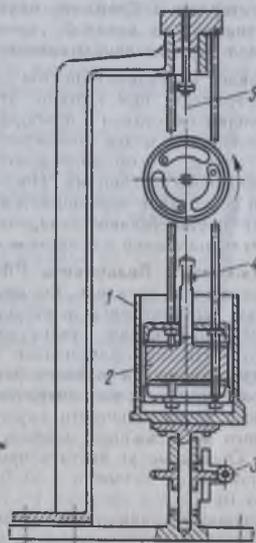


Рис. 3.10. Вискозиметр Гатчека

имуществом такого прибора является простота конструкции, а недостатком — короткое время для замера, равное продолжительности падения груза.

Вискозиметр Гатчека (рис. 3.10) — классический реометр, в котором приводится во вращение внешний цилиндр 1, а замеряется угол поворота внутреннего цилиндра 2, подвешенного на упругой нити 5. Угол поворота измеряется по отклонению светового луча при помощи зеркала 4, прикрепленного к нити. Вращение цилиндра 1 с пищевой массой осуществляется приводом 3.

Вискозиметр Реутова (рис. 3.11) нашел широкое применение в практике технологических лабораторий кондитерских предприятий. На нем определяется вязкость шоколада и других мало-вязких жидкообразных масс. От электродвигателя, установленного в корпусе 7, через редуктор вращение передается подставке 6, на которую устанавливают стакан 5 с испытуемым продуктом. В образец массы погружен свободно подвешенный на валике 4 металлический ротор в форме цилиндра с коническими торцовыми поверхностями. Валик укреплен в вилке, являющейся частью стержня 3. Стержень механически связан с пластинкой, на которой укреплен притовес 2. Поворот стержня фиксирует стрелка показывающего прибора 1.

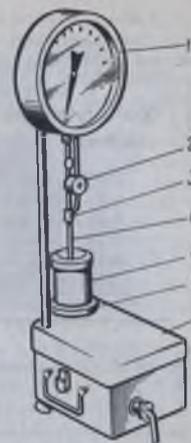


Рис. 3.11. Вискозиметр Реутова

Порядок проведения опытов следующий. Испытуемую массу доводят до температуры, при которой предполагается измерение ее вязкости, и заполняют ею стакан 5 прибора. Пространство между двойными стенками заполняют водой, температура которой равна температуре испытуемой массы. Ротор погружают в массу и подвешивают к стержню измерительного механизма. После этого включают двигатель и, когда стрелка перестанет перемещаться по шкале, снимают показания. Перед опытами осуществляют тарировку прибора по жидкости с известной вязкостью, например касторовому маслу.

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

Наружный цилиндр ($R_n = 1,9$ см) неподвижен. Внутренний цилиндр ($R_i = 0,605$ см) приводится во вращение при помощи падающих гру-

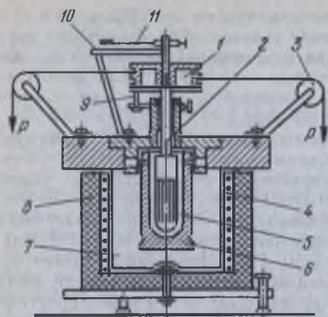


Рис. 3.12. Вискозиметр Воляровича PV-8

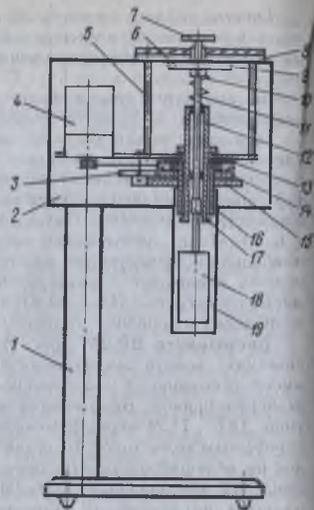


Рис. 3.13. Вискозиметр VP-2M

зов. Длина ротора $L_0 = 8$ см. Отсчет углов поворота производится визуально по шкале и указателю с использованием секундомера.

Схема вискозиметра PV-8 представлена на рис. 3.12. Внутренний ротор 5 с полусферическим дном установлен внутри неподвижного наружного цилиндра 6. Переходная втулка соединяет внутренний ротор с валом 2, который вращается на двух шариковых подшипниках, установленных в установочной шайбе. На верхнем конце вала закреплен шкив 1, который стопорится специальным фиксатором 9. При нажатии на фиксатор шкив с цилиндром освобождаются и приводятся во вращение под действием падающих грузов, подвешенных на тросе через балку 3. Угол поворота цилиндра определяется по перемещению стрелки 11 на неподвижной шкале 10. Время вращения ротора определяется по секундомеру. Наружный цилиндр закреплен в текстолитовой шайбе и застопорен в ней штифтами. Стенки сосуда 4 покрыты теплоизоляционным материалом 8, в них закреплены электронагревательные элементы 7. Для испытаний при температуре ниже комнатной термостат заполняют керосином или спиртом, в который бросают кусочки твердой углекислоты. Вискозиметр PV-8 существенно не отличается от PV-7.

Для случая, когда сдвиг в зазоре между цилиндрами распространяется во всю толщину продукта, эффективная вязкость $\eta_{эф}$ определяется по формулам (3.60)–(3.63), а предельное напряжение сдвига θ_0 — по модели Шведова — Бингама. Постоянные в (3.75) определяются по зависимостям (3.50) и (3.51), в которые входит поправка на сферический торец ротора.

Опыты на вискозиметре PV-8 позволили отнести плодово-ягодную мезгу к псевдопластичным жидкостям Оствальда. При извлечении сока из мезги предельное напряжение сдвига и эффективная вязкость значительно увеличиваются [9]. Осветленные соки при течении практически не проявляют аномалии вязкости и ведут себя как неньютоновские жидкости.

Для сосисочного фарша с помощью вискозиметра PV-8 получены кривые ползучести, по которым определены основные структурно-механические характеристики в области практически не разрушенных структур: модуль мгновенной упругости ($1,23 \cdot 10^4$ Па), модуль упругого последействия ($0,8 \cdot 10^4$ Па), эффективная вязкость при ползучести ($16 \cdot 10^5$ Па·с), статическое предельное напряжение сдвига (250 Па), наибольшая эффективная вязкость ($5 \cdot 10^5$ Па). Получены значения основных сдвиговых характеристик производственных композиций ряда мясных продуктов. Изучено влияние температуры на эти характеристики в пределах изменения температуры от 2 до 35 °С [5].

Вискозиметр VP-2M (рис. 3.13) предназначен для изучения реологических свойств высоковязких пищевых тестообразных масс. Прибор имеет основание 1, соединенное со сварным корпусом 2, в котором помещен привод. Вращающий момент от двухскоростного двигателя 4 типа ДКС—ГСМ через ременную передачу со шкивом 13, соединенным с зубчатым колесом 14, блок шестерен 3 и зубчатое колесо 14, насаженное на ведущий стакан 16, передается на наружный измерительный цилиндр 19, соединенный с помощью байонетного замка со стаканом 16, надетым на втулку 12. Внутренний измерительный цилиндр 18 при помощи замка 17 присоединен к измерительному валу 11, установленному с помощью двух шарикоподшипников во втулке 12 и нагруженному спиральной калиброванной пружиной 10. На измерительный вал 11 насажен кольцевой лимб 9, расположенный в одной плоскости с подвижным круговым лимбом 6 и неподвижным кольцевым лимбом 8, установленным на стойках 5. Круговой лимб 6 поворачивается с помощью рукоятки 7. На лимбы нанесены шкалы: на круговой лимб 6 — шкала напряжений сдвига, а также индекс для отсчета пластичной вязкости; на кольцевой подвижный лимб 9 по внешнему диаметру — шкала для отсчета предельного напряжения сдвига, по внутреннему диаметру — шкалы напряжений сдвига и пластичной вязкости.

Электрореометр — прибор, основанный на применении электрического поля, в частности на явлении вращения диэлектрика [18]. Стакан 1 (рис. 3.14) с электродами 2 заполнен электрореологической суспензией 3 и помещен в термостат 4. Стержень 5 из диэлектрика закреплен в подшипниках 6 и жестко связан с цилиндрическим вискозиметрическим телом 7, погруженным в измеряемую среду 8 между двумя рабочими поверхностями неподвижного двойного цилиндра 9. Напряжение электрического поля от источника 10 подается на электроды 2 и регистрируется вольтметром 11. Сначала вольтметром измеряют напряжение на электродах 2 и тахометром — обороты холостого хода стержня 5 с телом 7 без исследуемой жидкости 8. Затем цилиндр 9 заполняется измеряемой средой и момент сопротивления тела 7 увеличивается, хотя напряжение на электродах 2 остается постоянным. Для ньютоновских жидкостей вязкость пропорциональна разнице угловых скоростей вращения тела 7. Для неньютоновских жидкостей с вязкостью, зависящей

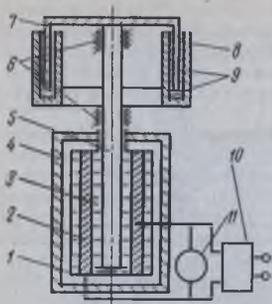


Рис. 3.14. Ротационный электро-реометр

тики продуктов в зависимости от давления. С учетом необходимости изучения реологических свойств различных пищевых масс при повышенных давлениях во МТИППе и МТИММПе был создан ряд вискозиметров.

Ротационный вискозиметр МТИММПа (рис. 3.15) создан на базе вискозиметра РВ-4 для измерения реологических характеристик при повышенном давлении. Диаметр ротора 32 мм, внутренний диаметр стакана 38 мм. Цилиндр 7 неподвижен; вращается рифленый ротор 5, который выточен заодно с хвостовиком 4. Давление в цилиндре 7 создается за счет ввинчивания поршня 9, который снабжен манометром 10 и мембраной 11 для измерения давления; в рабочей зазоре давление измеряют тензометрическими датчиками 6. Вискозиметр смонтирован на подставке 1, ротор приводится во вращение от падающих грузов через блоки 2 и барабан 3. Краник 8 служит для сброса излишка продукта.

Хвостовик и поршень имеют уплотнения, которые препятствуют изменению давления во время опыта.

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

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

от скорости деформации, реометр предельно тарируется в единицах вязкости по эталонной жидкости. Ротационный вискозиметр позволяет измерять вязкость при разных градиентах скорости сдвига и получать кривую течения исследуемой жидкости.

Структурно-механические характеристики определяются на ротационных вискозиметрах, как правило, при атмосферном давлении. Однако в большинстве технологических операций (при формовании, транспортировании по трубам, штамповании и т. д.) пищевая масса подвергается воздействию тех или иных нагрузок, создающих в ней избыточное давление. Поэтому для механических расчетов узлов машин, устройств и процессов, в них протекающих, необходимо знать реологические характеристики

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

Результаты опытов с сырым мясным фаршем показали, что при повышении давления значения всех сдвиговых характеристик увеличиваются. Исключение составляет пластичная вязкость, которая практически не зависит от давления [5].

Вискозиметр РВД-М предназначен для изучения влияния давления на структурно-механические характеристики творожно-сырковых продуктов [1]. Он состоит из рабочей камеры, внутреннего вращающегося рифленого ротора, блочного привода от падающих грузов, поршня для создания давления в продукте, манометра, датчиков давления и перемещения ротора. Анализ зависимости эффективной вязкости от скорости сдвига показал, что с увеличением давления величина всех структурно-механических характеристик возрастает, причем наиболее интенсивно в интервале от 0 до $4 \cdot 10^5$ Па. Например, эффективная вязкость творога при единичной скорости сдвига возрастает от 120 до 320 Па·с, детского сырка — от 760 до 1280 Па·с, глазированной сырка — от 530 до 860 Па·с.

Ротационный вискозиметр РМ-1 (рис. 3.16) создан во МТИППе. Состоит он из плиты 2, на которой неподвижно укреплены две стойки 1 и 3 с основаниями 15 и 20. На основании 20 установлены рабочая камера 18 и опорный узел 21. Для поддержания требуемой температуры рабочая камера имеет рубашку 16. Внутри камеры запрессована рифленая втулка 19, наличие которой устраняет возможность проскальзывания продукта. Сменный ротор 8 установлен на приводном валике 22. Давление в исследуемой массе создается посредством поршня 9 с уплотнительными кольцами. Перемещение поршня осуществляется винтом 14 при вращении ручки 13. Избыточное давление регистрируется тензометрическими датчиками 17. Валик 22 приводится в движение от шкива 5, который вращается под действием момента, создаваемого грузом

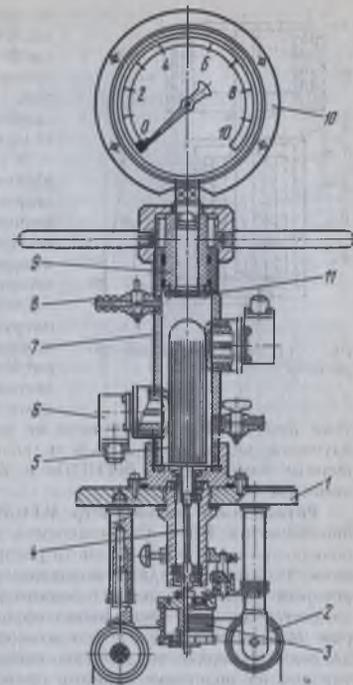


Рис. 3.15. Вискозиметр МТИММПа для измерения при повышенном давлении

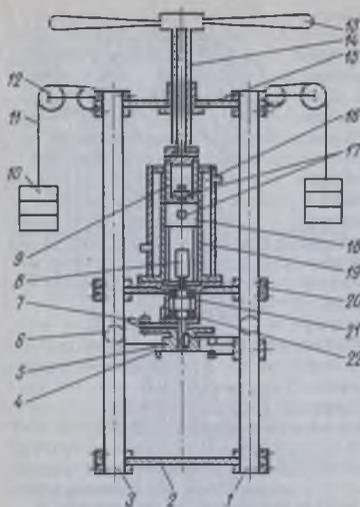


Рис. 3.16. Вискозиметр РМ-1

ми 10. Грузы подвешены на нитях 11 через блоки 6 и 12. Измерение угла поворота осуществляется при помощи фотоэлектрического датчика и перфорированного диска 4, закрепленного на валике 22 специальным устройством. Для остановки и фиксации ротора в определенном положении служит фиксатор 7.

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

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

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

На описанном вискозиметре исследовали физико-механические свойства различных масс, в частности бараночного и хлебопекарного теста из пшеничной и ржаной муки, конфетной массы пралине, сливочной помадки, мыла, мясного фарша, сливочного крема и т. п., при повышенном давлении.

Установлено, что при повышении избыточного давления от 0 до $2,94 \cdot 10^5$ Па при градиенте скорости 5 с^{-1} вязкость хлебопекарного теста увеличивается с 620 до 1600 Па·с, а при градиенте 20 с^{-1} — с 360 до 820 Па·с.

Вязкость теста для матнакаша также в значительной степени зависит от избыточного давления: в интервале градиента скорости от 10 до 40 с^{-1} с изменением давления от 0 до $5 \cdot 10^5$ Па вязкость повышается примерно в 2 раза.

У теста для бубликов, сухек, баранок с повышением температуры уменьшается вязкость, изменяются и другие реологические характеристики [12]. Наиболее сильно влияет изменение температуры в диапазоне от 30 до 40°C . С увеличением влажности теста значения характеристик снижаются. Зависимость пластичной вязкости макаронного теста от давления в пределах градиента скорости от $0,13$ до $1,16 \text{ с}^{-1}$ имеет линейный характер.

Вискозиметрия конфетных масс пралине на приборах РВ-8 и РМ-1 позволила отнести их к вязкопластичному телу Бингама. Отмечено

преобладающее влияние на предельное напряжение сдвига и пластичную вязкость температуры и жирности и незначительное влияние изменения (в пределах рецептуры) влажности [17]. Вязкость снижается с увеличением градиента скорости, достигая наименьшего значения при скорости порядка 7 с^{-1} , что приближается к предельной степени разрушения структуры. Течение пралине при избыточном давлении также описывается уравнением Бингама. С повышением давления от 0 до $0,49 \cdot 10^5$ Па пластичная вязкость увеличивается в 1,5–2,5 раза, предельное напряжение сдвига — в 2–3 раза.

Масса конфет Сливочная помадка проявляет аномалию вязкости при избыточном давлении, при этом эффективная вязкость при всех градиентах скорости с повышением давления заметно возрастает: при градиенте скорости 3 с^{-1} и температуре 24°C повышение давления от 0 до $5 \cdot 10^5$ Па ведет к увеличению вязкости от 1600 до 2400 Па·с, т. е. в 1,5 раза.

Как показали результаты опытов на реометре РМ-1, помадные конфетные массы относятся к псевдопластичным телам, течение их достаточно хорошо описывается степенной моделью Оствальда или моделью Гершеля — Балкли. Давление оказывает существенное влияние на эффективную вязкость: при градиенте скорости 2 с^{-1} с повышением давления от 0 до $3 \cdot 10^5$ Па эффективная вязкость увеличивается от $3,2 \cdot 10^3$ до $5,5 \cdot 10^3$ Па·с.

При повышении скорости сдвига вязкость конфетной массы Русский узор сильно уменьшается; более резкое снижение происходит при малых градиентах: при температуре 29°C вязкость изменяется от 1600 до 1380 Па·с при увеличении градиента скорости от 5 до 6 с^{-1} и от 320 до 317 Па·с — при возрастании градиента от 60 до 61 с^{-1} .

Вискозиметр РМ-2 (рис. 3.17) создан во МТИППе для изучения реологических свойств маловязких пищевых материалов под избыточным давлением или разрежением. Он состоит из следующих основных узлов: наружного неподвижного цилиндра 9 с рубашкой для поддержания необходимой температуры, внутреннего цилиндра (ротора) 8, связанного с валом измерительного сельсина 3. Вращение сельсина 3 сообщается от силового сельсина 4, жестко через муфту 5 связанного с электродвигателем 6.

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

Измерительный сельсин крепится в кожухе 2, который герметично соединен с наружным цилиндром 9. В образованную таким образом герметичную камеру поступает сжатый

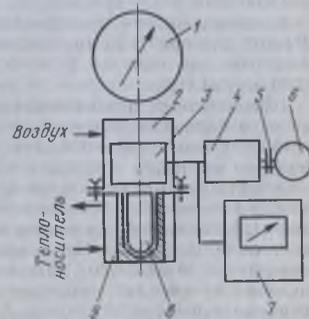


Рис. 3.17. Вискозиметр РМ-2

воздух или газ под давлением, которое контролируется манометром 1. Если подключить камеру к вакуум-наосу, то можно создавать в ней разрежение.

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

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

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

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

Вискозиметр РМ-2 был использован при изучении свойств жидких полуфабрикатов хлебопекарного производства и сливочного масла.

На вискозиметре РМ-2 изучали вязкость молочнокислой и ржаной закваски при изменении градиента скорости от $3,6$ до 122 с^{-1} , индекс течения в этом интервале равен 0,45. При градиентах скорости более 50 с^{-1} вязкость практически постоянна. Эффективная вязкость ржаной закваски влажностью 70 % при градиенте скорости 5 с^{-1} равна 6 Па·с, а при 60 с^{-1} — 1,5 Па·с [16].

Пластовискозиметр системы В. П. Павлова в отличие от приборов РВ-8 и РМ-1 с постоянным крутящим моментом, определяемым величиной подвешиваемого груза, имеет постоянную скорость вращения, изменяемую ступенчато 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. Градиент скорости сдвига в приборе может изменяться от 0,4 до 3000 с^{-1} .

Ротационные вискозиметры «Реотест» (ГДР) нашли широкое распространение в Советском Союзе. Помимо основного цилиндрического чувствительного элемента, эти приборы снабжены устройством типа конус — плоскость, предназначенным для измерения вязкости при повышенных скоростях сдвига для средне- и высоковязких продуктов. Угол между плоскостью и образующей конуса составляет $0,3^\circ$. Прибор позволяет изменять скорость сдвига от $0,56$ до 4860 с^{-1} , напряжение сдвига — от 40 до $2,2 \cdot 10^5$ Па. Величина измеряемой вязкости находится в пределах от 8 до $40 \cdot 10^7$ МПа·с.

Вискозиметр «Реотест-RV» (рис. 3.18) является одной из первых моделей этой марки. Внутри станины 1 прибора установлен синхронный электродвигатель, соединенный с 12-ступенчатой коробкой передач, которая позволяет изменять частоту вращения внутреннего ци-

линдра 2 от 0 до 1500 с^{-1} . Крутящий момент от коробки передач передается ведущему валу 6 и далее через спиральную пружину 5 — ведомому валу 4, соединенному с внутренним цилиндром 2 муфтой. Наружный цилиндр 3 крепится к корпусу вискозиметра специальным зажимом. В приборе имеется термостатирующий сосуд. Величина крутящего момента отсчитывается по шкале прибора 8, скорость вращения — по указателю 9. Измеритель моментов торсионного типа с омическими датчиками работает на принципе превращения механических усилий в электрические импульсы. Показания прибора 8 прямо пропорциональны крутящему моменту, а также напряжению сдвига и вязкости исследуемого материала. Частота вращения синхронного электродвигателя и, следовательно, внутреннего цилиндра 2, зависит от напряжения тока в сети. Отклонения от номинальной частоты 50 Гц фиксируются прибором 7.

Пределы измерения вязкости — от 10^{-2} до 10^4 Па·с; скорости сдвига — от $0,1667$ до $1,458 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$; напряжения сдвига — от 12 до $3 \cdot 10^3$ Па; температуры — от -30 до 150°C . Погрешность измерения $\pm 3\%$ (для ньютоновской жидкости).

На вискозиметре «Реотест-RV» изучено влияние градиента скорости, температуры и жирности на вязкость сливочного масла и установлено, что вязкость расплавленного масла практически соответствует вязкости сливок при одинаковой температуре и жирности [10].

Испытаны также сливки, маргарин, мороженое, томатный концентрат, фруктовые соки с мякотью, пюре для детского питания, тесто и опара из пшеничной муки.

На вискозиметре «Реотест-2» определены вязкость нативного и упаренного меланжа [7]. Для нативного меланжа с концентрацией сухих веществ 0,27 кг на 1 кг меланжа эффективная вязкость при повышении температуры от 20 до 60°C падает от $6,6 \cdot 10^{-3}$ до $3,22 \cdot 10^{-3}$ Па·с. В широком диапазоне изменения градиента скорости (от $0,167$ до $4,5 \text{ с}^{-1}$) и температуры (от 12 до 26°C) определено изменение вязкости свиного жира [5].

Для различных видов колбасного фарша определены реологические константы степенного уравнения. Температуру продукта поддерживали равной 10°C , градиент скорости изменяли от 3 до 145 с^{-1} [4]. Эффективная вязкость фарша при единичном градиенте скорости для различных видов колбас равна (в Па·с): столовой — 335; молочной, докторской, говяжьей — 375; отдельной — 420; чайной, русской — 500; любительской — 640; закусочной — 700; таллиннской — 1000; сервелата — 1370.

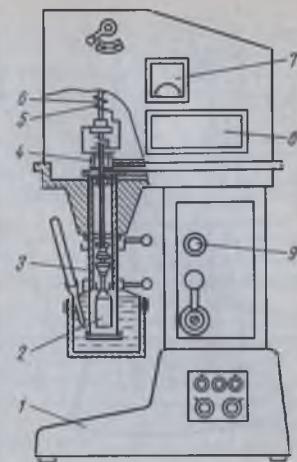


Рис. 3.18. Вискозиметр «Реотест-RV»

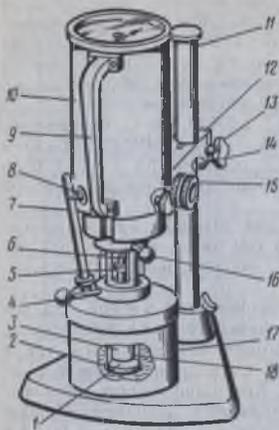


Рис. 3.19. Вискозиметр RN

Эффективная вязкость рыбного фарша при единичном значении градиента скорости и температуре 3; 15 и 40 °С соответственно равна 1650, 960 и 600 Па·с [11].

Было также испытано 15 видов плавящихся сыров. Установлено, что все они в пределах температур от 20 до 80 °С и скорости сдвига от 0,167 до 437 с⁻¹ имеют единую температурно-инвариантную характеристику сдвиговых напряжений [13].

Испытания меласс в интервале температур от 25 до 55 °С позволили установить, что течение меласс, содержащих более 41 % сахарозы, описывается уравнением Гершеля — Балкли, а меласс с меньшим содержанием сахарозы — уравнением Оствальда; с повышением температуры и градиента скорости вязкость меласс уменьшается, а индекс течения изменяется незначительно.

Ротационный вискозиметр типа RN (рис. 3.19) выпускается фирмой «Прюфгеретевеке» (ГДР).

Вискозиметр состоит из измерительного прибора 10, измерительной головки с вращающимся ротором 3 и термостатирующего сосуда 17. Вискозиметр крепится на штативе 11 с помощью кронштейна 12 и зажимного винта 13. Рукоятка 15 служит для установки требуемой частоты вращения ротора. Скорость можно изменить как при остановке, так и во время работы вискозиметра. Цифры 1, 2, 4 и 10, имеющиеся на рукоятке 15, соответствуют следующие частоты вращения ротора (в мин⁻¹): 160, 80, 40 и 16.

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

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

Для расширения диапазона измерения вязкости для вискозиметра RN фирма предоставляет три измерительные системы, состоящие из цилиндров различного радиуса и длины. Характеристики измерительных систем даны в паспорте прибора.

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

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

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

Вискозиметр «Ротовиско» (рис. 3.20) выпускается фирмой «Хааке» (Западный Берлин). Прибор с большим измерительным диапазоном, пригоден для измерения вязкости как ньютоновских жидкостей, так и пластичных дисперсных систем. Наружный цилиндр неподвижный, во вращение приводится внутренний цилиндр. Крутящий момент измеряется динамометром торсионного типа с реостатным датчиком. Прибор снабжен набором сменных измерительных узлов с цилиндрами разных размеров.

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

Пределы измерения: вязкости — от 5·10⁴ до 1·10⁷ Па·с; напряжение сдвига — от 0,5 до 10⁶ Па; скоростей сдвига — от 10⁻² до 10⁴ с⁻¹. Погрешность измерения вязкости не более 4 %. Предел регулировки температуры материала — от -30 до 150 °С.

В исследовательской измерительной практике встречаются вискозиметры типа конус — плоскость и конус — конус. Воспринимающий элемент отличается малым углом между конусом и диском (порядка 0,3°), что требует малого количества (0,1 см³) исследуемого материала и обеспечивает высокую однородность поля напряжений сдвига (от 0 до 5,68·10⁷ Па). Градиент скорости сдвига можно было изменять от 0,1 до 10⁶ с⁻¹, вязкость измерять от 0,1 до 10⁵ Па·с.

Вискозиметр Хепплера (рис. 3.21) фирмы «Прюфгеретевеке» (ГДР) типа конус — конус предназначен для изучения как высоковязких, так и маловязких материалов. Испытания ведут при постоянном нагружении сдвига. Конус приводится во вращение при помощи падающего груза 12. Наружная коническая поверхность выполнена в цилиндре 3, который укреплен в корпусе прибора при помощи накидной гайки 1. Внутренний конус 2 закреплен на валу 5, вращающемся в подшипниках скольжения измерительного узла. Вал 5 соединен с ведущим валом 7 посредством муфты 6. Измерительный узел прибора помещен в термостатирующий сосуд 4. Груз 12 подвешен к фигурному рычагу,

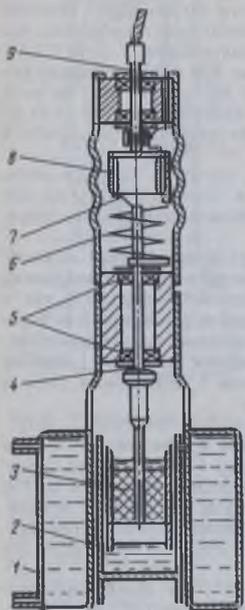


Рис. 3.20. Измерительная головка вискозиметра «Рото-виско»

от которого через коническую передачу во вращение приводится вал 7 с прикрепленным к нему барабаном 10 с нанесенными делениями. При измерении вязкости скорость вращения внутреннего конуса отсчитывают по секундомеру. В случае изучения маловязких жидкостей при помощи особого фрикциона включается двухпружинный динамометр. Отсчет производится по шкале 9, проградуированной в единицах крутящего момента. В этом случае вращением винта 8 крутящий момент поддерживается в заданных пределах. Рычаг 11 предназначен для подключения привода к внутреннему конусу.

Пределы измерения вязкости прибором — от 10^3 до 10^9 Па·с; изменение температуры исследуемого материала — от 25 до 100°C . Углы конусов при вершине — 60 и 82° , длина образующей внутреннего конуса — 1,79 см.

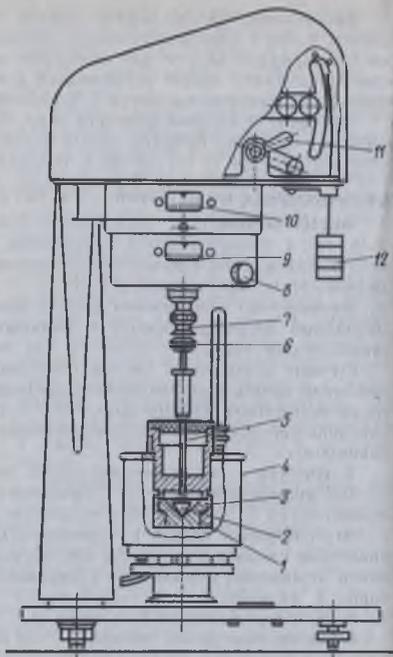


Рис. 3.21. Вискозиметр Хепплера

Вискозиметр РК100 фирмы «Хаак» имеет устройство типа конус — плоскость, угол наклона образующей конуса к плоскости составляет $0,5$ или 1° . Пределы измерений: вязкости — от 20 до 10^7 МПа·с; скорости сдвига — от 10^{-1} до 10^4 с^{-1} ; напряжения сдвига — от 50 до $2 \cdot 10^4$ Па. Объем испытуемого вещества — 1 см^3 . Температура может изменяться от -30 до 150°C . Диаметр пластины — 100 мм; диаметры оснований конусов — 20, 28 и 50 мм.

3.4. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ И РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ

Методика ротационной реометрии принципиально подобна капиллярной, т. е. измерительные стенды должны позволять варьировать геометрические, кинематические, динамические, энергетические и технологические факторы. Обобщение экспериментально полученных величин также аналогично.

Однако в вопросах методологии ротационной реометрии в большей мере, чем в капиллярной, существует формальный подход к трактовке экспериментальных данных. Поэтому применительно к задачам ротационной реометрии целесообразно выделить следующие общие приемы практического проведения исследований.

1. Изучение теории вопроса.
2. Критический анализ существующих исследований в данной области.

Эти очевидные положения иногда игнорируются, и экспериментатор приступает к основным исследованиям, не изучив методику эксперимента, изложенную в паспорте прибора, и не проверив константы прибора.

3. Проведение предварительных экспериментов, которые нужны для проверки прибора и его градуировки. Кроме того, они позволяют уточнить или выбрать математическую модель деформации и сопоставить полученные данные с результатами других исследований.

4. Разработка теории прибора или использование существующей на основе полученной математической модели деформации, т. е. интегрирование дифференциальной модели для конкретных начальных и граничных условий, присущих выбранному прибору. В зависимости от вида модели можно получить различные как по величине, так и по характеру реологические показатели для одного и того же продукта. Константы интегрального уравнения должны быть неизменны для всей кривой течения (допускается аппроксимация всей кривой отдельными участками с разными константами). Или иначе: экспериментальная кривая должна описываться полученным интегральным уравнением. Здесь с учетом п. 3 должны быть выбраны геометрические, кинематические и динамические факторы прибора и пределы их изменения. Существенную роль играет вид эпюр скоростей и градиентов скоростей, соотношение радиусов для комбинированных роторов вискозиметров и т. д. Следует подчеркнуть, что реологические свойства (характеристики поведения продукта под действием механических напряжений) в общем случае не являются «чистыми» константами, но зависят от формы, размеров, скорости нагружения и др.

5. Основные эксперименты проводят с учетом предыдущего. Особого внимания заслуживает отбор проб, который следует проводить в соответствии с принятой в теххимконтроле методикой. Кроме того, реализация поставленных задач реометрии требует комплексного изучения влияния на реологические характеристики составных частей продукта и технологических факторов.

6. Обобщение экспериментов проводят традиционно: по разработанной теории (п. 4) определяют константы прибора, затем рассчитывают величины характеристик. Их зависимость от технологических факторов может быть установлена, когда: а) вид формулы известен (например, исходя из теории процесса) и б) вид формулы неизвестен, его устанавливают графоаналитической обработкой экспериментальных данных, т. е. подбором наиболее приемлемой для целей практики эмпирической зависимости.

Для облегчения вычислений используют ЭВМ, для которой программу к той или иной математической зависимости удобнее всего представить по методу наименьших квадратов. При этом точность вычислений, особенно представления конечных данных, должна быть соизмерима с ошибкой экспериментов. Обычно для малоструктурированных систем и ньютоновских жидкостей ошибки не превышают $\pm 3\%$, для вязкопластичных продуктов $\pm 10\%$.

В последнее время уже стала реальностью автоматизация реологических вычислений и измерений. Схематично это представляется следующим образом. Если величину усилий или деформаций можно выразить в виде изменяющегося электрического сигнала, то его через аналого-цифровой преобразователь подают в ЭВМ. При этом в память ЭВМ может быть заложена та или иная модель течения и машина выдает соответствующие константы для этой модели. Программа управления работой прибора также может быть реализована с помощью ЭВМ.

7. Проверку выполняют путем расчета характеристик по полученным формулам. При этом может быть составлена многомерная таблица, в которой аргументы — независимые переменные — представлены в виде чисел, удобных для интерполяции.

Последний этап методологии (он же может быть и первым) — выяснение, для какой цели будут использованы полученные данные: если для расчета машин и аппаратов — необходимо иметь подобие изменения характеристик и эпюр скоростей и деформаций в приборе и машине, математическая модель деформации должна быть одной и той же для описания процесса в приборе и машине и т. д.; если для оценки качества продукта — небольшие изменения внутренней сущности продукта должны вызывать достаточно большие и легко измеряемые изменения величин. Это же требование должно соблюдаться при непрерывном измерении характеристик с целью их стабилизации и автоматизации процессов производства с оперативной обратной связью к обрабатываемой машине. Конструирование продуктов и прогнозирование их характеристик основывается на всестороннем и полном изучении влияния добавок и показателей составляющих компонентов.

Рассмотрим основы методик измерения и вычисления реологических свойств для двух принципиально различных типов ротационных вискозиметров: с постоянным вращающим моментом (например, РВ-8) и постоянной частотой вращения (например, «Реотест»).

Методика измерения структурно-механических свойств с помощью ротационных вискозиметров Воларовича сводится к подготовке прибора, измерениям и разборке. Подготовка включает установку вискозиметра по уровню, определение трения в подшипниках, заполнение рабочего объема исследуемым материалом и его термостатирование. Во время измерений меняют массу грузов m и для каждого груза определяют частоту вращения ротора N (в с^{-1}). Минимальная продолжительность замера — 2—2,5 с, если не используются специальные датчики регистрации времени. Каждый опыт состоит из 30—40 замеров, проводимых несколько раз с постепенным увеличением и уменьшением массы грузов. Одновременно строят реограммы $N(m)$. Затем прибор разбирают, определяют высоту продукта по оставленным им следам на роторе, вычисляют константы опыта и моют прибор.

В «Реотесте» высота продукта всегда постоянна, во время опыта меняют не крутящий момент, а частоту вращения ротора. Прибор дает показания напряжения сдвига θ (в Па) на внутреннем цилиндре в единицах измерительной шкалы (α):

$$\theta = \alpha z, \quad (3.75)$$

где z — константа цилиндра, Па на ед. шкалы (табл. 3.5).

3.5. Константы вискозиметра «Реотест»

Измерительный цилиндр	Соотношение радиусов цилиндров	Константы цилиндров, Па на ед. шкалы		Пределы измерения градиента скорости
		область I	область II	
S_1	0,98	1,19	5,92	1,5—1310
S_2	0,94	1,23	6,16	0,5—437
S_3	0,81	1,69	8,45	1/6—146
H	0,81	5,89	29,29	1/6—146

Примечание. Константы цилиндров для приборов различных выпусков неодинаковы.

Для проверки динамометра его следует систематически градуировать. В качестве градуировочного приспособления можно использовать верхнюю крышку вискозиметра РВ-8 с двумя блоками и вывернутым измерительным инструментом. На ротор наворачивается нить, которая перекинута через блоки; к концам нити подвешены чашки, на них устанавливают грузы разной массы. Показания шкалы прибора снимают при различных крутящих моментах в статическом и динамическом состоянии, т. е. при наматывании нити на ротор. (Обычно статическая и динамическая градуировки дают одинаковые показания.) Градуировка позволяет представить и вычислить вязкость по величинам консистентных переменных, а также построить кривую течения (реограмму) в виде функции градиент скорости — напряжение сдвига (крутящий момент).

Обобщая изложенное выше с учетом теоретических основ ротационной реометрии, можно рекомендовать следующую методику обработки экспериментальных данных.

1. Одновременно с проведением измерений строят графики в осях координат напряжение сдвига — градиент скорости или в пропорциональных им осях, например $m(N)$.

2. Определить высоту цилиндрической части ротора, на которой он контактировал с продуктом, и для каждого измерения рассчитать значения напряжений сдвига.

3. Построить графики в логарифмических шкалах и определить вязкостный коэффициент и индекс течения. Эту операцию можно выполнить на ЭВМ с использованием метода наименьших квадратов, если точки хорошо располагаются вдоль прямой линии.

4. Определить приведенную высоту по уравнениям (3.68) и (3.69) и по рис. 3.8, а. Определить вязкостную константу по (3.70) и по рис. 3.8, б, имея в виду, что при изменении индекса течения она также изменяется. Для ньютоновской жидкости константы прибора вычислить по зависимостям (3.50).

5. Вычислить эффективную вязкость для каждого измерения по формуле (3.67) для неньютоновской степенной жидкости или по уравнению (3.46) для квазиньютоновской жидкости.

6. Аналогично рассчитать градиенты скорости по уравнениям (3.11) или (3.22).

7. Построить зависимость эффективной вязкости от градиента скорости:

для степенной жидкости — по формулам (3.67) и (3.11), при этом исходная зависимость (3.57) принимает вид:

$$\eta_{\text{эф}}^{\text{ст}} = B \dot{\gamma}_{\text{ст}}^{n-1} \quad (3.76)$$

где индекс «ст» показывает отношение формулы к степенной жидкости;

для квазиньютоновской жидкости — по формулам (3.46) и (3.42), при этом расчетная зависимость имеет вид уравнения (3.57). Кроме того, можно построить зависимости (3.54), имея в виду, что вязкостные константы в уравнениях (3.57) и (3.54) связаны соотношениями (3.55) и (3.58).

8. Вязкостные константы, определенные в п. 7, уже найдены в п. 3 по формулам (3.59) и (3.64), однако такой метод вычислений (по п. 3) может давать более существенную ошибку по сравнению с методикой п. 7, особенно при малых значениях индекса течения (0,1—0,3), и при аппроксимации экспериментальных точек в логарифмических шкалах несколькими прямыми. Далее в зависимости от важности для дальнейшего использования реологических параметров в той или иной зоне течения их расчет следует проводить по прямой, аппроксимирующей соответствующие экспериментальные точки.

Перед выбором методики расчета и обобщения результатов эксперимента следует для данного вида и состояния продукта провести обобщения различными способами для 5—10 опытов. Если при нагрузке и разгрузке образуются петли гистерезиса, то зависимости эффективной вязкости могут иметь различные единичную вязкость и темп разрушения структуры. Однако, варьируя величиной $\dot{\gamma}_1$ или $\dot{\omega}_1$, можно получить одинаковые значения $B\dot{\gamma}$ или B , но темп разрушения структуры будет различаться.

Порядок расчета реологических характеристик для других форм рабочих поверхностей вискозиметров принципиально не отличается. По аналогии с приведенной методикой можно обобщать результаты экспериментов для других математических моделей деформации и течения продуктов.

В ротационной реометрии, так же как и в капиллярной, возможны ошибки при измерениях: основные виды ошибок приведены в табл. 3.6. Теоретическое обоснование их устранения дано в литературе [15]. Сравнение возможных ошибок в капиллярной и ротационной реометрии (см. табл. 3.6 и 2.7) показывает, что капиллярная вискозиметрия, несмотря на кажущуюся простоту, зачастую требует большей тщательности в подготовке и проведении эксперимента. Некоторые возможные ошибки однотипны. Из них наиболее трудно учитываемая — ошибка от проскальзывания продукта вдоль стенки.

Поскольку теория и методология ротационной реометрии многообразнее и сложнее, представляет интерес рассмотрение конкретных примеров обобщения экспериментальных данных.

Реологические характеристики в области практически не разрушенных структур обычно описываются законом Гука (3.73) или его модификациями, наибольшей вязкостью практически не разрушенных структур (3.74) и другими показателями. При нагружении системы деформация остается постоянной во времени, а после снятия напряжения мгновенно и полностью исчезает (рис. 3.22). Модуль мгновенной упругости, например сосисочного фарша, для этой зоны составляет $1,23 \cdot 10^4$ Па. При увеличении напряжения наблюдается процесс упругого последействия, который после снятия напряжения сопровождается мгновенным уменьшением деформации на величину начальной $\gamma_0 = 8,35 \cdot 10^{-3}$, а затем постепенным уменьшением деформации до нуля. Переход от упругих деформаций к упругому последействию наблюдается при напряжениях, превышающих предел упругости 100—150 Па. Модуль сдвига упругого последействия ($G_s = 0,8 \cdot 10^4$ Па) по кривой 2 составляет

$$G_s = \frac{\sigma_2}{\gamma_2 - \gamma_0} \quad (3.77)$$

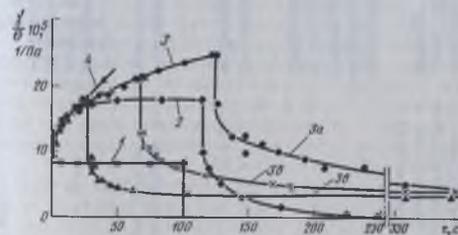


Рис. 3.22. Кинетические кривые развития сдвиговых деформаций в сосисочном фарше при напряжениях (Па):

1—102,5; 2—154; 3—225; 3а—266; 3б, 3в и 4—306

114 3.6. Виды ошибок ротационной реометрии

№ п/п	Вид ошибки	Причина возникновения	Способ устранения
1	Систематическое существенное отклонение результатов от известных данных	Неточное измерение размеров рабочих органов, ошибки при вычислении констант прибора	Проверка размеров, пересчет констант, градуировка по эталонной жидкости
		Отклонение формы рабочего органа от идеальной геометрической, для которой определены константы	Замена рабочего органа
		Турбулизация потока	Уменьшение размера рабочего зазора, уменьшение частоты вращения [формула (3.2)]
		Отклонение оси вращения ротора от геометрической (биение ротора)	Проверка с помощью индикатора, устранение эксцентриситета, замена системы ротор — ось привода
2	Неравномерное вращение ротора	Попадание крупных частиц в рабочий зазор	Тщательная подготовка пробы, устранение частиц
		Ускоренное вращение ротора (у вискозиметров с приводом от падающих грузов) Проскальзывание продукта относительно стенок ротора во время измерения	Уменьшение вращающего момента, учет инерционных нагрузок Рифление ротора (дает хорошие результаты при сравнительно небольших скоростях сдвига; при высоких скоростях в маловязких системах может вызвать турбулизацию потока)
		Разрушение упругих жидкостей и упругая гидродинамическая неустойчивость	Специальные методы (для пищевых продуктов не отмечалось)
		Колебание температуры в термостате	Регулировка термостата
3	Тепловые эффекты	Расплавление продукта (например, налипание жира из многокомпонентной системы на ротор)	Более частая замена продукта в зазоре, очистка ротора
		Внезапное ускорение вращения ротора, если привод осуществляется от падающих грузов, или резкое уменьшение вращающего момента, что характерно для жировых систем при спонтанном разрушении кристаллической структуры при превращении работы сил вращения в тепловую энергию	Тщательное термостатирование, предварительное разрушение кристаллической структуры
4	Концевые эффекты	Уменьшение вязкости при длительных измерениях за счет нагрева продукта	Контроль температуры путем установки термомпар, жидкостное термостатирование рабочих органов
		Завышение значений вязкости	Учет влияния торца по теоретическим формулам для комбинированных рабочих органов
		Выход продукта из коаксиального зазора в результате создания повышенных нормальных напряжений в торце цилиндра (при исследовании вязкоупругих, вязкопластичных продуктов)	Использование комбинированных рабочих органов, недопустимость использования рабочих органов с вогнутым или плоским торцом, применение двояного вискозиметра с разной высотой цилиндров или последовательные опыты на одном приборе, но при разной высоте продукта в рабочем зазоре

где γ_2 — полная величина замедленно развивающейся (эластичной) относительной деформации.

Для расчета модуля сдвига в этой зоне можно пользоваться формулой П. А. Ребиндера:

$$G_0 = \frac{2ckT}{\rho\delta^3} \quad (3.78)$$

где c — концентрация дисперсной белковой фазы, кг/м^3 ($c = 140 \text{ кг/м}^3$); k — постоянная Больцмана, Дж/К ($k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$); T — абсолютная температура, К ($T = 300 \text{ К}$); ρ — плотность молекул, кг/м^3 ($\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$); δ — эффективный диаметр молекул, м ($\delta = 50 \text{ \AA} = 50 \cdot 10^{-10} \text{ м}$).

При применении формулы (3.78) для определения модуля сдвига фарша следует иметь в виду, что концентрация белков в жидкостных прослойках отличается от общей концентрации сухих веществ и размер белков зависит от степени их деструкции при механической обработке мяса. Расчетная величина модуля $0,9 \cdot 10^4 \text{ Па}$ близко совпадает с определенной экспериментально по формуле (3.77).

При дальнейшем увеличении напряжения наблюдается ползучесть (кривые 3 на рис. 3.22). После снятия напряжения деформации сначала уменьшаются мгновенно на величину начальной, а затем — постепенно до некоторой остаточной величины, которая для всех напряжений (кривые 3а, 3б, 3в) при одном и том же времени после разгрузки постоянна. При наибольшем напряжении (кривая 4), близком к пределу текучести, происходит частичное разрушение структуры и начинается вязкопластичное течение с малым градиентом скорости. Оно характеризуется наибольшей эффективной вязкостью (около $5 \cdot 10^5 \text{ Па}\cdot\text{с}$). Эффективная вязкость, соответствующая состоянию ползучести, имеет величину примерно в 3 раза большую ($16 \cdot 10^5 \text{ Па}\cdot\text{с}$), так как течение продукта происходит практически без разрушения структуры.

Особенностью кривых на рис. 3.22 является то, что они выходят из одной точки на оси ординат: $8,15 \cdot 10^{-5} \text{ 1/Па}$. Это говорит о том, что при любых мгновенно приложенных напряжениях (до 300 Па) фарш будет подчиняться закону Гука, а остаточные деформации после снятия напряжения будут равны нулю.

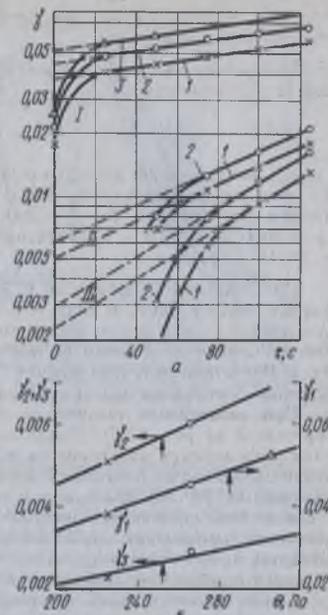
Результаты экспериментов, проведенных по описанной выше методике, позволили вычислить спектр распределения периодов релаксации деформаций при различных, но постоянных для каждого опыта напряжениях сдвига. Расчеты могут быть выполнены по методике [2], которая сводится к следующему. На графике $\ln \gamma = f(\tau)$ по рис. 3.23 экстраполирующей прямолинейной участку кривой до $\tau = 0$ находим γ_1 , а по углу наклона прямой τ_{θ_1} — первый наибольший период релаксации деформации при постоянном напряжении. Далее эта операция повторяется несколько раз: $\ln(\gamma - \gamma_1) = f(\tau)$; $\ln[(\gamma - \gamma_1) - \gamma_2] = f(\tau)$ и т. д. Аналогично для каждого графика определяют γ_2 и τ_{θ_2} ; γ_3 и τ_{θ_3} и т. д. При этом время, для которого реализуется один из периодов релаксации, будет увеличиваться. Названные графики описываются уравнением

$$\gamma - \gamma_i = \gamma_{i+1} \exp(\tau/\tau_{\theta_i}) = a \cdot 10^{-5} \theta \exp(\tau/\tau_{\theta_i}), \quad (3.79)$$

где a — эмпирический коэффициент, $1/\text{Па}$ (табл. 3.7).

Рис. 3.23. Спектр распределения периодов релаксации деформаций:

а — зависимость относительных деформаций от длительности действия напряжений (1 — кинетические кривые деформации; II, III — соответственно первые и вторые разности при различных напряжениях сдвига; 1 — 225 Па; 2 — 226; 3 — 306 Па); б — зависимость экстраполированных к нулю значений деформации от напряжения сдвига (индекс соответствует номеру операции и цифрам на рис. 3.23, а)



Ошибка при вычислениях по уравнению (3.79) не превышает $\pm 4\%$.

Обобщение этих данных дает расчетную зависимость

$$\gamma - \gamma_i = 0,115 \tau^{-2} \theta \exp(\tau/\tau_{\theta_i}), \quad (3.80)$$

которая справедлива в исследованном диапазоне изменения переменных. Отклонения экспериментальных величин от вычисленных лежат в пределах $\pm 12\%$. Экспоненциальный член включает в себя периоды релаксации, которые зависят от длительности действия напряжения, но не от его величины: $\tau_{\theta} = 7300 \tau^{-1}$ (ошибка $\pm 6\%$).

Описанные результаты получены по экспериментальным данным для малых относительных деформаций при величине абсолютных деформаций до 170 мкм в области до начала лавинного разрушения структуры. В качестве измерительного прибора использован ротационный вискозиметр РВ-8.

Реологические характеристики в области от начала течения до предельного разрушения структуры описываются параметрами, которые определяются математической моделью деформации продукта. Они представляют наибольший интерес, так как могут быть использованы для расчета рабочих органов машин и аппаратов, оценки существенных аспектов качества продукта, разработки методик конструирования новых продуктов и т. д. Поскольку каждый опыт содержит несколько де-

3.7. Значения коэффициента a и периодов релаксации

τ , с, более	25	50	75	100
a	17,0	4,8	2,25	1,05
τ_{θ}	310	150	97	72

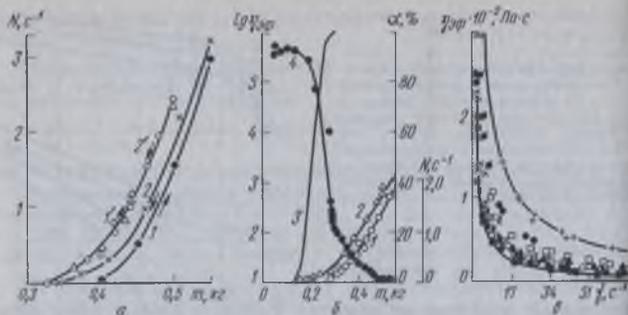


Рис. 3.24. Типичные зависимости изменения реологических характеристик: а — глиняной пасты относительной влажностью 0,65; б — фарша свиных сосисок; в — поле значений $\tau_{\text{эф}}$ для различных видов колбасных фаршей; 1—1' — реограммы при нагрузке; 2—2' — то же, при разгрузке; 3 — степень разрушения структуры; 4 — эффективная вязкость

сятков измерений, то общие ошибки меньше, чем в области практически не разрушенных структур.

В качестве примера обработки экспериментальных данных при исследовании продуктов, подчиняющихся моделям течения Шведова — Бингама и степенной жидкости, на рис. 3.24 приведены типичные интегральные реологические зависимости.

Представляют интерес первичные результаты экспериментов: частота вращения ротора — масса грузов, которые можно наносить на график параллельно с проведением измерений. Причем при пересчете в соответствующие единицы измерения кривая нагрузки 1 (см. рис. 3.24, б) является продолжением кривой 4 (см. рис. 3.22) для больших значений напряжения сдвига. Кривые 1 и 2 на рис. 3.24 образуют петли гистерезиса, и при первичном нагружении, т. е. при начале разрушения структуры, предельное напряжение сдвига выше, а пластичная вязкость меньше, чем для последующих циклов нагрузки — разгрузки.

Расчет величин реологических характеристик по кривым 1 и 2 на рис. 3.24, б выполнен по формуле (3.49) и приведен в табл. 3.8. Значения постоянных для этого опыта следующие: $t = 16,5^\circ\text{C}$; $h = 0,079$ м; $K = 35,2$; $K_0 = 1480$; $K_1 = 8,15 \cdot 10^{-4}$.

Массы грузов, входящие в расчетные формулы, имеют следующие значения: для кривой 1 $m_0 = 0,250$ кг, $m' = 0,338$ кг; для кривой 2 $m_0 = 0,196$ кг, $m' = 0,260$ кг. Значения реологических характеристик продуктов, вычисленные по данным рис. 3.24, а, б, приведены в табл. 3.9. Как видно из приведенных данных, значения пластической вязкости остаются практически постоянными, что указывает на верность выбранной математической модели течения.

Из анализа кривых на рис. 3.22 и 3.24 видно, что мясной фарш можно рассматривать как твердообразную систему, имеющую вязкоупругопластичные свойства и определенную пространственную структуру.

3.8. Расчет реологических характеристик

m	N	θ_0/N	m/m_0	$F(m/m_0)$	η
Для кривой 1 на рис. 3.24, б					
0,275	0,02005	$1,845 \cdot 10^4$	1,10	0,00037	6,83
0,300	0,0731	$5,061 \cdot 10^3$	1,20	0,00140	7,09
0,350	0,2565	$1,442 \cdot 10^3$	1,40	0,00505	7,28
0,400	0,562	$6,583 \cdot 10^2$	1,60	0,01034	6,80
0,450	0,950	$3,894 \cdot 10^2$	1,80	0,01688	6,57
0,500	1,400	$2,643 \cdot 10^2$	2,00	0,02441	6,45
0,525	1,640	$2,256 \cdot 10^2$	2,10	0,02849	6,43
Для кривой 2 на рис. 3.24, б					
0,215	0,0123	$2,358 \cdot 10^4$	1,10	0,00037	8,72
0,254	0,0995	$2,914 \cdot 10^3$	1,30	0,00299	8,71
0,294	0,249	$1,165 \cdot 10^3$	1,50	0,00752	8,75
0,335	0,460	$6,304 \cdot 10^2$	1,71	0,01382	8,71
0,392	0,815	$3,558 \cdot 10^2$	2,00	0,02441	8,68
0,480	1,465	$1,979 \cdot 10^2$	2,45	0,04409	8,72
0,510	1,710	$1,696 \cdot 10^2$	2,60	0,05139	8,71

3.9. Реологические характеристики глиняной пасты и фарша свиных сосисок

Рисунок	Кривая	Предельное напряжение сдвига, Па	Пластичная вязкость, Па·с
3.24, а	1	640	1,9
	2	530	2,3
3.24, б	1	370	6,8
	2	290	8,7

Реограммы на рис. 3.24 образуют петли гистерезиса, объясняемые отсутствием равновесия при замерах в связи с постепенным разрушением структурной сетки. Каждому значению градиента скорости соответствует определенное равновесное состояние системы, которое наступает при медленных его изменениях. Гистерезисные явления можно рассматривать по развиваемой удельной мощности (она пропорциональна площади между реограммой и осью ординат). Прохождение кривой вверх — вниз (по напряжениям) позволяет получить равновесные значения напряжения и градиента скорости (кривые 2—2' на рис. 3.24, а) для соответствующей степени разрушения структуры. Равновесные величины на вискозиметре РВ-8 получаются в том случае, если за время между измерениями структура не успевает существенно упрочниться и разница между прикладываемыми напряжениями в двух следующих один за другим замерах незначительна. Обобщают гистерезисные явления криволинейные поверхности зависимости эффективной вязкости от напряжения сдвига и длительности его приложения.

По кривой 4 (см. рис. 3.24, б) можно вычислить степень разрушения структуры (кривая 3):

$$\alpha = \frac{\eta_0 - \eta_{\text{эф}}(\theta)}{\eta_0 - \eta_m} \quad (3.81)$$

где η_0 — вязкость практически не разрушенной структуры, Па·с; $\eta_{\text{эф}}(\theta)$ — текущее значение эффективной вязкости, Па·с; η_m — вязкость предельно разрушенной структуры, Па·с.

Верхний участок кривой 4 показывает значение эффективной вязкости в области практически не разрушенных структур. Далее при увеличении напряжения сдвига начинается лавинное разрушение структуры. В этом же интервале кривая 3 резко возрастает, стремясь к 100%. Дальнейшее увеличение напряжения (выше предельного) вызывает более медленное уменьшение эффективной вязкости (нижний участок кривой 4). Подобный вид имеют зависимости эффективной вязкости от градиента скорости (см. рис. 3.24, в).

Зависимость между эффективной вязкостью и скоростью боковой поверхности ротора вискозиметра, которая пропорциональна градиенту скорости, в логарифмических шкалах представляет собой прямую линию (рис. 3.25). Эта зависимость может служить основной характеристикой при расчете рабочих органов машин и аппаратов в интервале

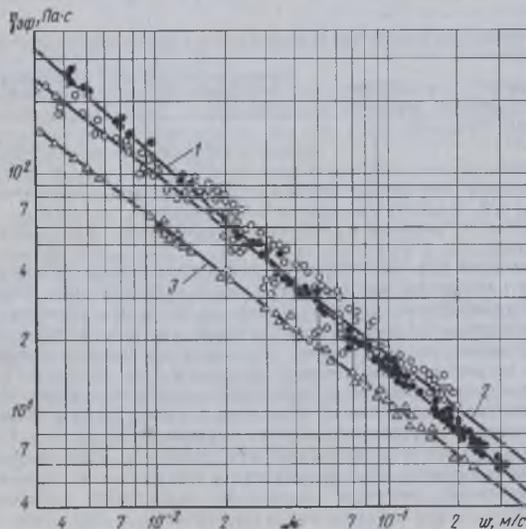


Рис. 3.25. Зависимость от окружной скорости вращения ротора эффективной вязкости:
1 — глиняной пасты относительной влажностью 0,65; 2 — фарша свиных сосисок; 3 — фарша русских сосисок

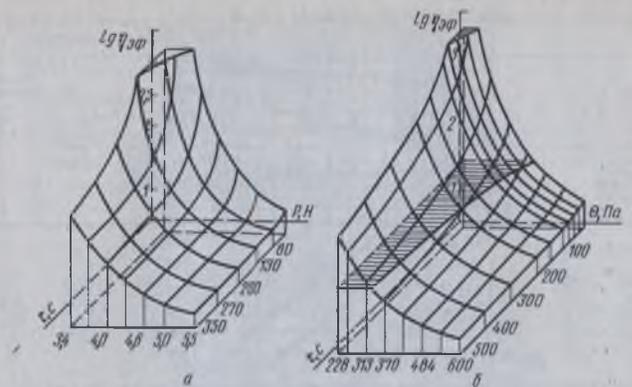


Рис. 3.26. Зависимость логарифма эффективной вязкости от напряжения сдвига и длительности его приложения:
а — глиняной пасты; б — фарша русских сосисок

от начала развитого течения до предельного разрушения структуры, а также для оценки воздействия различных технологических факторов на структуру продукта.

Параллельно поставленные опыты не дают точного воспроизведения величин реологических характеристик, о чем можно судить по отклонениям экспериментальных точек от равновесной кривой. Обычно точки образуют семейство параллельных линий.

На графике в трехмерной системе координат (рис. 3.26), построенном по данным рис. 3.24 и 3.25, однозначно связаны эффективная вязкость, напряжение сдвига и общая длительность его приложения. Таким образом, при известной длительности приложения напряжения можно определить эффективную вязкость. Проекция кривых, полученных при постоянных времени или сдвигающем усилии, на соответствующие координатные плоскости дают семейство кривых, позволяющих обобщить данные при различных условиях проведения опыта.

Пример графоаналитической обработки данных по методике для степенной жидкости наглядно показан на рис. 3.27. Обработка существенно упрощается, если формулу (3.62) представить в виде зависимости массы грузов от частоты вращения (3.63). Тогда по реограммам в логарифмических координатах легко определить индекс течения и вязкостный коэффициент B_m , который связан с коэффициентом B^* соотношением

$$B^* = B_m K_0 \quad (3.82)$$

Далее по формуле (3.64) следует вычислить эффективную вязкость при единичном значении градиента скорости. На рис. 3.27, а, в кривая 1 аппроксимирована тремя прямыми: 1 — по всем экспериментальным точ-

4. АДГЕЗИОМЕТРЫ И ТРИБОМЕТРЫ

4.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Под адгезией понимают явление прилипания различных по структуре материалов при их поверхностном контакте, в результате чего образуется так называемая адгезионная связь. Это явление очень широко распространено в технике, с ним в большинстве случаев борются как с нежелательным, хотя в некоторых процессах стремятся прилипание увеличить. Условно адгезия делится на специфическую (собственно адгезию) и механическую. Специфическая адгезия является результатом сил межмолекулярного сцепления материалов по поверхности контакта. Механическая адгезия возникает при проникновении адгезива в поры субстрата и удержании его вследствие механического заклинивания.

А. Д. Зимон [7] отмечает, что «адгезией, или прилипанием, называется явление, которое возникает при контакте двух разнородных конденсированных тел». Автор различает три вида адгезии: жидкости, пленок и частиц. Адгезия жидкости происходит между двумя разнородными по агрегатному состоянию телами (жидкостью и твердым телом); при адгезии пленок осуществляется связь между двумя твердыми телами (адгезивом и субстратом); в случае адгезии частиц наблюдается контакт между твердыми телами, но по очень ограниченной поверхности.

На формирование адгезионной связи между пищевым и конструкционным материалами решающее влияние оказывают их реологические свойства, шероховатость поверхности субстрата, длительность и напряжение контакта, температура адгезива и субстрата, способ и скорость отрыва, а также наличие между адгезивом и субстратом граничного слоя, нанесенного при помощи смазки, напыления или покрытия.

Различают номинальную (теоретическую или геометрическую) и фактическую (реальную или истинную) площадь контакта, которая представляет собой сложную функцию условий взаимодействия с адгезивом, природы и структуры субстрата. Поэтому определение фактической площади контакта вызывает большие затруднения. На величину площади фактического контакта влияют нормальное давление, природа адгезива и субстрата, а также внешние аргументы — температура, напряжение и продолжительность предварительного контакта. Эти факторы оказывают различное влияние на изменение фактической площади контакта.

При расчете адгезионного напряжения пищевых материалов обычно не учитывают изменения фактической площади контакта и принимают ее равной или несколько меньше номинальной. Например, при расчете адгезии рыбы фактическая площадь условно принималась равной 90 % номинальной, хотя авторами [15] не были указаны причины снижения площади.

Предложены разнообразные, иногда противоречивые, теории адгезии: механическая, адсорбционная, химическая, диффузионная, реологическая, микрореологическая, электрическая, электрорелаксационная, молекулярная. Многочисленность и многообразие теорий свидетельствуют об отсутствии единого взгляда на природу адгезионных явлений. Механическая теория учитывает влияние микрорельефа поверхности субстрата; адсорбционная — сорбцию адгезива при контакте двух тел вследствие макроброуновского движения (повышение напряжения и температуры материалов способствует более быстрому установлению адсорбционного равновесия в месте контакта); химическая — образование межфазных связей (в месте контакта происходит химическое взаимодействие контактирующих материалов); реологическая — повышение прочности материалов в зоне контакта; диффузионная теория основана на взаимной диффузии длинноцепных молекул и образовании связей. Согласно С. С. Воюцкому адгезия высокополимеров возникает вследствие диффузии макромолекул в поры и трещины металлической поверхности, при этом площадь молекулярного контакта значительно превышает площадь номинального контакта, поэтому диффузия будет тем интенсивнее, чем длительнее контакт и больше контактное напряжение. Электрическая гипотеза основана на явлении контактной электризации и связана с возникновением двойного электрического слоя в контактирующих поверхностях при их разъединении и т. д.

Природа сил адгезии и трения одина, поэтому трудно разделить эти силы, возникающие при относительном смещении соприкасающихся поверхностей двух тел. Сила взаимодействия P между телами на границе контакта определяется уравнением Б. В. Дерягина:

$$P = f(P_k + p_0 S_0), \quad (4.1)$$

где f — истинный коэффициент внешнего трения; P_k — нормальная нагрузка, Н; p_0 — удельное усилие прилипания (адгезионное напряжение), Па; S_0 — площадь контакта двух тел, м².

Уравнение (4.1) отличается от закона Амонтона, выражающего пропорциональность силы трения нормальной нагрузке. А. Д. Зимон [7] отмечает, что «адгезия (аутогезия) проявляется при разъединении тел, а трение — при их взаимном перемещении».

И. В. Крагельский [10] различает следующие виды фрикционной связи двух тел: скол или срез материала, пластичное отщеснение, упругая деформация, адгезионное и когезионное разрушение. В общем случае в процессе трения двух тел в различных точках контакта могут одновременно иметь место все пять видов фрикционной связи.

Многие исследователи считают, что сила трения состоит из двух составляющих — адгезионной и деформационной. Д. Мур [12] отмечает, что «адгезионная составляющая обусловлена поверхностными эффектами», а «деформационная составляющая определяется объемными свойствами материала».

А. В. Горбатовым введено понятие «эффективный коэффициент внешнего трения» $f_{\text{эф}}$, который вычисляется по формуле

$$f_{\text{эф}} = p_{\text{тр}}/p_k, \quad (4.2)$$

где $p_{\text{тр}}$ и p_k — соответственно напряжение трения и контакта, Па.

Эффективный коэффициент может быть связан с истинным коэффициентом трения следующим соотношением:

$$\bar{f}_{\text{эф}} = f(1 + p_0/p_k). \quad (4.3)$$

Отрыв пластины от продукта описывается уравнением [18]

$$1/p_0 = h/2\alpha + C/\omega_c, \quad (4.4)$$

где p_0 — адгезионное напряжение, Па; h — толщина слоя продукта между пластинами, м; α — коэффициент, аналогичный коэффициенту поверхностного натяжения, Н/м; C — коэффициент пропорциональности, характеризующий темп убывания площади контакта, м²/с, ω_c — скорость увеличения силы отрыва, Н/с.

4.2. РОЛЬ АДГЕЗИИ И ТРЕНИЯ В ПРОЦЕССАХ ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ

Во всех механических и термомеханических процессах пищевых производств происходит контактное взаимодействие обрабатываемого материала с поверхностью рабочих органов машин, устройств и аппаратов. Учет поверхностных свойств пищевых материалов (в частности, адгезии и трения) необходим при изучении и совершенствовании многих технологических процессов. Следует учитывать прилипание пищевой массы к рабочим органам смесителей (лопаткам, шнекам, лопастям разной формы, корпусу), а также к лентам, ковшам и трубам при транспортировании, особенно материалов, содержащих сахаристые вещества. Силы взаимодействия пищевой массы с рабочей поверхностью формирующих каналов определяют величину линейных и местных сопротивлений при течении пищевых масс по коротким каналам матриц прессов.

Адгезию необходимо учитывать при валковом формовании пищевого материала (прокатке, раскатке, калибровании, нанесении рисунка, продавливании через матрицу). Выбор конструкционного материала с большим или меньшим адгезионным взаимодействием для изготовления вала или его футеровки определяется технологическими условиями проведения производственного процесса. При шнековом формовании основным недостатком является прилипание перерабатываемой массы к поверхности шнека и их совместное вращение при работе, что значительно снижает подачу материала (производительность), особенно в одношнековых прессах. В многошнековых нагнетателях со взаимозацепляющимися шнеками явление прилипания сказывается значительно меньше. Рекомендовано шнеки изготавливать из материала, обладающего малыми, а шнековую камеру — большими адгезионными способностями.

При ротационном формовании наиболее ярко видны положительные и отрицательные адгезионные проявления пищевых масс при взаимодействии с рабочими органами машин: прилипание массы к поверхности ротора должно быть минимальным, а к ленте приемного конвейера — максимальным. Только в этом случае можно получить изделия высокого качества и стабильной массы.

При выдавливании пищевой массы из фильеры отсадочной машины должно быть соблюдено следующее правило: малая адгезия к поверхности фильеры и большая — к приемной поверхности (конвейерной

ленте или столику). Причем адгезионные силы, возникающие в месте контакта корпуса изделия с приемной поверхностью, должны быть больше внутренних сил сопротивления пищевого материала. Так возникает вопрос о правильности выбора материала фильеры и приемного конвейера.

При формовании изделий отливкой в форму адгезионные явления отрицательно сказываются на конечной стадии процесса — отделении продукта от формы. При этом адгезионное взаимодействие должно быть минимальным.

Эффект процессов округления и закатки тестовых заготовок возможен только при наличии адгезионных и фрикционных сил в месте контакта обрабатываемого пищевого материала с рабочими поверхностями механических устройств.

Адгезия пищевых материалов представляет собой прежде всего поверхностное явление, поэтому возможны следующие направления воздействия на характеристики поверхности субстрата (конструкционного материала) и поверхности адгезива (пищевого продукта):

подбор материала субстрата в зависимости от его функционального назначения для ослабления или усиления адгезионного взаимодействия с пищевым объектом (применение антиадгезионных материалов и покрытий или материалов, обладающих повышенной адгезионной способностью);

создание пограничного (промежуточного) слоя путем нанесения твердо- или жидкообразного покрытия на поверхность контакта (смазка маслом или мучной заваркой, подсыпка мукой или крахмалом, создание пленки конденсата и т. п.);

направленное изменение физического состояния поверхности адгезива (например, предварительный обдув воздухом, подсушивание или какая-либо термовлажностная обработка);

внесение в пищевой продукт добавок (незначительное изменение рецептуры введением, например, поверхностно-активных модификаторов);

изменение энергетических уровней поверхностей соприкосновения адгезива и субстрата (например, создание в зоне контакта двойного электрического слоя путем наложения постоянного электрического поля).

Для снижения адгезии пищевых масс в промышленности широко используются различные полимерные материалы, покрытия, облицовка и напыление, в результате чего повышаются эффективность технологических процессов и качество изделий. Применение полимерных материалов на пищевых предприятиях снижает прилипание пищевой массы, уменьшает затраты времени на обслуживание оборудования, улучшает внешний вид изделий и т. п.

С целью повышения эксплуатационной надежности конвейеров и снижения их адгезионной способности проведены работы по выбору перспективных синтетических материалов для изготовления конвейерных лент. Так, ленты из лавсановых тканей обладают низкой адгезией к тесту и конфетной массе пралине. Рекомендовано покрывать фторопластом формирующие органы машин, а в качестве материала приемного конвейера использовать стеклоткань с фторопластовым покрытием или полиэтилен на бельтинговой ленте. Антиадгезионные покрытия по-

звolyют при термообработке фарша в форме снизить адгезию практически до нуля.

Определяющую роль в адгезии кристаллов сахара к различным твердым подложкам играют капиллярные силы, возникающие в контактной зоне между кристаллами и материалом поверхности. Предложен способ защиты от адгезии кристаллов сахара к рабочим поверхностям кристаллизационной аппаратуры, заключающийся в создании тонкой пленки конденсата вторичных паров на этих поверхностях [14].

На хлебопекарных предприятиях для уменьшения прилипания теста используют мучная подсыпка, смазка маслом или заваркой, которые оказывают влияние на адгезионные свойства теста: у образцов из стали Ст. 3 и фторопласта-4, смоченных заваркой, наблюдается чистый адгезионный отрыв. У стального образца, смоченного заваркой, адгезионное напряжение значительно ниже, чем у стального образца без смазки.

Для снижения адгезионных свойств фруктово-грильяжных конфектных масс применяют различные добавки: соевую муку, сухое молоко или сухие сливки. Введение сухих компонентов понижало адгезионное напряжение, благодаря чему масса лучше и легче формовалась.

Одним из эффективных методов снижения адгезии пшеничного теста является использование постоянного электрического тока: подключение положительной полярности к тесту, а отрицательной — к субстрату ведет к снижению адгезионного напряжения.

4.3. 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.

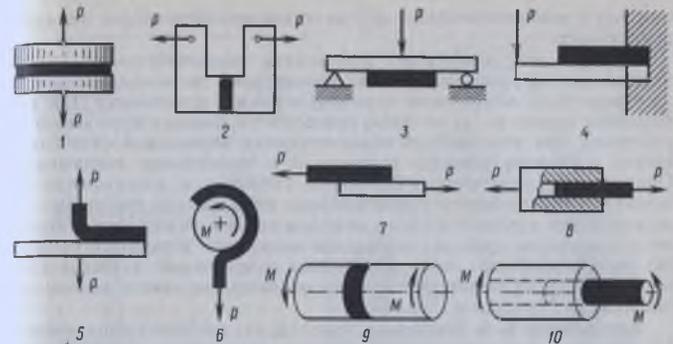


Рис. 4.1. Способы измерения адгезионной прочности: 1 — отрыв нормальной силой при растяжении; 2 — отрыв при внецентренном растяжении (сжатии); 3, 4 — отслаивание материалов при изгибе; 5, 6 — отслаивание при отдирании; 7, 8 — разрушение соединения при сдвиге; 9, 10 — сдвиговое разрушение при кручении

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, адгезион-

ным напряжением (давлением), давлением прилипания или удельным прилипаньем.

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 луча 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 от-

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

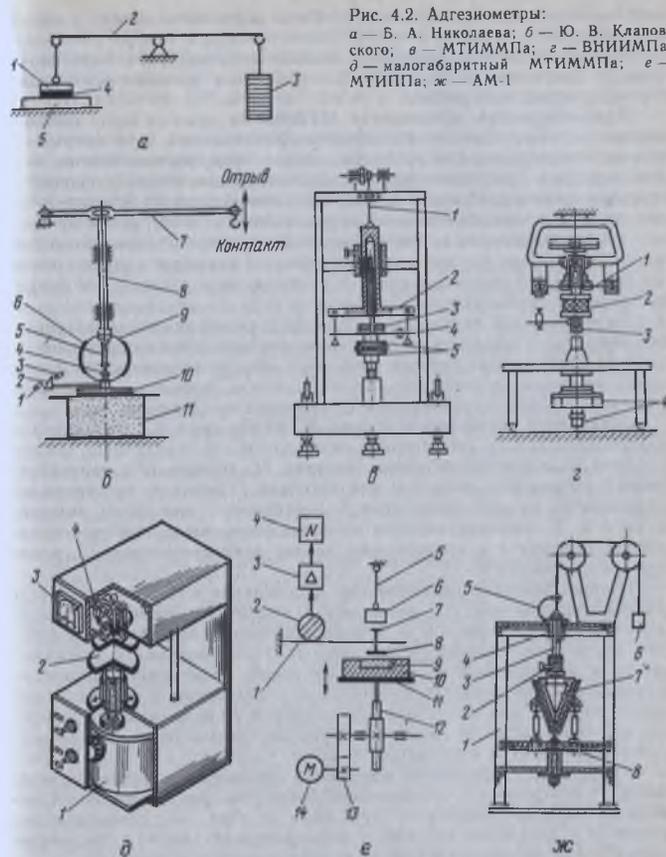


Рис. 4.2. Адгезиометры:
а — Б. А. Николаева; б — Ю. В. Клаповского; в — МТИММПа; г — ВНИИМПа; д — малогабаритный МТИММПа; е — МТИППа; ж — АМ-1

рыва пластины от продукта определяется частотой вращения и диаметром шкива, на который намотана нить.

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. Дер-

жатель образца продукта закрепляется на подвижном штоке, а пластина (субстрат) — в полом патроне, установленном в центре тензобалки.

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

Малогобаритный адгезиометр МТИММПа (рис. 4.2, б) 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 (180 с) 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, в) 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 11 с 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 уп-

ругом 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 1000 с. Основным элементом 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 [14].

Адгезиометр для измерения адгезии формового мармелада (рис. 4.3, б) работает по принципу отрыва конструкционного материала от поверхности массы после ее застудневания [8]. 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, призмой 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

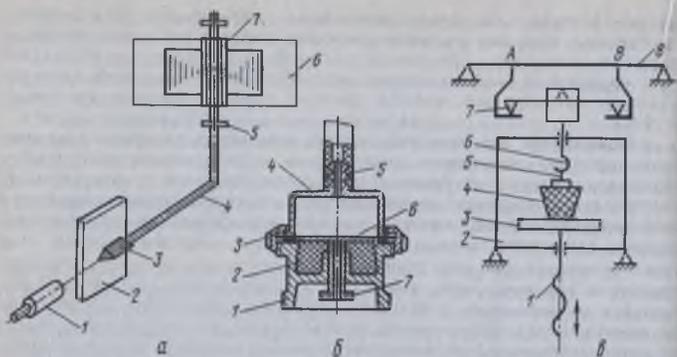


Рис. 4.3. Приборы для изучения адгезии кристаллов сахарозы (а), формового мармелада (б), конфетной помады (в)

которых записываются на осциллографе. Свободные концы винта 1 и крючка 6 находятся в термостатическом шкафу 2, в котором поддерживаются заданные температура и влажность воздуха.

На поверхности подложки 3, изготовленной из испытуемого материала и закрепленной в специальном зажиме, при помощи приспособления изготавливается 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 1, а кольцо 5 надевают на крючок 6 — образец 4 и подложка 3 оказываются связанными между собой только адгезионной связью.

Образцы готовили при температуре помады 70 °С, температура подложки 20 °С, длительность контакта адгезива с субстратом 2 ч, температура контакта 20 °С [11].

4.4. 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 [10]

распределит 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. 4.4, а, б, в). По схеме а продукт перемещается по движущейся исследуемой поверхности, при этом сила трения измеряется динамометром любого типа. Таким наиболее распространенным методом определяют трение твердообразных материалов: сухарей, хлеба, мяса, рыбы, зерна и т. п. По схеме б продукт перемещается с помощью груза по исследуемой неподвижной поверхности. Сила трения в этом случае равна минимальной массе груза, необходимой для равномерного перемещения продукта. Этим методом определяют коэффициент трения таких твердых продуктов, как сыр, рыба, кондитерские изделия. По схеме в продукт скользит по наклонной плоскости. Коэффициент трения определяется по минимальному углу наклона α поверхности испытуемого конструкционного материала, по которому скользит пищевой продукт. Такой метод позволял 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.

Во второй группе относятся такие методы, при которых одна из фрикционных пар совершает вращательное движение. По схеме г продукт, закрепленный на упругой балочке, скользит по вращающейся

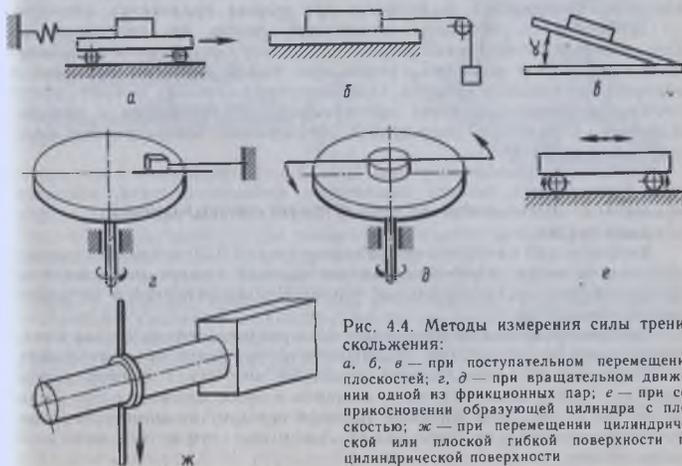


Рис. 4.4. Методы измерения силы трения скольжения: а, б, в — при поступательном перемещении плоскостей; г, д — при вращательном движении одной из образующей цилиндра с плоскостью; ж — при перемещении цилиндрической или плоской гибкой поверхности по цилиндрической поверхности

поверхности из исследуемого материала. Этим методом определяли коэффициент трения мяса, рыбы, таблеток кофе и чая, сухарных плит, формового хлеба. По схеме *д* определяли коэффициент трения конфетных масс пралине. Продукт лежит на вращающемся диске, исследуемый конструкционный материал скользит по вращающемуся продукту. Сила трения определяется по крутящему моменту, передаваемому от диска образцу.

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

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

Изменение давления допускают методы, изображенные на всех схемах, кроме *ж*; изменение размера поверхности — методы *а — д*; изменение скорости скольжения допускают все методы, кроме *а*.

Трибометр с тележкой (рис. 4.5, *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. 4.5, *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. 4.5, *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 проволоочного типа (рис. 4.5, *г*) предназначен для изучения фрикционных свойств пшеничного пряничного теста, контактирующего с поверхностью из стали, дюралюминия, оргстекла и фторопласта-4 [21].

Кинетический адгезиометр-трибометр (рис. 4.5, *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. 4.5, *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 72 м/с. Исследуемый пищевой продукт помещают в рамку, которая укреплена на двух тензобалках; они служат для измерения силы трения.

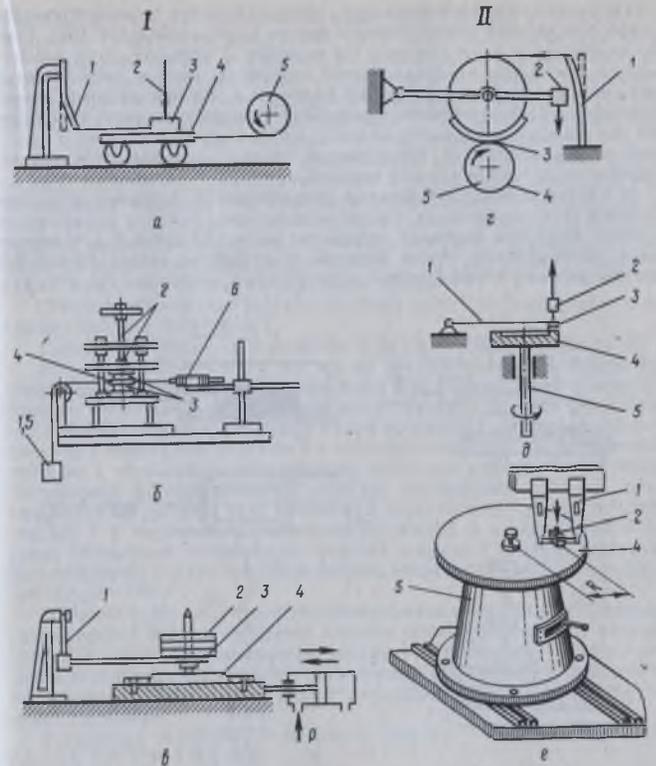


Рис. 4.5. Схемы приборов для измерения коэффициента внешнего трения при малых (*I*) и высоких (*II*) скоростях скольжения продукта: *а* — трибометр с тележкой и электроприводом; *б* — трибометр с параллельным смещением пластин и приводом от падающих грузов; *в* — трибометр с приводом от гидроцилиндра; *г* — трибометр проволоочного 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 [20]. Суть его заключается в следующем. На конвейер 1 (рис. 4.6, 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 [3] 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 смещению. На этих уст-

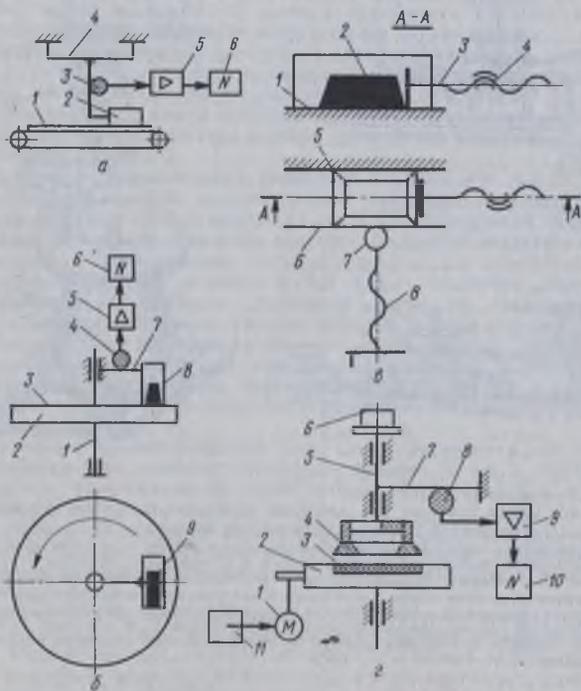


Рис. 4.6. Схемы трибометров для штучных изделий (а, б, в) и вязкопластичных тестообразных материалов (г)

ройствах 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.

Устройство А2-ШКФ (рис. 4.6, 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 0,51×0,55×0,46 м. Масса 95 кг.

Устройство А2-ШКФ/7 (рис. 4.6, 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 тензобалочкой 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 0,49×0,38×0,40 м. Масса 70 кг.

Адгезиометр сдвига (рис. 4.6, г) создан в МТИППе [17] 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 конструктивных материалов; скорость скольжения кольца может изменяться от 0,003 до 0,15 м/с.

Принцип работы на приборе 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 конструктивным материалом.

4.5. 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. 4.1). 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 [1]. При изменении времени контакта от 1 до 5 мин адгезионное напряжение σ_a повышается от 7 до 9 кПа; при уве-

4.1. Адгезионное напряжение различных пищевых продуктов

Пищевой продукт (адгезив)	Материал субстрата	Параметры предварительного контакта		Адгезионное напряжение, Па
		время, с	напряжение, Па	
Свинина поперек волокон	Сталь Ст. 3	3	4900	2000
		300	4900	4200
Колбасный фарш	Сталь Ст. 3	3	4900	14400
		300	4900	16620
Говядина вдоль волокон	Сталь Ст. 3	3	3430	2980
		300	3430	6700
Фарш докторской колбасы	Сталь Ст. 3.	3	4900	12300
		300	4900	15620
		3	4900	10400
Конфетная масса пралине	Фторопласт-4	300	4900	18500
		0	1870	1130
		0	3740	1690
	Сталь Ст. 3	20	1870	1430
		20	3740	1850
		3	4910	8300
Творожная масса	Сталь Ст. 3	600	4910	11200
		3	4910	12500
		600	4910	14300
Тесто для батончиков первого сорта, влажность 41 %, температура 24 °С	Сталь Ст. 3	3	1035	1935
		3	3135	4900
		3	1035	900
	Бельтинг	3	3135	1650
		3	1035	3400
		3	3135	5150
Тесто для матнакаша высшего сорта, влажность 45 %, температура 24 °С	Сталь Ст. 3	3	1035	1000
		3	3135	2700
		3	1035	1000
	Бельтинг	3	3135	2700
		5	1400	5800
		5	4200	9300
Тесто для бубликов, влажность 32 %	Дюралюминий Д-16	60	1400	10400
		60	4200	13400
		5	1400	6500
Тесто для пряников Тульские, температура 24 °С, влажность 19—20 %	Фторопласт-4	60	1400	8900
		5	1400	3400
		60	1400	6100
	Полиэтилен ПЭВД	60	1400	6100
		5	1400	9500
		60	1400	14000
Тесто для пряников Московский сувенир, температура 24 °С, влажность 18—20 %	Сталь 45	5	1400	3600
		60	1400	6200
		5	1400	3600
	Фторопласт -4	60	1400	6200
		60	1400	6200

Продолжение

Пищевой продукт (адгезив)	Материал субстрата	Параметры предварительного контакта		Адгезионное напряжение, Па
		время, с	напряжение, Па	
Конфетная масса Сливочная помадка, температура 24 °С	Сталь 1Х18Н9Т	5	1960	1200
		5	9800	3800
		60	1960	2400
		60	9800	4300
Конфетная масса Теннис, температура 34 °С	Сталь Ст. 3	1	1870	1130
		30	1870	1640
		1	11220	2820
		30	11220	3200
Конфетная масса Буревестник	Фторопласт-4	10	5450	1700
		60	5450	2335
	Сталь 1Х18Н9Т	10	5450	2265
		60	5450	2940

личении напряжения контакта σ_k от 5 до 20 МПа σ_a повышается от 4 до 9,2 кПа; увеличение влажности от 40 до 50 % приводит к изменению σ_a от 6,2 до 12,8 кПа.

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.

В работе [7] определено влияние материала субстрата и напряжения контакта на σ_a теста для батонов и теста для армянского матна-каша. Материалом субстрата были: сталь Ст. 3, дюралюминий Д-16, фторопласт-4, органическое стекло и бельтинг. Время контакта 3 с. 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 (1 кПа) σ_a теста для батонов заметно зависит от материала субстрата: для стали $\sigma_a = 1,9$ кПа; дюралюминия — 2,4 кПа; органического стекла — 3,3 кПа; фторопласта — 2,9 кПа и бельтинга — 0,9 кПа. При σ_k более 2,5 кПа наибольшая адгезия наблюдается у стали, наименьшая — у фторопласта.

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

$$\sigma_a = A + B\sigma_k \quad (4.5)$$

где A и B — эмпирические коэффициенты (табл. 4.2).

С физической точки зрения адгезия возникает за счет адсорбции молекул теста на поверхности субстрата с последующим образованием

4.2. Коэффициенты уравнения (4.5)

Материал субстрата	А		В	
	Тесто для батонов	Тесто для матна-каша	Тесто для батонов	Тесто для матна-каша
Сталь Ст. 3	0,51	2,57	1,43	0,83
Дюралюминий 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

двойного электрического слоя в тончайшем (до 20 нм) 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 [9, 17].

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

$$\sigma_a = a_0 + a_1 t + a_2 \Delta p + a_3 \sigma_k \quad (4.6)$$

где σ_a — адгезионное напряжение, кПа; t — время обдува, с; Δp — напор воздуха, Па; σ_k — напряжение контакта, кПа; a_0, a_1, a_2, a_3 — коэффициенты регрессии (табл. 4.3).

4.3. Коэффициенты уравнения (4.6)

Материал субстрата	a_0	a_1	a_2	a_3
Сталь Ст. 3	2,523	-0,109	-1,882	0,763
Дюралюминий 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 (4.6) справедливо при изменении времени обдува от 1 до 35 с, напора воздуха — от 49 до 490 Па и напряжении контакта — от 1 до 3 кПа.

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, з). Определяли отрыв диска из нержавеющей

стали площадью 10 см² при времени контакта 3; 60; 120 и 180 с; скорости отрыва 2,5; 10; 40 и 160 мм/с; напряжении контакта 5; 10; 15 и 20 кПа.

Установлена линейная зависимость σ_a (в Па) от σ_k (в Па):

$$\sigma_a = 0,65\sigma_k. \quad (4.7)$$

В диапазоне изменения скорости отрыва v_0 (в м/с) от $2,5 \cdot 10^{-3}$ до $40 \cdot 10^{-3}$ м/с

$$\sigma_a = 14,0v_0^{0,153}. \quad (4.8)$$

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

Адгезия конфетных помадных масс была изучена при температуре 24 °С, влажности 10,5—11 % и напряжении контакта 5,45 кПа [2]. Установлено, что σ_a зависит от времени контакта, причем наиболее резко оно изменяется в первые 20 с. 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 10 с для массы Буревестник $\sigma_a = 1,7$ кПа, для массы Красный цветок — 1,09 кПа, для массы Весна — 2,1 кПа. При контакте массы со сталью марки 1Х18Н9Т адгезионное напряжение соответственно равно 2,27; 3,68 и 2,41 кПа. С увеличением продолжительности контакта конфетной массы с фторопластом до 60 с σ_a возрастает примерно в 1,4 раза.

Изучена [6] адгезия конфетных масс Подольчанка (содержание жира 16,6 %, без фруктовой части) и Дуэт (без жира, содержание подварки 25 %) к следующим конструкционным материалам: нержавеющей сталь, фторопласт-4, протакрил, полиэтилен. Напряжение контакта изменяли от 50 до 350 кПа; время контакта — от 5 до 20 с; скорость отрыва — от 5 до 15 мм/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 350 кПа σ_a стали к конфетным массам возрастает более чем в 3 раза, у других материалов — в 2,4—2,6 раза (табл. 4.4).

4.4. 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 [5]:

$$\sigma_a = K + at_k + b\sigma_k, \quad (4.9)$$

где K , a , b — эмпирические коэффициенты (табл. 4.5); t_k — время предварительного контакта, с; σ_k — напряжение контакта, Па.

4.5. Коэффициенты уравнения (4.9) при скорости отрыва 10 мм/с

Конструкционный материал	K , Па	a , 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. 4.6 иллюстрируют влияние времени контакта на σ_a конфетных масс Космические и Русский узор при температуре 29 °С. σ_a слабomолочной помадной массы Виктория к стали 45 предложено [16] выразить уравнением

$$\sigma_a = -1799 + 233t_n + 471t_m + 607v, \quad (4.10)$$

где t_n и t_m — температура соответственно подложки и массы, °С; v — скорость отрыва массы от подложки, м/с.

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

Конструкционный материал	Время контакта, с					
	5	10	20	30	60	90
<i>Конфетная масса Космические при $\sigma_k = 5,45$ кПа</i>						
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
<i>Конфетная масса Русский узор при $\sigma_k = 25,2$ кПа</i>						
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 30 м/с.

На адгезионные характеристики конфетных масс большое влияние оказывает температура, с повышением ее значения характеристик возрастают (табл. 4.7).

4.7. Зависимость σ_a (в кПа) от температуры конфетной массы Былина и конструкционного материала при $\sigma_k = 1,4$ кПа [9]

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. 4.8).

Сбивные конфетные массы типа Птичье молоко проявляют повышенную адгезию ко всем материалам (табл. 4.9).

4.8. Зависимость σ_a от σ_k и конструкционного материала [9]

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
Полиорганилосилан	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

4.9. Зависимость σ_a 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
Полнаимидная 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 [4]:

$$\sigma_a = a_0 t_k^b \quad (4.11)$$

где a_0 — адгезия при времени контакта 1 с; t_k — время контакта, с; b — коэффициент, выражающий темп нарастания адгезии при изменении t_k от 3 до 420 с (табл. 4.10).

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

$$\sigma_a = \sigma_{a_1} + a \lg t_k \quad (4.12)$$

4.10. Коэффициенты уравнения (4.11) при $\sigma_k = 4900$ 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

где σ_a — адгезионное напряжение при времени контакта 1 с, Па; a — эмпирический коэффициент, характеризующий темп нарастания адгезии при увеличении времени контакта, Па; t_k — время контакта, с.

В качестве субстрата были использованы дюралюминий ($a = 2500$ Па), нержавеющая сталь ($a = 2100$ Па), сталь Ст.3 ($a = 2100$ Па), чугун ($a = 2100$ Па), латунь ($a = 2700$ Па) и фторопласт-4 ($a = 3900$ Па). 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 наблюдалось при температуре 23—27 °С.

В качестве показателей, характеризующих сопротивление смещению кондитерских изделий, Ю. В. Бурляем [3] приняты коэффициенты трения скольжения, коэффициент сопротивления относительноному 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 25 мин. Замеряли силу трения изделий, нагруженных только силой собственной массы. Коэффициент трения скольжения определяли как отношение силы трения к силе тяжести изделия (табл. 4.11). Скорость пастыли изменяли от 0,2 до 1 м/с. В табл. 4.12 приведены средние значения коэффициентов трения скольжения для основных групп кондитерских изделий при скорости скольжения от 0,06 до 1,0 м/с. Большой интервал значений коэффициентов показывает, что поверхности изделий одного вида значительно отличаются по форме и высоте макро- и микронеровностей.

В УкрНИИпродмаше были определены коэффициенты трения различных сортов хлеба при охлаждении на ленте из белтинга и из нержавеющей стали марки 1Х18Н9Т (табл. 4.13).

Ниже приведены значения коэффициентов трения скольжения формового хлеба по различным поверхностям (первая цифра указана для скорости 100 мм/с, вторая — для 400 мм/с) [20]:

Сталь	0,25—0,26
Алюминий	0,33—0,37
Фанера	0,35—0,36
Хлопчатобумажная ткань	0,37—0,41
Дерматин	0,38—0,40

4.11. Коэффициенты трения пастилы бело-розовой при температуре 25—30 °С и влажности 80—88 % [3]

Фрикционный материал	Продолжительность выстойки 0—4 ч		
	Грани пастилы		
	нижняя	верхняя	боковая
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
Винилпласт	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

Продолжение

Фрикционный материал	Продолжительность выстойки 8—12 ч		
	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
Винилпласт	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

Усилие сопротивления относительно смещению определяли на глазированных шоколадом конфетах, формовом мармеладе и печенье [3, 8]. Испытания проводили при разной скорости изделий и сжимающей нагрузке для двух случаев перемещения: изделия относительно другого изделия и направляющей стенки; изделия относитель-

4.12. Коэффициенты трения скольжения кондитерских изделий при температуре 20—25 °С и влажности 75—80 % [19]

Наименование изделия	Сталь Ст. 3				Алюминий АЛ15			
	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

Продолжение

Наименование изделия	Винилпласт 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

но двух других изделий. Во время опытов фиксировали усилие сопротивления контактному перемещению, усилие контакта испытуемого изделия и частоту циклов механизма перемещения. Под коэффициентом сопротивления относительно 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. 4.14.

Наблюдения показали также, что при усилии сжатия свыше 4—5 Н для мармелада и 20—25 Н 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—4,0 Н, для затяжного печенья коэффициент сопротивления изменяется от 1,04 до 0,75.

4.13. Коэффициенты трения хлебобучочных изделий [3]

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

4.14. Зависимость коэффициента сопротивления от условий перемещения изделий

Изделие	Частота циклов механизма перемещения, Гц	Усилие сжатия, Н	Коэффициент сопротивления
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

В. М. Хромеенковым [22] изучена зависимость коэффициента трения мякиша и корки сухарных плит высшего и первого сортов от нормального давления, скорости скольжения и времени выдержки после выпечки на установке дискового типа (см. рис. 4.5, е). Образцы высотой 15 мм и диаметром 20 мм вырезали из сухарных плит, помещали в держатель прибора и сверху прикладывали нормальную нагрузку. Скорость скольжения образца изменяли в пределах от 0,3 до 13,8 м/с. Результаты некоторых опытов приведены ниже.

Нормальное давление при времени выдержки 24 ч, кПа
Коэффициент трения

2	4	6	8	10
0,65	0,76	0,83	0,87	0,89

С увеличением нормального давления коэффициент трения мякиша сухарных плит увеличивается заметно до давления 8 кПа, а затем практически остается постоянным. При давлении 12 кПа и времени выдержки 4 ч коэффициент трения равен 0,7; при времени 8 ч — 0,8; при 24 ч — 0,91 и при 48 ч — 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—3 м/с ведет к падению коэффициента от 0,6 до 0,4; при дальнейшем росте скорости до 12—14 м/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 [13]. Динамический коэффициент трения был найден при скорости скольжения от 2 до 12,2 м/с (табл. 4.15).

4.15. Зависимость статического (в числителе) и динамического (в знаменателе) коэффициентов трения свежих овощей и фруктов от нормального давления [13]

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	0,36/0,13	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

Фрикционные свойства пшеничного теста изучали при температуре 20—22 °С на трибометре, схема которого приведена на рис. 4.6, г [21]. Были взяты следующие конструкционные материалы: сталь Ст.3, дюралюминий Д-16, оргстекло и фторопласт-4 с шероховатостью рабочей поверхности $Ra = 6,3$ и $Ra = 0,1$ по ГОСТ 2789—73. Напряжение контакта изменяли от 1,82 до 7,27 кПа, скорость скольжения — от 0,03 до 0,15 м/с (табл. 4.16).

4.16. Зависимость коэффициента трения скольжения прядничного 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 $Ra = 0,1$	1,83	1,93	1,95	1,83
	1,10	1,10	1,10	1,05
	0,65	0,70	0,69	0,65
$Ra = 6,3$	2,04	2,04	2,04	2,04
	1,10	1,10	1,10	1,15
	0,70	0,65	0,71	0,69
Дюралюминий Д-16 $Ra = 0,1$	1,82	1,85	2,05	2,20
	1,09	1,20	1,43	1,60
	0,76	0,85	1,09	1,20
$Ra = 6,3$	1,90	1,95	2,05	2,23
	1,63	1,61	1,63	1,68
	1,34	1,60	1,90	1,50
Органическое стекло $Ra = 0,1$	1,18	1,25	1,52	1,66
	1,09	1,15	1,30	1,33
	0,68	0,80	1,02	1,13
Фторопласт-4 $Ra = 0,1$	0,50	0,68	0,95	1,14
	0,57	0,57	0,80	0,93
	0,55	0,61	0,76	0,88

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

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

$$f = a + bv_{ск} \quad (4.13)$$

где $v_{ск}$ — скорость скольжения, м/с; a , b — эмпирические коэффициенты, значения которых даны в табл. 4.17.

4.17. Эмпирические коэффициенты* уравнения (4.13)

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

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

5. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

5.1. ШАРИКОВЫЕ ВИСКОЗИМЕТРЫ

Метод измерения вязкости с помощью свободно падающего шарика в трубке по закону Стокса широко используется для ньютоновских жидкостей. Для неньютоновских материалов разработаны приборы, в которых движение шарика осуществляется принудительно под влиянием разных грузов и с разными скоростями.

Вискозиметр Гепплера (рис. 5.1, а) состоит из станины 10 и измерительной трубки 6, в которую заливается 30 см³ исследуемой жидкости. В нее опускается один из шариков 8, которыми укомплектован прибор, в зависимости от вязкости жидкости. Выбор шарика определяется требованием: расстояние между крайними отметками 2 он должен проходить в интервале от 30 до 300 с. Темперирование совершается примерно за 10 мин жидкостью из термостата, которая через штуцер 1 поступает в цилиндр 7. Температура термостатирующей жидкости контролируется термометром 3. До начала эксперимента прибор следует нивелировать по уровню 9 винтами 11. С помощью втулки 5 и прижимной гайки 4 совершается отделение воздуха из трубки. Наличие воздушных пузырьков в исследуемой жидкости приводит к искажению результатов.

Вискозиметр предназначен для определения вязкости ньютоновских жидкостей и ее зависимости от температуры. Пределы измерения вязкости от 0,6 до 80000 Па·с при интервале температуры от —60 до 150 °С; ошибка при измерении меньше 2 %.

Динамическая вязкость η (в Па·с) определяется по формуле

$$\eta = K(\rho_{ш} - \rho_{ж})t, \quad (5.1)$$

где K — константа прибора, м²/с²; $\rho_{ш}$ — плотность шарика, кг/м³; $\rho_{ж}$ — плотность исследуемой жидкости, кг/м³; t — время, с.

Несмотря на то что прибор не имеет достаточного теоретического обоснования, результаты получаются с высокой точностью и воспроизводимостью. На этом приборе определены вязкости многих жидких пищевых продуктов: овощных и фруктовых соков, вина, пива, сахарных растворов, масел и др. Прибор непригоден для определения вязкости структурированных систем, а также систем, которые имеют предельное напряжение сдвига. Кроме того, возникают трудности при исследовании мутных и непрозрачных систем, содержащих твердые частицы, а также негомогенных и осаждающихся дисперсных систем.

Реовискозиметр Гепплера (рис. 5.1, б) предназначен для определения вязкости жидких продуктов. Движение стержня 3 с шариком в измерительной трубке 4 с жидкостью осуществляется в термостате 5

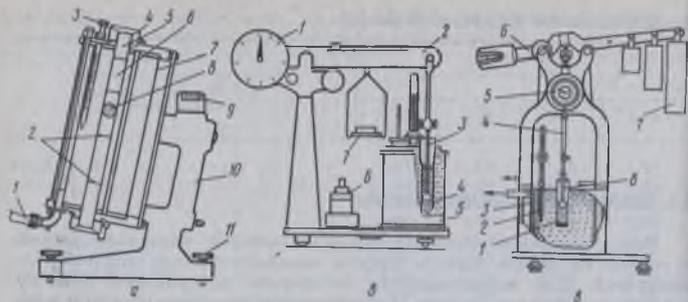


Рис. 5.1. Шариковые реометры Гепплера:
а — вискозиметр; б — реовискозиметр; в — консистометр

принудительно при помощи коромысла 2 под влиянием груза 7. Поэтому, используя разные гири 6, можно изменять напряжение и скорость сдвига. По индикатору 1 можно определить путь, пройденный шариком в измерительной трубке. Обычно замеряется время прохождения шариком всего промежутка перемещения, равного 30 мм. При этом нужно проводить несколько замеров и определять среднее арифметическое значение времени при данной нагрузке. Цифры на гирях означают массу, действующую на 1 см² исследуемой жидкости.

Интервал изменения напряжения сдвига от 0,981 до 19,62 кПа. Динамическая вязкость определяется по формуле

$$\eta = KMt, \quad (5.2)$$

где K — постоянная для данной трубки; M — масса гирь, г/см²; t — время прохождения шариком всего интервала (30 мм), с.

Диапазон измерения вязкости от 4 до $4 \cdot 10^6$ мПа·с с точностью $\pm 2\%$. Этот диапазон получается при использовании комплекта из пяти измерительных резервуаров разных размеров. Требуемое количество измеряемой жидкости зависит от измерительной трубки и составляет от 16 до 25 см³.

Так как при разных грузах и скоростях шарика получаются различные напряжения сдвига, для неньютоновских жидкостей надо обязательно указывать, при каком напряжении сдвига получено значение вязкости. Для таких жидкостей возможно и построение кривой текучести, однако для этой цели более пригодны другие приборы.

Консистометр Гепплера (рис. 5.1, в) используется для определения реологических свойств густых материалов. Он укомплектован приспособлениями для определения твердости любых материалов. Продукт помещают в цилиндр 1, который в рабочем состоянии находится в термостате 3. Движение стержня 4 с шариком 8 в продукте осуществляется за счет массы гирь 7 через коромысло 6 и стержень. Перемещение шарика фиксируется индикатором 5. При этом между шариком и внутренней поверхностью цилиндра образуется кольцевая щель, через ко-

торую ламинарно протекает исследуемая среда. Температура жидкости в термостате замеряется термометром 2. С помощью гирь можно создать нагрузку до 50 кг. Максимальное расстояние для замера движения шарика 20 мм.

Динамическая вязкость вычисляется по формуле

$$\eta = KMt/S, \quad (5.3)$$

где K — константа прибора, с⁻²; M — общая масса, действующая на шарик, кг; t — время перемещения шарика, с; S — путь шарика, м.

Диапазон измерения вязкости от 10 до 10^9 Па·с.

Для неньютоновских жидкостей можно построить кривую текучести — зависимости скорости течения $v = S/t$ от напряжения сдвига τ . Напряжение сдвига определяется как отношение нагрузки к площади поперечного сечения шарика. По графику можно определить и предельное напряжение сдвига по точке пересечения его с абсциссой.

Консистометр широко используется в исследовательских и производственных лабораториях. Результаты экспериментов позволяют также вычислять относительные деформации и строить кинетические зависимости.

5.2. ПЕНЕТРОМЕТРЫ

Пенетрацией называется метод исследования структурно-механических свойств полутвердых и твердых продуктов путем определения сопротивления продуктов проникновению в них инденторов (конус, шар, игла, цилиндр) со строго определенными размерами, массой и материалом при точно определенной температуре и за определенное время. Исследование может проводиться с постоянным усилием или с постоянной глубиной погружения (при этом определяется глубина погружения); с постоянной глубиной погружения (измеряется усилие); с постоянной скоростью погружения (регистрируется усилие в зависимости от глубины погружения). На этой основе рассчитываются разные параметры, имеющие отношение к консистенции (см. § 1.8).

Предельное напряжение сдвига как одна из важных реологических характеристик материала, служащих для оценки прочности его структуры, находится при помощи конического пластометра.

Метод погружения конуса для характеристики структурно-механических свойств вязкопластичных тел предложен П. А. Ребиндером и Н. А. Семененко. Методика пенетрационных испытаний подробно описана в литературе [24].

Конический пластометр КП-3 (рис. 5.2, а), который выпускается серийно, служит для реализации метода погружения конуса. Исследуемая масса помещается в сосуд 1 на подъемный столик, вершина конуса 2 приводится в соприкосновение с поверхностью массы. Конус погружается гирями 4, и с помощью индикатора 3 определяется величина погружения конуса до полной его остановки.

Предельное напряжение сдвига неразрушенной структуры θ_0 (в Па) рассчитывают по формуле Ребиндера:

$$\theta_0 = K \frac{m}{h^2}, \quad (5.4)$$

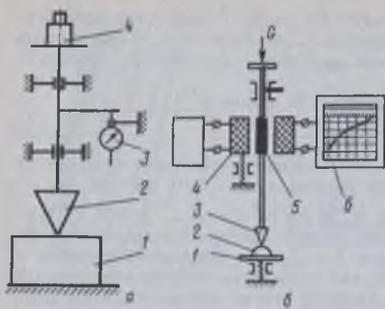


Рис. 5.2. Пенетромтр КП-3:
а — конический; б — конический модернизированный

Предложено также [9] определять значения K по формуле

$$K = 0,687 \operatorname{ctg}^2 \alpha. \quad (5.6)$$

Учитывая пластичные деформации материала, предлагается и такая формула:

$$K = h \operatorname{tg}(\alpha/4), \quad (5.7)$$

где h — высота конуса, м.

Воспроизводимость результатов удовлетворительна, когда h изменяется в пределах от 7,5 до 20 мм.

Основная трудность при работе с коническим пенетромтр — это изменяющаяся площадь контакта конуса с материалом вследствие нарушения однородности массы под конусом. На основе экспериментов с коническим пластометром КП-3 с разным углом при вершине (30, 45 и 60°) предлагается [1] к известной зависимости (5.4) прибавить еще один коэффициент, учитывающий силы трения

$$K' = \frac{\operatorname{tg}(\alpha/2) \sqrt{9 \operatorname{tg}^2(\alpha/2) + 4}}{3 \operatorname{tg}^2(\alpha/2) + 1}. \quad (5.8)$$

На приборе КП-3 проведены многочисленные исследования реологических свойств различных пищевых продуктов (конфетные массы, хлебопекарное и кондитерское тесто, мясные и молочные продукты, пшеничный хлеб и сухарные плиты, косметические кремы, продукты переработки винограда и яблок, фрукты). На основе значения предельного напряжения сдвига θ_0 предложена классификация материалов:

$\theta_0 \cdot 10^{-3}$, Па	Оценка материала
< 50	Очень мягкий, почти текучий
50 ÷ 100	Очень мягкий, но не размазывающийся
100 ÷ 200	Мягкий, размазывающийся
200 ÷ 800	Пластичный, размазывающийся
800 ÷ 1000	Твердый, но не со способностью к размазыванию
1000 ÷ 1500	Слишком твердый с ограниченной способностью к размазыванию
> 1500	Слишком твердый

где K — константа конуса, зависящая от угла при его вершине (α , град); m — масса, действующая на конус, кг (за вычетом трения и сопротивления пружины индикатора); h — глубина погружения конуса, м.

Константа конуса рассчитывается по формуле

$$K = (g/\pi) \cos^2(\alpha/2) \operatorname{ctg}(\alpha/2). \quad (5.5)$$

Ее обычно определяют по данным Н. Н. Агранат:

α , град	30	40	45	60	90
K	9,4	5,2	4,1	2,1	0,67

Модернизированный конический пластометр КП-3 (рис. 5.2, б) был использован для определения структурной прочности пряников [15]. Перемещение конуса 3 через сердечник 5 вело к изменению индуктивности в катушке 4, которое записывалось самопишущим прибором 6. Таким образом с большой точностью определяли величину погружения конуса в продукт 2, расположенный на площадке 1, с течением времени. Время пенетрации принято 60 с, а нагрузка G составляла 0,2; 0,3; 0,4 и 0,5 Н.

Малогабаритный пенетромтр (рис. 5.3) разработан в МТИППе совместно с ВНИИХПом. Прибор состоит из основания 1, на котором закреплены подвижный столик 2 и вертикальная стойка 3. На последнюю устанавливается скоба 12 с датчиком 11 дифференциально-трансформаторной системы передач, кронштейном 7 на стойке 6 и блоками 5. Через блоки переброшена нить 8. К одному концу прикреплен подвижный шток 10 датчика 11. На штоке закреплена тарелка 9, служащая для установки дополнительных грузов, и сменная насадка 14. На другом конце нити 8 закреплен груз 4 для уравновешивания массы штока с тарелкой и насадкой. В нижней части скобы 12 установлено механическое стопорное устройство 13. В комплект насадок входят грузы и конусы с углами при вершине (в град): 30, 45, 60, 90, 120.

Величина предельного напряжения сдвига вычисляется по общепринятой методике. Предел измерения предельного напряжения сдвига до 1 МПа; габаритные размеры прибора 0,12×0,20×0,30 м; масса 4 кг.

Иногда бывает неудобно проводить опыт до полной остановки пенетрирующего элемента. В этом случае характеристики материала находят по перемещению рабочего тела при данной нагрузке за определенный промежуток времени.

Прибор КЗТ-1 для измерения предельного напряжения сдвига разработан и изготовлен в МТИММПе [13]. Для исследования колбасного фарша различной консистенции использовали конус с углом при вершине 60° массой 47,62 г. Прибор можно использовать для экспресс-контроля качества колбасного фарша и готовых изделий по значениям предельного напряжения сдвига неразрушенной структуры.

Автоматический пенетромтр АР-4/2 (рис. 5.4), выпускаемый в ГДР, состоит из испытательного прибора и автоматического регулятора времени 11, соединенных между собой кабелем. На вертикальной стойке 4, соединяющей измерительную головку 6 с основной плитой 1, находится измерительный столик 3, на котором расположен стакан 9, где помещается исследуемый материал. Столик перемещается в вертикальном направлении с помощью гайки 2. В измерительной головке находится падающая система, состоящая из гильзы 5 со сменной зажимной деталью 8 и микрошкалы 7 для отсчета погружения детали 8. Время испытания задается ручкой 10 в интервале 0—130 с через 5 с.

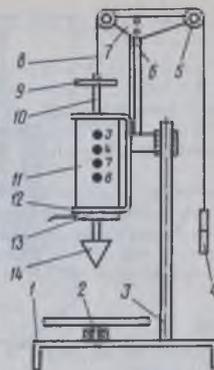


Рис. 5.3. Малогабаритный пенетромтр

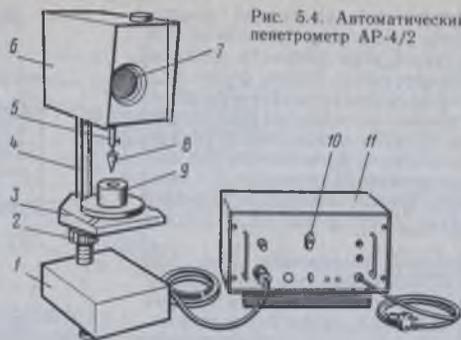


Рис. 5.4. Автоматический пенетрометр AP-4/2

На этом приборе было определено изменение консистенции теста при замораживании [26]. Реологические свойства желейных масс определяли при длительности погружения 5 с. Изменение предельного напряжения сдвига найдено в зависимости от длительности студнеобразования.

Пенетрометр AP-4/1 был использован для исследования влияния разных сычужных ферментов на нарастание плотности молочного сгустка во времени. Для этой цели был разработан полый цилиндрический индентор, в основании которого находится тупой конус. С увеличением прочности коагулята нарастает его сопротивление, и глубина погружения индентора уменьшается пропорционально уплотнению коагулята.

Пенетрометры AP-4/1 и AP-4/2 широко используются для определения структурно-механических свойств теста [2]. Для этой цели разработаны тела погружения разной формы и размера. Для определения общей деформации хлебного мякиша и показателей, характеризующих его упругость и пластичность, используется полусферический элемент погружения. Максимальная глубина погружения ΔH_1 . После снятия груза в результате упругого последствия теста глубина ΔH_1 уменьшается на ΔH_2 . Следовательно, ΔH_1 является общей деформацией, ΔH_2 характеризует остаточную деформацию или его пластичность, ΔH_3 обуславливает упругость мякиша.

Для характеристики структурно-механических свойств мякиша определяют относительную пластичность $(\Delta H_2/\Delta H_1 \cdot 100 \%)$ и относительную упругость $(\Delta H_3/\Delta H_1 \cdot 100 \%)$.

Используя такую методику, было определено влияние разных факторов на структурно-механические свойства мякиша, например пористость [23]. Разработаны также методики определения различных показателей для установления «силы» муки, эластичности клейковины и др.

Для исследования реологических свойств кречерного теста использовали кусок теста размером $70 \times 70 \times 30$ мм [4]. За 3 мин погружения конус полностью затормаживался и достигалось предельное напряжение сдвига. Для исследований использовался эбонитовый конус с углом

при вершине 35° , высотой 44 мм и диаметром при основании 27,7 мм. Масса системы погружения 58 г.

Пенетрометр ОВ-205 (ВНР) работает по принципу пенетрометра AP-4/2. Помимо общепринятого времени проникновения, равного 5 с, на приборе можно установить время 6, 7, 8, 9, 10 с. Максимальная глубина проникновения 63 мм; максимальная нагрузка 500 г. Прибор пригоден для испытания качества муки и теста, клейковины и мякиша хлеба.

Пенетрометр 35П, разработанный в УкрНИИпродмаше, применим для измерения предела пластичной прочности теста и удельного сопротивления пенетрации. На приборе записываются деформация h и время t , на основании которых строится график $h^2 = f(P)$, где P — нагрузка. Предел пластичной прочности теста (в Па) определяется по формуле

$$P_T = 0,959 (\Delta P/h^2) \cdot 10^4, \quad (5.9)$$

где ΔP — разность между абсциссой точки h^2 и отрезком ее, отсекаемым прямой $h^2 = f(P)$. В зависимости от вида теста, его рецептуры и способа приготовления P_T изменяется от 377 до 1117 Па.

Пластометр с пластиной (рис. 5.5), работающий на принципе пенетрации, удобен для быстрого определения предельного напряжения сдвига [6]. Пластометр имеет кронштейн 1 с направляющей втулкой 4 и стопором 5. Плоский нож 6 вместе со штоком 3 погружается в продукт, а погружение отсчитывается линейкой 2. Величина предельного напряжения сдвига определяется по формуле

$$\theta_0 = P/(2bh), \quad (5.10)$$

где P — усилие погружения ножа со штоком, Н; b — ширина ножа, м; h — глубина погружения ножа, м.

При этом было доказано [6], что начальная глубина погружения ножа в продукт не оказывает влияния на результат. Значения θ_0 , полученные на этом приборе и на РВ-4, различаются не более чем на 5%. Время, необходимое для погружения ножа при значениях $\theta_0 = 0 \div \div 150$ Па, лежит в пределах 1 мин.

В МТИММПе создан ряд пенетрометров для исследования структурно-механических свойств вязкопластичных продуктов, в которых используется конический индентор.

Полуавтоматический пенетрометр ПП-5 (рис. 5.6) позволяет измерять одновременно предельное напряжение сдвига и степень пенетрации. Прибор состоит из корпуса 1, внутри которого находятся микро-включатель 3, шток с индентором 9 и демпфером, представляющим собой цилиндр с поршнем 2. Для фиксации штока имеются ручка 7 и фиксатор 4. На основании расположен столик 11 для подъема или опускания емкости 10 с исследуемым продуктом. Регистрация перемещения индентора включает двойной блок управления 12 с реле времени. Движение индентора передается рычагу 5, имеющему противовес 8, причем рычаг входит в зацепление с пальцем 6, установленным на штоке. Пластина 13 из упругого магнитного материала связана со стрелкой для регистрации величины перемещения индентора (степень пенетрации за 3, 5, 8 или 10 с), а пластина 14 связана со стрелкой

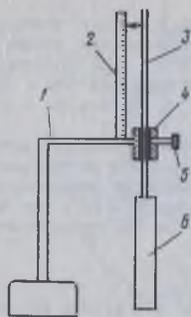


Рис. 5.5. Пластометр с пластиной

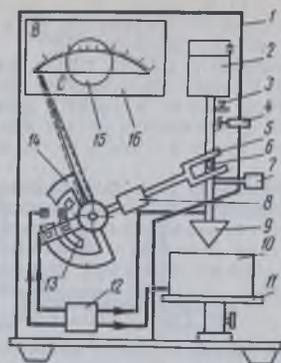


Рис. 5.6. Полуавтоматический пенетрометр ПП-5

для регистрации перемещения индентора при определении предельного напряжения сдвига (за 2, 3, 4 или 5 мин). Индентор 9 состоит из диска с закрепленными в нем одной или несколькими иглами, расположенными по окружности. В двойном блоке 12 с помощью реле времени устанавливаются продолжительность его срабатывания в зависимости от консистенции продукта для измерения степени пенетрации в секундах, а для измерения предельного напряжения сдвига — в минутах. При соприкосновении индентора с токопроводящим продуктом замыкается цепь управления электромагнитами, которые притягивают к себе пластины. По истечении заданного времени пластины, высвобождаваясь из зацепления, притягиваются одним из электромагнитов, фиксируя стрелку. Другая стрелка продолжает перемещаться по шкале 16, показывая через линзу 15 дальнейшее погружение индентора в продукт.

При исследовании нетокопроводящих продуктов начальное соприкосновение индентора с продуктом делается вручную через подъемный столик, далее процесс протекает аналогично.

Прибор нашел применение для исследования структурно-механических свойств (предельное напряжение сдвига, модуль упругости, эластичности, степень пенетрации и т. д.) как вязкопластичных продуктов (колбасного фарша, творога, теста, шоколадных масс и др.), так и упругоэластичных продуктов (колбасных изделий, сыров, хлебных изделий и др.).

Так как замер длится 3—10 с, прибор можно использовать для экспресс-контроля и регулирования технологических параметров процесса.

Полуавтоматический пенетрометр «Игла-72» использовался для исследования пищевых продуктов [14]. К прибору были разработаны инденторы разного диаметра и формы.

Пенетрометр для пастообразных материалов (рис. 5.7, а) имеет конический индентор 1 из пластмассы с углом при вершине 90° и диа-

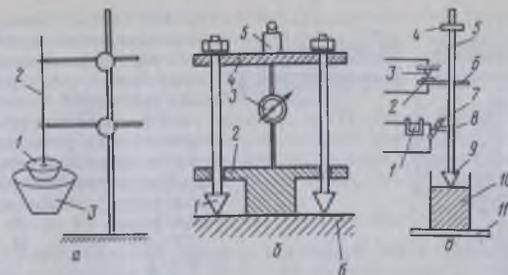


Рис. 5.7. Пенетрометры для кисломолочных продуктов: а — пастообразных; б — с тремя инденторами; в — с одним индентором

метром при основании 7 см. Он связан со стержнем 2, который закрепляется и регулируется в вертикальном положении. Масса конуса вместе со стержнем 45 г, однако есть возможность прибавлять гири и увеличивать массу до 1045 г. Внешнюю поверхность конуса намазывают вазелином и посыпают тальком, а поверхность материала выравнивают с помощью шпателя.

Конус пенетрометра опускается в материал 3 в течение 3 мин и потом вынимается — на поверхности материала получается точный рисунок погруженной части конуса, точный размер x которой определяется измерительным инструментом. Твердость D (в $г/см^2$) определяется по уравнению

$$D = 10(P - \rho V)/S, \quad (5.11)$$

где P — масса погружаемой системы, г; ρ — плотность материала, из которого сделан конус, $г/см^3$; V — погруженный объем, $см^3$; S — погруженная площадь поверхности конуса, $см^2$.

При $\rho = 1 г/см^3$ зависимость (5.11) приобретает вид:

$$D = 10(P - 0,131x^3)/(1,11x^2), \quad (5.12)$$

где x — диаметр основания погруженной части конуса, отмеченный тальком.

При заранее известном значении P замеряется только x и по таблице отсчитывается значение D .

Пенетрометр с тремя одинаковыми инденторами (рис. 5.7, б) предназначен для повышения точности измерения [А.с. № 723453 (СССР). — Б. И., 1980, № 11]. Прибор устанавливают площадкой 2 на исследуемый продукт 6 и конусы 1 приводят в соприкосновение с ним. В таком положении по индикатору 3 замеряют расстояние между площадками 2 и 4. Затем на верхнюю площадку 4 помещают груз 5 и после погружения конусов 1 в продукт 6 вновь регистрируют расстояние между 2 и 4. По этим замерам рассчитывают предельное напряжение сдвига. Прибор обеспечивает повышенную точность измерения предельного напря-

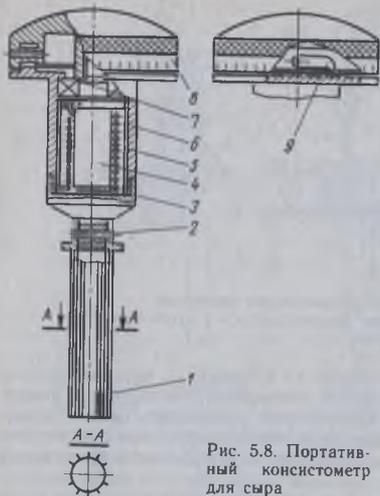


Рис. 5.8. Портативный консистометр для сыра

соприкосновения с индентором. Электромагнитом 1 стержень освобождается от фиксации, одновременно включается электросекундомер. Погружение продолжается до определенного расстояния, когда кольцо 4 достигнет пластины 6. При этом контакты 2 и 3 размыкаются и секундомер выключается. Время погружения индентора в исследуемый продукт определяет консистенцию продукта.

Портативный консистометр для сыра (рис. 5.8) служит для контроля структурно-механических свойств сыра [25]. В основу его положен интегральный принцип измерения, при котором разные слои сырной массы деформируются одновременно по всей глубине. Консистометр состоит из пробоотборника 1 и присоединенного к нему штифта 2 динамометра вращательного движения. Пробоотборник представляет собой тонкую заостренную трубку, имеющую на наружной стороне продольные ребра, которые при вращении его в сыре обеспечивают сдвиг продукта. Динамометр предназначен для измерения момента кручения. В корпус 6 динамометра заключены пружина 3, стержень головки динамометра 4, упорная втулка 5, шариковый подшипник 7, собачка 9 и головка со шкалой 8.

Корпус пробоотборника устанавливают в строго вертикальном положении на сыре и погружают его в сыр на определенную глубину, о которой судят по отметкам на внешней поверхности пробоотборника. Затем поворачивают головку динамометра по часовой стрелке. При этом собачка входит в зацепление с зубьями храпового венца и не дает головке возвращаться под действием силы закручиваемой пружины.

жения сдвига, так как в нем осуществляется одновременное исследование продукта в трех точках, расположенных под углом 120°.

В дальнейшем этот пенетрометр был усовершенствован: получил кольцевую опору, регулировочные винты и инденторы колоколообразной формы (А. с. № 857872 (СССР). — Б. И., 1981, № 31).

Пенетрометр с одним индентором (рис. 5.7, в) для измерения консистенции кисломолочных продуктов предназначен для установления времени погружения индентора на определенную глубину продукта, находящегося в емкости 10. Вначале стержень 5 с индентором 9 фиксируется пластиной 8, и с помощью подвижного столика 11 проба поднимается до

Когда эта сила становится равной силе сопротивления продукта, пробоотборник поворачивается, происходит сдвиг продукта, а собачка фиксирует максимальное отклонение шкалы прибора от нулевой отметки. Величина этого отклонения зависит от силы упругости пружины и предельного напряжения сдвига продукта.

Предельное напряжение сдвига θ_0 (в Па) определяется по формуле, выведенной из равенства моментов: внешний момент $M_{кр}$ (в Н·м), приложенный к головке, равен моменту силы сопротивления (среза) на цилиндрической части прибора и на его торце.

$$\theta_0 = 12 M_{кр} / [\pi(6D^2h + d^3)], \quad (5.13)$$

где D — максимальный диаметр сдвигаемой части продукта, м; h — глубина погружения шупа, м; d — внутренний диаметр трубки, м.

Среднеквадратичная ошибка одного измерения не превышает 6—9%. Недостаток прибора состоит в том, что на его показаниях отражаются скорость погружения и скорость вращения, которые являются субъективными факторами. Основные технические данные прибора: диаметр головки динамометра 70 мм; внутренний его диаметр 12 мм; рабочая длина пробоотборника 70 мм. Применение прибора позволяет характеризовать прочностные свойства сыров объективной физической величиной, выраженной в паскалях.

Прибор для изучения свертывания молока (рис. 5.9) основан на измерении напряжения в процессе коагуляции, которое дается в граммах, необходимых для проникновения специального стандартного колокольного индентора 2 в коагулят 1. Индентор, закрепленный на стойке, приводится от электродвигателя 4. Отсчет показаний ведется по шкале 3. Прибор был использован в лабораторных условиях для изучения влияния разных факторов на свертываемость молока.

Надо иметь в виду, что на пенетрометрах невозможно сделать более одного измерения из-за разрушения материала во время опыта. Кроме того, их невозможно использовать для контроля в промышленных условиях путем прямого монтирования в сычужных ваннах.

Для измерения прочности коагулята из овечьего и коровьего молока Л. Тодоровым (НРБ) созданы приборы для использования в производственных условиях, работающие на принципе зондирования. Индентор для овечьего молока имеет цилиндрическую форму с коническим концом, масса 9,5 г. Прибором измеряют прочность коагулята в разных точках сычужной ванны. Глубина погружения в начале процесса около 62—65 мм, в конце — 25—30 мм. Для коровьего молока разработан аналогичный прибор с цилиндрическим индентором массой 13,5 г и диаметром 1 см.

Для измерения консистенции майонеза использован специальный прибор [29], который представляет собой алюминиевый

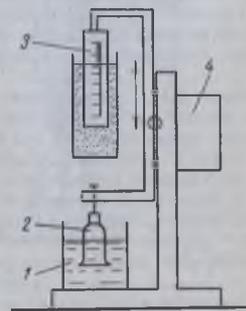


Рис. 5.9. Прибор для изучения свертывания молока

стержень длиной 13 см с конической головкой. Масса стержня 14,5 г. Его опускают в банку с майонезом. Глубина погружения отсчитывается прямо по шкале, нанесенной на стержень.

Пенетрометр для контроля консистенции мяса и мясoproдуктов (рис. 5.10) состоит из следующих частей: корпуса 1 с закрепленными на нем индикатором 2 и микровыключателем 12, рукоятки 14 с пусковым рычагом 13; на конце прибора имеется рифленый диск 10 с отверстием. Внутри корпуса 1 находится механизм перемещения площадки 6, который состоит из реверсивного электродвигателя 3 с редуктором и винтом 5, кинематически связанным с площадкой 6. На винте установлена направляющая рейка 4. Площадка 6 соединена с датчиком 7 для фиксации усилия внедрения [14].

Устройство работает следующим образом. При достижении контакта рифленой опоры 10 с продуктом 9 нажимается пусковой рычаг 13. Электродвигатель 3 через редуктор и винт 5 приводит в поступательное движение с постоянной скоростью площадку 6 с датчиком 7, на штоке которого установлен индентор 8. Зазор между исследуемым продуктом 9 и индентором 8 можно регулировать. При внедрении индентора в продукт появляются силы, препятствующие внедрению, которые компенсируются силами упругости пружины 11, находящейся в датчике 7.

Фиксирование показаний осуществляется по индикатору 2, градуированному в единицах величины внедрения индентора 8 с учетом де-

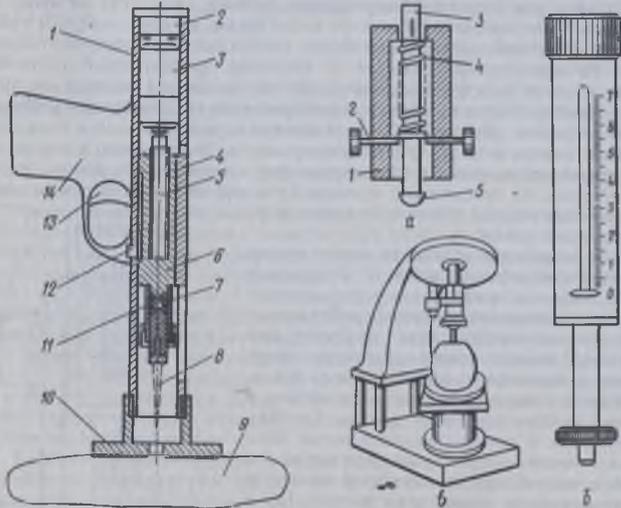


Рис. 5.10. Пенетрометр для мясoproдуктов

Рис. 5.11. Пружинные пенетрометры: а — переносной Шернеров; б — ручной; в — текстурограф

формации пружины 11. Ход индентора ограничивается конечным выключателем 12.

Пенетрометр Шернеров (рис. 5.11, а) для оценки консистенции мяса и колбас имеет полый конус с подпружиненным полусферическим индентором 5, закрепляемым фиксатором 2. Когда индентор прижимается к продукту, пружина 4 сжимается и хвостовик штока 3 с нанесенными на нем делениями выходит из корпуса 1. Измерения заканчивают при соприкосновении корпуса прибора с продуктом, т. е. измеряют две величины: перемещение штока относительно корпуса и усилие вдавливания, которое определяется степенью сжатия пружины.

Пенетрометры применяются широко для измерения механических характеристик фруктов. Они состоят из трех основных элементов: механизма для приложения силы, индикатора и ячейки для фиксирования образца.

Ручной пенетрометр (рис. 5.11, б) предназначен для практических замеров зрелости фруктов. Он состоит из цилиндра, калиброванной пружины и поршня, на котором смонтирован рабочий орган — стержень диаметром 8 мм и ограничитель. Плод подвергается вдавливанию рабочего органа до ограничителя, при этом по шкале отсчитывается приложенная сила.

Этот прибор широко используется во многих странах для практического замера зрелости яблок, груш, айвы, персиков, томатов и др. Используя пружину силой 0—500 г и рабочий орган диаметром 2 мм, подобным пенетрометром можно определять зрелость вишни, слив [28].

Текстурограф (рис. 5.11, в) позволяет избежать субъективности при работе. В этом приборе плод помещается в фиксированную ячейку на столе и поднимается гидравлической системой к неподвижному индентору диаметром 8 мм. Сила, необходимая для проникновения рабочего органа в плод до ограничителя, записывается на текстурограмме [32].

5.3. КОНСИСТОМЕТРЫ И ПЛАСТОМЕТРЫ

Эти приборы служат для измерения сдвиговых характеристик в области практически не разрушенных структур при малых деформациях. Из них большое применение получили приборы с плоскопараллельным зазором, который может быть расположен вертикально, горизонтально и наклонно.

Модифицированный прибор Вейлера—Ребиндера (рис. 5.12) предназначен для определения упругих свойств тиксотропных суспензий и зелей. Принцип действия прибора основан на тангенциальном смещении пластинки внутри системы: прямоугольная пластинка 5, скрепленная с нитью, полностью погружается в исследуемую суспензию, налитую в стаканчик 1, и подвешивается к тарировочной пружине 2. Стаканчик опускается с постоянной скоростью. Смещение пластинки и растяжение пружины отсчитываются при помощи микршкалы 3 и микроскопа 4. Время определяется по секундомеру. Метод позволяет легко получать кривые деформация—напряжение.

Напряжение сдвига θ вычисляют по деформации пружины, соответствующей этой деформации нагрузке P и площади боковой поверхности пластины S :

$$\theta = P/(2S). \quad (5.14)$$

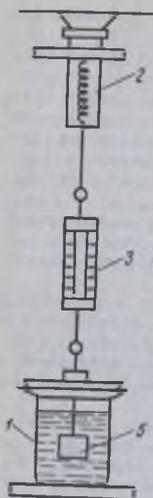
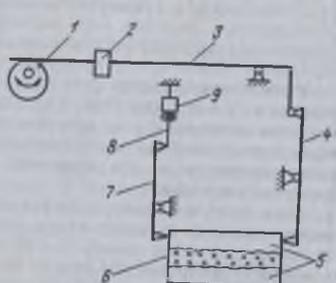


Рис. 5.12. Модифицированный прибор Вейлера — Ребиндера

Рис. 5.13. Пластометр Д. М. Толстого



Предельное напряжение сдвига θ_0 , характеризующее прочность структуры исследуемого материала, определяется по наибольшей нагрузке P_{\max} .

Метод тангенциального смещения пластины позволяет находить не только θ_0 , но и модули упругости, эффективную вязкость, изучать процесс релаксации, а также снимать полные деформационные кривые при разных скоростях деформации. Приборы, основанные на этом методе, обладают большой чувствительностью и применимы для исследования свойств материалов в большом диапазоне — от слабоструктурированных золь и суспензий до твердообразных систем с высокопрочной структурой.

И. А. Думанский установил полную инвариантность метода по отношению к размерам пластин и форме сосуда. На приборах, основанных на этом принципе, определяли структурно-механические свойства крахмальных клейстеров, конфетных масс, томатных и других продуктов, определяли и влияние ПАВ на структурно-механические свойства теста и качество хлеба.

Методы определения структурно-механических свойств дисперсных систем, разработанные П. А. Ребиндером и его школой, позволяют по кривым ползучести и восстановления упругой деформации получить основные константы исследуемого материала, которые необходимы для расчета процессов пищевых производств.

Пластометр Д. М. Толстого (рис. 5.13) с параллельно смещающейся пластиной служит для определения констант вязкоупругопластичных

масс с практически не разрушенными структурами, наиболее полно оценивающих их свойства. С помощью пластометра определяют модуль быстрой эластичной деформации сдвига G_1 (в Па), модуль медленной эластичной деформации G_2 (в Па), наибольшую пластичную вязкость η_1 (в Па·с) и условный статический предел текучести θ_k (в Па). Эти константы материала рассчитывают по формулам

$$G_1 = \theta a / \varepsilon_0; \quad G_2 = \theta a / (\varepsilon_m - \varepsilon_0); \quad (5.15)$$

$$\eta_1 = (\theta - \theta_k) j; \quad \theta = P g / S, \quad (5.16)$$

где θ — напряжение сдвига, Па; a — толщина слоя массы, м; ε_0 — начальная (условно-мгновенная) деформация, м; ε_m — замедленная упругая деформация, м; j — скорость сдвига, с^{-1} ; P — нагрузка, Н; S — площадь пластины, м^2 .

Деформацию образцов массы b (см. рис. 5.13) измеряют при помощи рычага 7 и упругой балочки 8 с наклеенными на нее тензорезисторами 9; включенными в цепь усилителя. Сдвигающее усилие на образец создают при повороте эксцентрика 1 гирями 2, которые устанавливают на неравноплечем рычаге 3 прибора. От этого рычага усилие на массу передается через равноплечий рычаг 4 и верхнюю пластину 5. Пластины, примыкающие к массе, имеют рифления, направленные в сторону, противоположную направлению усилий, деформирующих массу. Показания резисторов записываются на осциллографе. Образец массы помещают между пластинами так, чтобы зубчики их полностью погрузились в массу. На таком приборе были исследованы реологические свойства теста в зависимости от условий созревания, определены мгновенная упругая и эластичная деформации, модули упругости и эластичности, пластичная вязкость [15].

Пластометр с плоскопараллельным зазором на наклонной плоскости разработан на основании оптического метода, предложенного Д. М. Толстым. Прибор предназначен для исследования дисперсных коллоидных систем при постоянном статическом напряжении. При этом заменили оптический метод измерения деформации сдвига механическим методом [19]. Прибор позволяет измерять деформации сдвига в пределах 5 мм при максимально допустимой скорости деформации 1 мм/мин; вязкость измеряется в пределах 10^2 — 10^5 Па·с. На этом приборе исследовали свойства хлебопекарного теста, фруктово-желейных корпусов конфет, кондитерского и макаронного теста.

Пластометр с плоскопараллельным горизонтальным зазором (рис. 5.14) предназначен для измерения упругости и вязкости материалов, которые сохраняют свою форму во время опыта. Материал формируется в виде двух пластин 8 и 9; между ними помещается рифленая пластина 7, которая соединена нитью через шкивы 2 и 3 с грузами 1. Материал винтами 4 и 5 подвижного стола 6 слегка сжимают для того, чтобы он прилип к пластинам. В зависимости от груза 1 материал подвергается сдвигу. Деформация сдвига и скорость перемещения пластины определяются по указателю 10 при помощи микроскопа.

С целью увеличения точности измерения малых перемещений микроскоп был заменен следящим индукционным преобразователем и регистрирующим устройством, которое позволяет определить перемещение пластины 7 до $6 \cdot 10^{-5}$ мм с точностью до 1%.

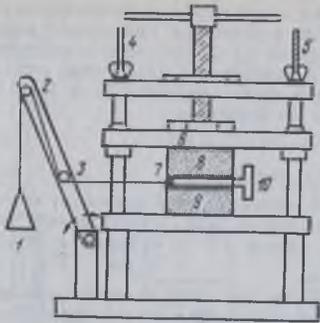


Рис. 5.14. Пластометр с горизонтальным зазором

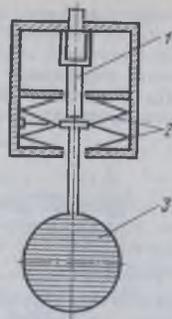


Рис. 5.15. Автоматический пластометр ЛТИХПа

Для измерения упругого последействия груз *1* снимают и наблюдают обратное движение указателя *10* до его остановки. Чтобы обеспечить минимальное разрушение материала, перемещение пластины *7* не должно превышать 2—3 мм. Вязкоупругие материалы ведут себя вначале как твердые, а потом проявляют текучесть. На этом приборе по кривым ползучести и восстановления упругой деформации определяют константы материала по известным методикам.

Описанным выше приборам с вытаскиваемой пластиной аналогичны приборы с осевым смещением цилиндров. Исследуемый продукт помещается между коаксиальными цилиндрами, свойства его определяются по известным параметрам прибора и прилагаемым усилиям для перемещения внутреннего цилиндра.

Автоматический пластометр ЛТИХПа (рис. 5.15) предназначен для контроля процесса созревания кисломолочных продуктов. Принцип действия прибора основан на определении напряжений тангенциального сдвига, возникающих при смещении пластины *3* под действием электромагнитного поля, создаваемого катушкой *2*, в контролируемой среде. Контроль осуществляется без отбора проб при погружении герметичного измерительного преобразователя непосредственно в резервуар со средой. Для регистрации глубины погружения служит датчик *1*.

Пределы измерения пластометром тангенциального сдвига 5—40 Па; погрешность измерения $\pm 5\%$; время измерения около 10 с; напряжение питания 220 В. Габаритные размеры прибора: блока управления и питания $0,3 \times 0,2 \times 0,3$ м; измерительного преобразователя $0,11 \times 0,3$ м.

Консистометр для густых материалов (рис. 5.16) предназначен для определения консистенции концентрированных суспензий и паст (например, сметаны). При срабатывании электромагнитной защелки *4* и стопора *2* за счет усилия пружины *3* пластина *6* выдергивается из исследуемого продукта; при этом на поверхности пластины остается материал, толщина которого пропорциональна его консистенции. Облегченный корпус *5*, подвешенный на магнитной пружине *7*, поднимается

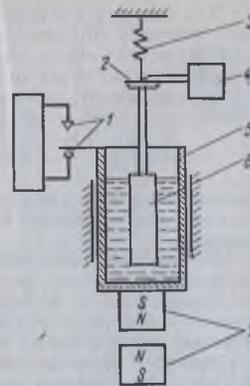


Рис. 5.16. Консистометр для густых материалов

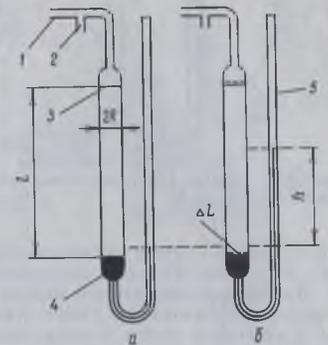


Рис. 5.17. Прибор для определения модуля сдвига упругих материалов: а — положение ртути до опыта; б — положение ртути после создания давления

и замыкает верхний контакт датчика *1*. Жидкая среда с пластины *6* постепенно стекает обратно в корпус *5*. По мере стекания масса корпуса *5* увеличивается и он опускается, уменьшая зазор магнитной пружины *7*. При этом верхний контакт датчика *1* размыкается и он подает сигнал, запускающий измеритель времени. При замыкании нижнего контакта датчика *1* подается сигнал, останавливающий измеритель времени. Отмечается промежуток времени опускания корпуса от верхнего до нижнего контакта датчика *1*. Таким образом фиксируется время стекания с пластины *6* в корпус строго определенной массы исследуемого продукта, что дает возможность определять его консистенцию.

Прибор для определения модуля сдвига материалов, проявляющих высокую степень упругости, состоит из стеклянной капиллярной U-образной трубки (рис. 5.17), одно из колен которой переходит в широкую трубку *3* диаметром 7,5 мм, а другое — *5*, диаметром 0,5 мм, градуировано в миллиметрах. Трубка заполнена ртутью *4* до основания расширяющейся части. В широкую трубку вводится пипеткой 20 см³ раствора, который после образования геля (например, гель из желатина) подвергается различным условиям сдвига и деформации под давлением воздуха, подаваемого через систему отводов *1* и *2*.

Давление воздуха *p* измеряется манометром. Ртуть под давлением воздуха смещается, поднимаясь по градуированному капилляру на высоту *h*. Модуль сдвига определяется по формуле

$$G = \frac{pR^2}{4L\Delta L} \quad (5.17)$$

где ΔL — смещение ртутного мениска.

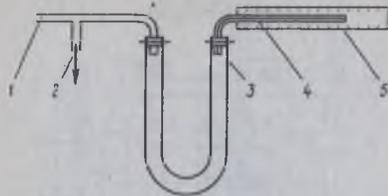


Рис. 5.18. Прибор для определения модуля сдвига мягких гелей

Так как точное определение величины ΔL простыми приборами невозможно, обычно расчет ведется по величине смещенного объема. Тогда

$$G = \frac{\rho R^4}{8Lr^2h} \quad (5.18)$$

где ρ — давление ртути после ее смещения; r — радиус капилляра.

Адгезия материала к стенке большая, поэтому отсутствует его скольжение. Максимальный сдвиг определяется по формуле $4\Delta Q/\pi R^3$, а максимальное напряжение на стенке — по формуле $\rho R/2L$.

Прибор для определения модуля сдвига мягких гелей, а также неупругой деформации при сдвиге (рис. 5.18) аналогичен вышеописанному. U-образная трубка 3 имеет диаметр 1,5 см. Правое колено этой трубки присоединено к горизонтальному капилляру 4, содержащему каплю окрашенного спирта. Воздух подается через систему отводов 1 и 2. Отсчет показаний ведется по шкале 5.

5.4. ПРИБОРЫ СЖАТИЯ И РАСТЯЖЕНИЯ

Для определения сопротивления пищевых материалов сжатию предназначены приборы ИДК-1, ПЭК-ЗА [22], ОА-204 [8], рассмотренный выше АР-4/2 и др.

Прибор А. Н. Познышева (рис. 5.19, а) предназначен для испытания образцов мяса на одноосное сжатие и на срез.

При исследовании деформации образца на сжатие используется толкатель 14. В камеру 4 на матрицу 1 накладывают одну из пластин 16 с испытуемым образцом 2, сверху которого размещают другую пластину; при этом толкатель 14 удерживают за выступы 6 и 9 в крайнем верхнем положении. На рычажную систему 7 навешивают груз 13 и одновременно отсоединяют от нее тросик 15. Под действием груза толкатель перемещается вниз, сжимает образец и выступом 9 воздействует на индукционный датчик 18, сигнал от которого непрерывно передается на записывающее устройство 10.

Во всех случаях исследования концевой выключатель 5 срабатывает под действием выступа 6 в момент нахождения пуансона 8 или толкателя 14 в крайнем нижнем положении.

При исследовании образца на срез его укладывают на матрицу 1, при этом груз 13 снимают, а пуансон 8 предварительно поднимают вручную за выступы 6 и 9 в крайнее верхнее положение. Затем пуансон опускают на образец и включают электродвигатель 17. Под воздействием рычажной системы 7 пуансон начинает перемещаться вниз с определенной постоянной скоростью, преодолевает сопротивление образца и срезает его. Благодаря конусообразной выемке 3 смятие образца устраняется. Усилие, необходимое для перемещения пуансона, измеряется с

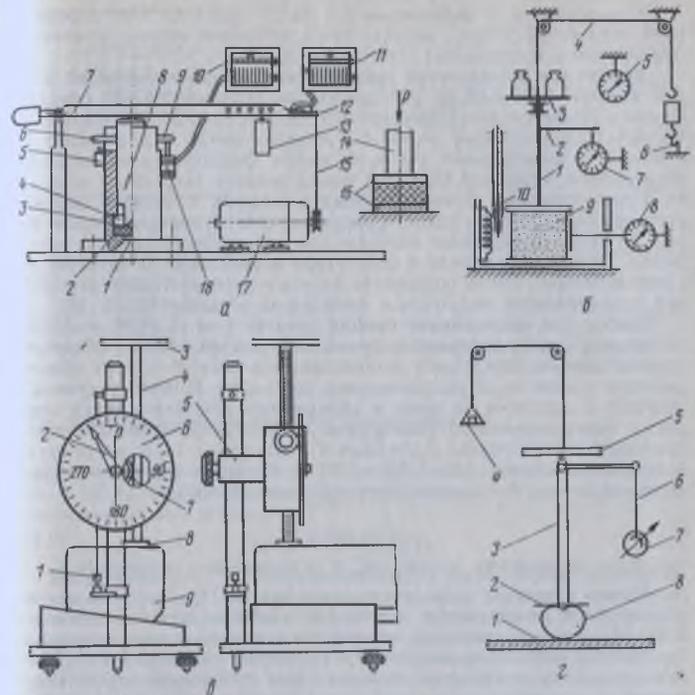


Рис. 5.19. Приборы для испытания на сжатие: а — мясopодуктов; б — конфектных масс; в — хлебных изделий; г — томатов

помощью тензометрической балки 12 и передается на регистрирующий прибор 11. Электродвигатель постоянного тока позволяет вести исследование при различных скоростях пуансона.

Прибор для испытания на ползучесть кремковых конфектных масс показан на рис. 5.19, б. Груз определенной массы устанавливается на площадку 3, соединенную штоком 1 с нажимной пластиной. Площадка нитью 4 соединена с затвором 6. Прибор продукта 9 диаметром 3 см и высотой 3 см подвергается действию мгновенной нагрузки. Деформация определяется в течение 80—100 с по индикатору 8, а также по индикатору 7, соединенному кронштейном 2 со штоком 1. Время отсчитывается по секундомеру 5, температура контролируется по термометру 10.

После снятия показаний мгновенной деформации площадка с грузом поднимается и производится мгновенная разгрузка продукта.

В зависимости от напряжения (от $28 \cdot 10^2$ до $85 \cdot 10^2$ Па) определяются мгновенный модуль, модуль сдвига, объемный модуль, остаточная деформация и коэффициент Пуассона [27].

Прибор для исследования упругих и пластичных деформаций хлебных изделий (рис. 5.19, в), работающий на принципе сжатия образца, создан в Ленинградском отделении ВНИИХПа. Индикатор 5 состоит из вертикальной подвижной рейки 4, зубчатого колеса 7 и шкалы 6 со стрелкой 2. Перемещение рейки по высоте фиксируется по шкале 6, цена деления которой 0,1 мм. На торцах рейки 4 закреплены площадка 3 для установки грузов и площадка-индентор 8. Прибор снабжен противовесом 1. Пробы хлеба 9 имели различную выдержку после выхода из печи. Деформацию получали при увеличении усилий до разрушения. При этом замеряли и остаточную деформацию. В качестве упругопластичных свойств определяли модуль упругопластичных деформаций, относительную упругость и относительную пластичность [5].

Прибор для исследования свойств томатов (рис. 5.19, г) позволяет определять усилия деформации при осевом сжатии томатов различной степени зрелости. На столе 1 устанавливается томат 8. К нему прикладывается усилие гирь, расположенных на столике 5. Через стержень 3 индентор 2 действует на томат и деформирует его. Деформация замеряется через стержень 6 индикатором 7. Масса противовеса 4 равна суммарной массе столика 5, стержня 3 и индентора 2. По результатам исследований строят график $\Delta D - \Delta D(P)$ и находят коэффициент пропорциональности K — коэффициент податливости плода:

$$K = \Delta D / P, \quad (5.19)$$

где ΔD — деформация плода, мм; P — сжимающее усилие, Н.

Томаты исследуют и на двустороннее сжатие [8]. При этом они деформируются между двумя пластинами разными грузами, начиная с 4,905 Н и до нагрузки, при которой плод начинает растрескиваться. Замеряются уменьшение высоты Δh и увеличение диаметра Δd в сравнении с начальными средними размерами h и d . Размеры определяются оптически при пятикратном увеличении с точностью до 0,05 мм. По этим данным подсчитываются относительная продольная деформация тела по высоте ($E = \Delta h/h$) и относительная поперечная деформация ($E' = \Delta d/d$). Затем определяются условный модуль упругости и коэффициент Пуассона.

Нагрузка на томаты не должна превышать 34,33 Н, условный модуль упругости первого рода для исследованного сорта равен $(8 \div 8,1) \times 10^4$ Па и коэффициент Пуассона — $0,14 \div 0,15$.

Эластограф ОА-222 (рис. 5.20, а) выпускаемый в ВНР, позволяет исследовать эластичную и пластичную деформации хлебного мякиша. Специальным приспособлением вырезается проба 2 диаметром 34 или 56,5 мм. Ручкой 5 она фиксируется между плоскостями 6 и 8. С помощью ручки 7 медленно и осторожно устанавливаются грузы 3 (675 или 1875 г). Потом кнопкой 1 одновременно включаются подача груза, секундомер и пишущее устройство 4, а через 3 мин все выключается. Полученная на диаграмме кривая называется эластограммой (рис. 5.20, б). По ней определяются следующие величины: A — полная деформация в условных единицах — EE ($A = 800$ EE на 3-й минуте); B — эластичное

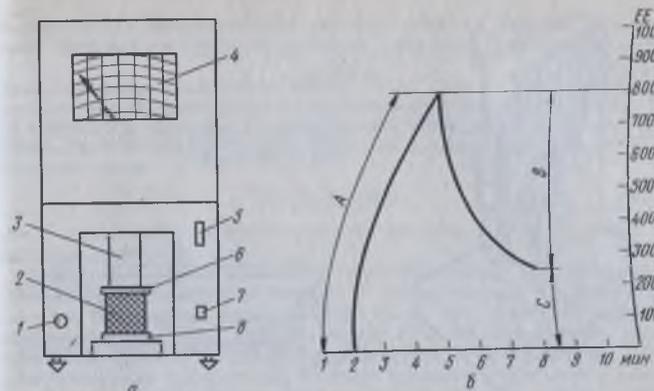


Рис. 5.20. Схема эластографа (а) и эластограмма (б)

восстановление ($B = 650$ EE на 6-й минуте); C — пластичная деформация в EE ($C = 150$). Важным показателем является так называемая относительная эластичность

$$e_{отн} = (B/A) 100 \%. \quad (5.20)$$

Матурограф (рис. 5.21) предназначен для исследования хлебопекарного теста. Рычаг 1 на одном конце шарнирно закреплен, на другом имеет ролик, находящийся в контакте с кулачковой шайбой. Усилие замыкания кинетической пары создается грузом 4, асимметрично установленным на рычаге. Стержень 2 с жестко закрепленным на нем диском 3 механически связан через кулачок 5 с регистрирующим пером 6. Порция теста (150 г) закладывается в стакан и помещается в камеру, где поддерживаются температура $30^\circ C$ и относительная влажность 80—85%. В начале испытания расстояние между дном стакана и диском минимальное (36 мм).

Прибор регулируется так, чтобы давление диска на тесто достигло 200 ед., в которых тарирован матурограф. Каждые 2 мин автоматически происходит механическое сжатие теста, помещенного в стакан, после чего диск как постоянный груз давит на бродящее тесто. В зависимости от количества газа, выделенного при брожении, газоудерживающей способности и упругости теста диск поднимается до различных уровней, но через 2 мин опять вдавливается в тесто. Перемещение диска фиксируется на диаграмме регистрирующего механизма.

Прибор для испытания вязкопластичных материалов на растяжение (рис. 5.22) создан в МТИППе. Деформации подвергаются образцы (например, тесто) с постоянными размерами: диаметром 10 мм и длиной 100 мм, свободно плавающие на поверхности концентрированного раствора соли или сахара. Максимальное абсолютное удлинение образца 300 мм.

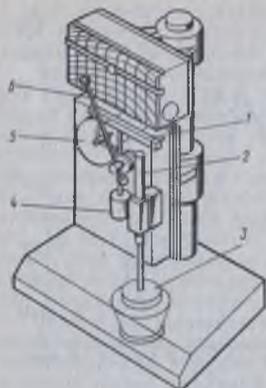


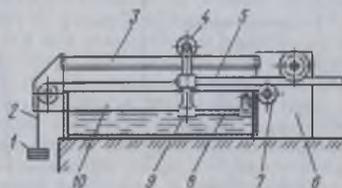
Рис. 5.21. Матурограф

Прибор состоит из ванны 10, в которую наливается раствор соли или сахара. Концы плавающего на поверхности раствора образца 8 закрепляются в зажимах 9, один из которых неподвижен. Измерительная часть представляет собой мерную линейку 3, закрепленную на направляющей. Нагружающий механизм состоит из стержня 5, грузов 1, на нити 2, роликов 4 и 7, кронштейнов 6. Концентрация солевого или сахарного раствора подбирается такой, чтобы образец (например, тесто) свободно плавал на поверхности. Термостатирование раствора осуществляется с помощью змеевика, соединенного с термостатом.

Образец из испытуемого материала закрепляют в зажимах пружинного типа. Фиксатор (на схеме не показан) освобождает стержень, и под действием груза образец удлиняется. После прекращения деформации стержень вновь фиксируется, и величина удлинения записывается. Образец растягивают до разрыва. Прибор для испытания на растяжение вязкопластичных материалов предназначен для научно-исследовательских работ [12].

Прибор Н. И. Назарова и Ю. В. Калинина (рис. 5.23, а) работает на растяжение при вертикальном расположении образца (макаронного теста) [17]. Из выпрессованной ленты теста штамп-шаблоном вырезают пробу 2, которая крепится в зажимах 1 и подвергается растяжению с помощью винта 5. В закрытой камере 4 расположены гигрометр 7, нагревательный элемент 6, электроконтактный термометр 8 и вентилятор 3. Усилие от образца передается на упругий элемент 9, а с него через тензодатчики 10, мостовую схему 11 и усилитель 12 — на осциллограф 13. Пробу теста подвергают деформации растяжения, которая записывается с помощью осциллографа в виде графика. По осциллограмме (рис. 5.23, б) с учетом ее масштабов находят реологические характеристики испытуемой пробы теста. Полученная осциллограмма имеет два участка кривой. Первый из них характеризует упругие свойства теста, которые количественно выражаются предельным напряжением.

Рис. 5.22. Прибор МТИППа для испытания на растяжение



Второй участок характеризует пластичные свойства, которые количественно выражаются двумя величинами: пределом прочности σ_b

$$\sigma_b = P_b/S_0, \quad (5.21)$$

где P_b — максимальная нагрузка в момент пластичной деформации, Н; S_0 — начальное поперечное сечение пробы теста, m^2 ; и относительным остаточным удлинением δ пробы теста, выражаемым в процентах к ее начальной длине:

$$\delta = (l - l_0)100/l_0, \quad (5.22)$$

где l — длина пробы в момент разрыва (разрушения), м; l_0 — начальная длина пробы, м.

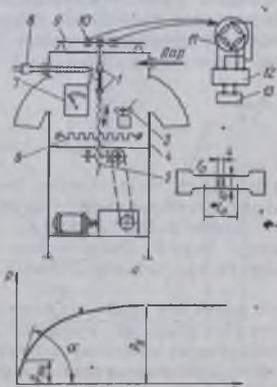
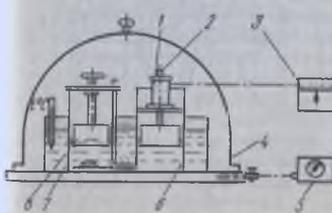
Прибор ПР (рис. 5.24) создан в УкрНИИПродмаше для определения деформационно-прочностных свойств и энергетических характеристик теста при растяжении образца под вакуумом. Под действием вакуума, создаваемого вакуум-насосом 5 в сосуде 4, объем исследуемого куска теста увеличивается, а плотность уменьшается. При уменьшении плотности теста ниже плотности масла тесто всплывает, достигает отражателя 8 и в дальнейшем деформируется под ним. В связи с этим уровень масла в сосудах 6 и 7 увеличивается, сердечник 2 электромагнитной катушки 1 поднимается и на ленте прибора 3 записывается изменение объема образца с течением времени, в том числе начальный и конечный объемы.

По заданному давлению растяжения и записанной прибором деформации определяют прочностные, энергетические и деформационные характеристики теста.

Вискоэластограф для исследования качества зерновых культур и их продуктов (клейковины, пастообразных продуктов, риса и др.) путем определения их вискоэластичных свойств разработан в Центральном научно-исследовательском сельскохозяйственном институте Франции

Рис. 5.23. Прибор Н. И. Назарова и Ю. В. Калинина (а) и полученная на нем осциллограмма (б)

Рис. 5.24. Прибор ПР для растяжения образца под вакуумом



(INRA) [30]. Принцип его работы состоит в следующем: проба материала, оформленная в виде пластины толщиной в несколько миллиметров, закрепляется в горизонтальном положении на специальных держателях. На эту пластину действуют перпендикулярно грузом. Через определенное время груз снимают. В течение всего опыта измеряют изменение толщины пластины цифровым счетчиком. По полученным данным строят график (рис. 5.25), где H_0 — начальная толщина пластины; H_1 — толщина пластины в момент перед разгрузкой; H_2 — конечная толщина. Анализ кривой при нагрузке и разгрузке (восстановлении) дает возможность комплексно оценивать реологические свойства данного продукта.

Прибор В. Л. Адаманиса (рис. 5.26) предназначен для испытания теста на растяжение. Продукт 1 в виде пластины захватывается между кольцами 2, а шток с конусом 3 устанавливается в положение касания его с исследуемым образцом. Тесто растягивается на заданную величину за точно определенное время, при этом на барабане пером записывается динамика процесса растяжения исследуемого образца.

Для исследования линейной деформации теста (одноосное растяжение) используются экстенсографы, на которых определяют модуль упругости, влияние продолжительности замеса и отлежки теста на его структурно-механические свойства.

Экстенсограф Брабендера (рис. 5.27) работает по принципу одноосного растяжения теста. С целью исследования замешивается 300 г теста до определенной консистенции (500 фаринографских единиц). Оно делится на два куска по 150 г и с помощью специального гомогенизатора оформляется в виде сферы. Потом с помощью специальных валков тесто формуются в виде правильного цилиндрического жгута и подвергается отлежке в течение 45 мин. Все системы прибора термостатированы до 30 °С. Для смягчения колебания рычажной системы служит масляный амортизатор 8.

После отлежки цилиндрическая проба теста 1 закрепляется держателями 2. Рычаг 7 приводится в движение электродвигателем 6 и перемещается с постоянной скоростью вертикально вниз, перпендикулярно оси исследуемого материала. Усилия, возникающие при растяжении теста, через систему рычагов 3 передаются механизму 5, к которому при-

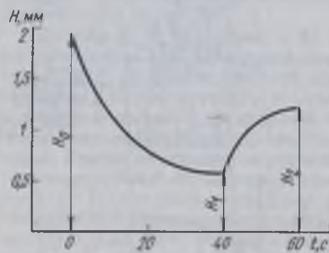


Рис. 5.25. Эластограмма, полученная на вискоэластографе

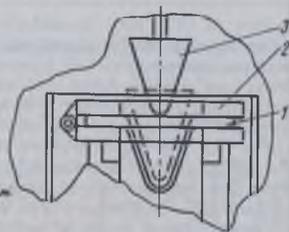


Рис. 5.26. Прибор В. Л. Адаманиса

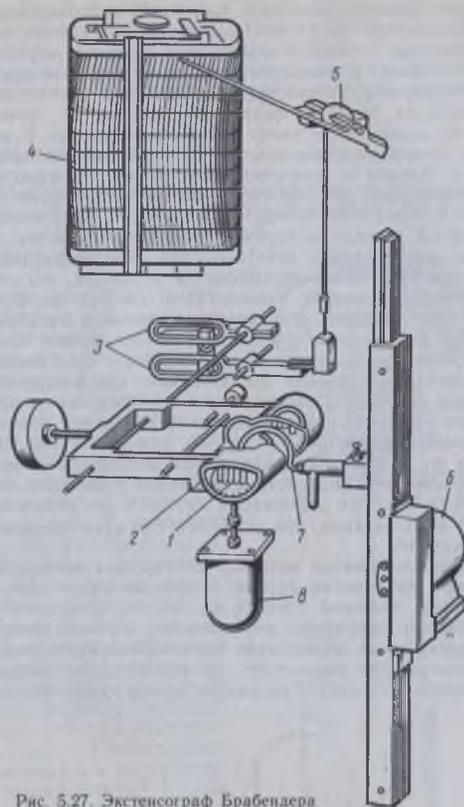


Рис. 5.27. Экстенсограф Брабендера

соединен пилющий рычаг. Регистрирующее устройство 4 включается одновременно с электродвигателем 6. На бумаге вычерчивается кривая растяжения теста — экстенсограмма. При обрыве тестового жгута регистрирующее устройство автоматически выключается. Второй кусок теста обрабатывается тем же способом. При правильной работе обе кривые должны совпасть.

Для исследования влияния времени на свойства теста его снова обрабатывают на гомогенизаторе и снова исследуют на экстенсографе через 90—135 мин. Таким образом на приборе может быть исследовано влияние состава теста, способа его обработки и т. д. на эластичную деформацию и растяжимость.

Альвеограф Шопена (рис. 5.28) позволяет контролировать качество теста. Принцип измерения состоит в двусосном растяжении пластины из теста, которая под влиянием воздушного давления образует пузырь определенного объема с тонкой стенкой. Такой способ ламинарного растяжения воспроизводит и имитирует деформацию теста под влиянием газового давления биологического или химического происхождения.

В месилке альвеографа замес теста продолжается 6 мин. Потом формируется несколько одинаковых по размерам дисков теста, которые кладутся для отлежки в термостат 1 на 20 мин. Температура 25 °С в месилке и альвеографе регулируется электронным способом. Проба теста зажимается герметично между фланцами 3, сверху находится воздушная камера 4, а снизу по трубке 2 подается воздух под давлением, создаваемым компрессором; дебит воздуха измеряется дебитометром. Пластина теста постепенно превращается в пузырь, все увеличивающийся в объеме, и в момент, зависящий от свойств теста, пузырь лопается. Давление воздуха, создаваемое в процессе раздувания теста, регистрируется на самопишущем приборе 5. Полученные кривые усредняют и получают одну кривую — альвеограмму. Для характеристики теста пользуются следующими показателями: максимальная ордината (максимальное давление), выражающая максимальное сопротивление теста или его упругость; растяжимость теста (длина альвеограммы); время, в течение которого формируется пузырь до его разрушения.

Величина w , пропорциональная площади альвеограммы, представляет собой специфическую работу деформации и является выражением механической работы для деформации 1 г теста для получения пузыря. При $w > 200$ мука сильная, при $w = 100 \div 200$ мука средняя, при $w < 100$ мука слабая.

Для усовершенствования методики работы на альвеографе исследована динамика расширения пузыря в зависимости от его геометрии (площадь, объем, толщина стенки) и времени, предложена методика изучения кинетики структурно-механических свойств теста [11].

У альвеографа есть электронное приспособление, с помощью которого определяют время релаксации (время, в течение которого напряжение снижается в 2 раза). Растяжение пробы продолжается до полу-

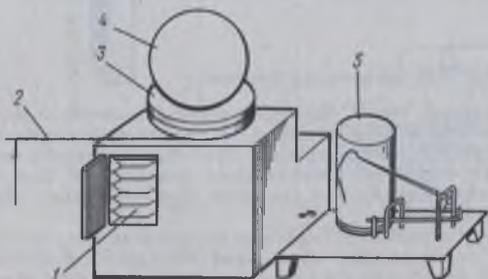


Рис. 5.28. Альвеограф Шопена

чения пузыря объемом 100 см³ при помощи постоянного дебита воздуха — 0,096 м³/ч. После этого напряжение снимается (подача воздуха прекращается) и определяется время, в течение которого давление уменьшается вдвое, или средняя скорость релаксации. Все величины отсчитываются автоматически, а давление измеряется специальным датчиком.

5.5. ПРИБОРЫ КРУЧЕНИЯ

Технологические приборы, которые работают на принципе кручения, широко используются в молочной промышленности. На них измеряют торсионные силы, возникающие между молоком и погруженным в него телом.

Торсиометр (рис. 5.29), разработанный Скоттом и Блэром, удобен для практических целей, позволяет определять прочность сгустка в сырной ванне и сигнализирует о готовности его к резанию.

Прибор состоит из цилиндра 7, прикрепленного с помощью стержня к спиральной пружине 4. Он погружается полностью в молоко. С помощью зубчатой передачи 1 торсионная головка 2 вращается до тех пор, пока стрелка 6 не коснется к контакту 5. При этом двигатель включается на реверс. Угол колебания цилиндра 15°, период колебания около 30 с. Когда начинается процесс свертывания молока, колебания цилиндра замедляются и начинают отставать от движения торсионной головки, пружина сжимается и показания отмечаются на шкале 3. Прибор можно легко приспособить к автоматическому регистрированию и при определенном состоянии плотности сгустка подавать звуковой сигнал. Этот прибор был использован для определения времени свертывания молока и образования коагулята при использовании пепсина.

Тромбозластограф (рис. 5.30) также работает на принципе кручения и колебания рабочего тела в молоке. Он широко используется для исследования процесса сычужного свертывания молока, дей-

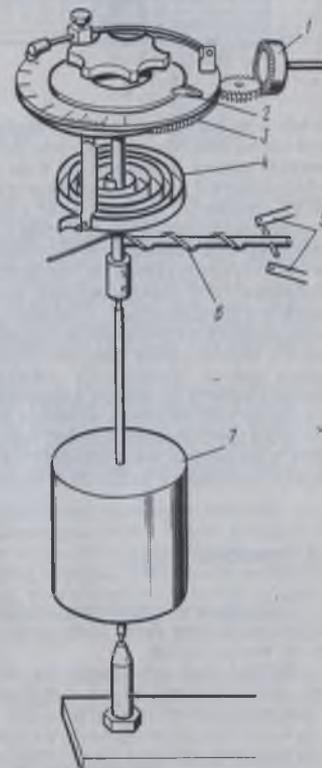


Рис. 5.29. Торсиометр

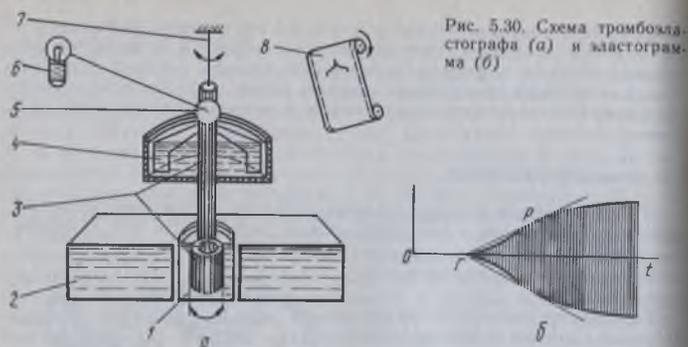


Рис. 5.30. Схема тромбоза-стографа (а) и эластограмма (б)

ствует как вискозиметр с крутильными колебаниями [31]. Принципиальная схема прибора дана на рис. 5.30, а. Молоко наливается в цилиндрическую кювету 1 диаметром 8 мм и высотой 12 мм, которая находится в термостате 2, где поддерживается температура 30 °С. Кювета периодически колеблется на угол 4,45° в течение 9 с. В центр кюветы погружен торсионный цилиндр 3 диаметром 6 мм, подвешенный на нити 7. Цилиндр демпфируется устройством 4. Изменение вязкости молока при его свертывании устанавливается по амплитуде крутильных колебаний торсионного цилиндра. Его поворачивание отсчитывается при помощи источника света 6 и отражателя 5. Световой луч направляется на кимограф 8, где записывается на фотопленке, движущейся со скоростью 2 мм/мин. Получается эластограмма (см. рис. 5.30, б), показывающая процесс свертывания молока. Участок ОГ характеризует время от момента внесения пробы в кювету до начала проявления упругих свойств в сгустке. Точка Г, в которой эластограмма начинает разветвляться, называется гель-точкой процесса свертывания молока. Амплитуда, полученная на графике, является показателем механических свойств коагулята. Используя график, можно определить различные параметры [31].

5.6. ПРИБОРЫ СРЕЗА

Структурно-механические свойства и прочность материалов можно исследовать, определяя силу среза. Используется для объективной оценки их консистенции.

Прибор для испытания на срез колбасных изделий показан на рис. 5.31. Рабочий орган 4 прибора установлен в рейках 2. Поступательное движение сообщается ему от электродвигателя 1 через редуктор 3. Усилие среза образца передается на балку 5, которая, изгибаясь, деформирует тензодатчик 6, сигнал передается на потенциометр 7. Чем больше усилие среза, тем больше отклонение стрелки потенциометра; пик кривой показывает максимальное усилие. Эксплуатация прибора в

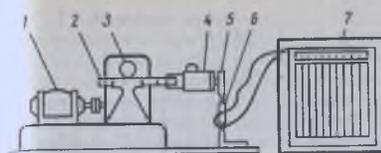
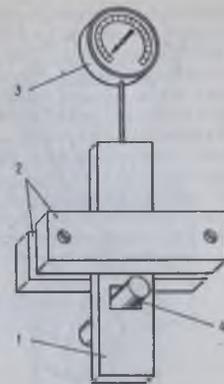


Рис. 5.31. Прибор для испытания на срез колбасных изделий

Рис. 5.32. Ножевое устройство прибора



промышленных условиях показала, что он дает четкие и стабильные результаты для однородных по структуре (без шпика) колбас.

Прибор для определения структурной характеристики, «нежности» мяса, рыбы, овощей и других пищевых продуктов (рис. 5.32) основан на измерении усилия среза образца, имеющего определенные размеры [28]. Прибор снабжен ножом 1 толщиной 1 мм (см. рис. 5.31). В квадратном отверстии ножа помещается цилиндрический образец продукта 4. Нож передвигается в узкой щели между двумя пластинами 2, а усилие среза указывается прибором 3.

Тендерометр (рис. 5.33) — это прибор, в котором сделана попытка имитировать жевание продукта зубами. Образец исследуемого продукта 2 с размерами по сечению 12,7×6,35 мм сжимается между нижним неподвижным клином 1 и верхним опускающимся клином 3. При этом регистрируется постепенное нарастание усилия при внедрении клиньев до момента их встречи.

В США создан так называемый зубной тендерометр, в котором жевательный процесс имитируется пластмассовым рядом зубов, щеками и языком. Верхняя челюсть приводится в движение электродвигателем. Слюна служит смазывающим веществом. Усилие жевания измеряется с помощью тензометрического датчика, а усиленный сигнал поступает в электронный осциллограф. Зубной тендерометр успешно применен для измерения «нежности» и других механических параметров плодов, овощей, мяса, кондитерских изделий [33].

Сектилометр (рис. 5.34) позволяет определять консистенцию твердых и полутвердых материалов. Тонкая проволока 3, натянутая на металлическую раму 2, представляет собой режущее приспособление. Проба 4 стандартного размера помещается на платформу 5 и ее поверхность приводится в соприкосновение с проволокой. При движении платформы вверх с постоянной скоростью (0,07 мм/с) проволока разрезает пробу. Давление на проволоку (противодействующая сила) пе-

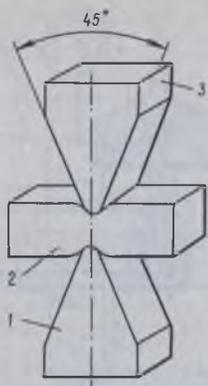


Рис. 5.33. Тендерометр

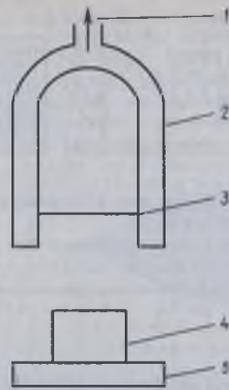


Рис. 5.34. Сектилометр

редается от металлической рамы к уравнивающему рычагу 1, где оно регистрируется.

В другом варианте прибора проба кладется на специальное динамометрическое устройство, которое воспринимает и регистрирует усилие среза [35].

5.7. ПРИБОРЫ ДЛЯ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ, КОНТРОЛЯ СВОЙСТВ И ГОТОВНОСТИ ПРОДУКТА

В некоторых случаях невозможно непосредственно измерить структурно-механические свойства продукта или его вязкость и приходится пользоваться относительными измерениями.

Фаринограф (рис. 5.35, а) используется в заводских лабораториях для исследования свойств теста и определения на этой основе «силы» муки. Принцип работы заключается в измерении сопротивления теста при его механической нагрузке и построении кривой сила — время. Важным критерием этой кривой — фаринограммы (рис. 5.35, б) является точное определение водопоглощительной способности муки при одинаковой консистенции теста. Определенная проба теста загружается в месилку 1, в которой имеются два z-образных вала. Движение месильным лопастям передается от электродвигателя-динамометра 2, ось ротора которого находится в подшипнике 3. Сопротивление, которое испытывают лопасти месилки, измеряется и как реактивный момент передается на корпус двигателя, поворачивая его в противоположное направление. Это сопротивление через систему рычагов 4, колебания которых смягчаются демпфером 7, передается на шкалу 5 и регистрирующий прибор 6.

При первом опыте снимают так называемую кривую титрования. Определенное количество муки перемешивается с водой из бюретки до получения теста с консистенцией 500 фаринографских единиц (ФЕ). Используемая для этой цели вода характеризует водопоглощительную способность муки. С определенными количествами муки и воды делается второй опыт, при котором вода прибавляется сразу при включении прибора. Продолжительность испытания теста зависит от способа расшивки — обычно после достижения кривой максимального значения прибор работает еще 12 мин, затем его выключают. По полученной фаринограмме (см. рис. 5.35, б) определяют следующие величины: показатель водопоглощительной способности — количество воды (в %), добавленное в муку, чтобы получилось тесто, имеющее 500 ФЕ

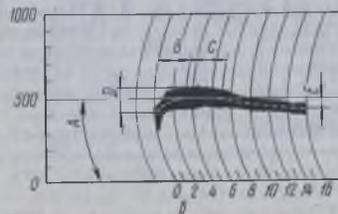
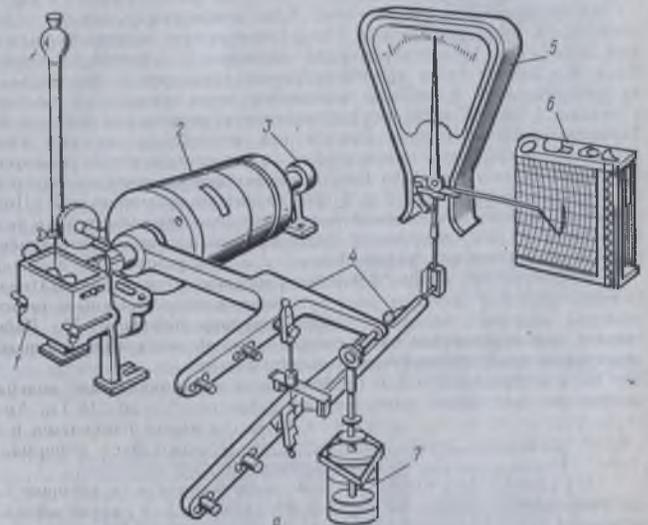


Рис. 5.35. Схема фаринографа (а) и фаринограмма (б)

(т.е. чтобы средняя линия диаграммной ленты находилась на линии 500);

время образования теста (участок *B*) — период времени достижения средней линии диаграммы (величина 500). Эта величина (в мин) отсчитывается по диаграмме на абсциссе ($B = 3,5$ мин);

стабильность (стойкость) теста (участок *C*) — время (в мин), в течение которого тесто сохраняет свою максимальную консистенцию (расстояние между двумя точками пересечения на линии 500);

упругость теста (участок *D*) — определяется по ширине диаграммной ленты в конце образования теста на границе между *B* и *C*. Выражается в единицах фаринографа;

степень разжижения теста (участок *E*) — показывает, на сколько снизилась в конце опыта средняя линия на диаграмме в сравнении с линией 500. Выражается в ФЕ.

Валориграф типа ОА-203 (рис. 5.36) используется для тех же исследований, что и фаринограф. Он состоит из трех частей: *I* — командный блок; *II* — термостатирующая секция; *III* — пишущий аппарат. Вода для замеса теста подготавливается в бюрете 4. Она поступает из резервуара 5, а лишнее количество через сливник 3 поступает в стакан 1. Замес теста осуществляется в месилке 13 (50 г муки). Термостатирование осуществляется при помощи контактного термометра 14, а контроль температуры — термометром 2. На командном блоке находятся кнопки для заполнения и опорожнения бюреты, кнопки 10 и 12 для нагревателей 7 и 9, кнопка пишущего устройства 8, контрольные лампочки 6 и главный выключатель 11. Продолжительность замеса теста 20 мин; полученная валориграмма на пишущем устройстве расшифровывается как фаринограмма.

На валориграфе можно определять влияние улучшителей на реологические свойства теста из муки тритикале и структурно-механические свойства белкового продукта, однако предназначен прибор в первую очередь для определения механических свойств теста. Так как прибор непрерывно измеряет силу, необходимую для замеса материала, он может быть использован и для реологических испытаний различных косметических масс, мазей, паст, фаршей и др.

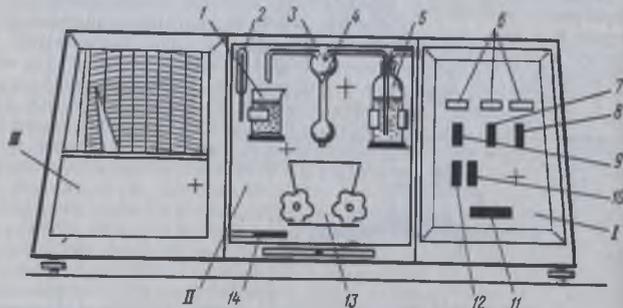


Рис. 5.36. Валориграф ОА-203 (ВНР)

Амилограф Брабендера (рис. 5.37, а) представляет собой прибор для определения физико-химических свойств крахмала и крахмалсодержащих продуктов. Заранее подготовленная суспензия (мучная суспензия приготавливается из 80 г муки влажностью 14 % и 450 г дистиллированной воды и перемешивается в течение 2 мин) наливается в мерный сосуд 7, который приводится в движение синхронным двигателем 13 с постоянной скоростью. В суспензию погружается диск 1 со штифтами (выполняют роль датчика), который посредством вала связан с чувствительной измерительной системой — динамометром 4. При равномерном вращении сосуда 7 диск 1 поворачивается на определенный угол в зависимости от вязкости суспензии. Возникающий крутящий момент регистрируется пишущим прибором 3. Исследование можно вести как при постоянной температуре, так и при температуре, непрерывно и равномерно повышающейся со скоростью 1,5 или 2,5 °С за 1 мин. Обогрев осуществляется нагревателями 8, а автоматическое измерение температуры — контактным термометром 6 с помощью микродвигателя и механизма передачи. При помощи кнопки 5 температуру можно регулировать и вручную. За работой нагревателей следят по контрольной лампочке 9. Включение прибора — через главный выключатель 12. Исследование обычно делается в интервале от 30 до 95 °С за 45 мин. Время задается часами 11 и зуммером 10. Верхняя часть прибора поднимается с помощью рычага 2.

Кривая изменения вязкости и консистенции водокрахмальных суспензий с течением времени, которую записывает прибор, называется амилограммой (рис. 5.37, б). В целом она отражает процесс склеивания крахмала. При этом определяются следующие параметры: вязкость в момент максимального склеивания — как максимальное значение кривой в АЕ (амилографских единицах); температура, при которой получен этот максимум. Кривая показывает, что максимум склеивания — 780 АЕ — достигается при температуре 89 °С за 46 мин. При темпе-

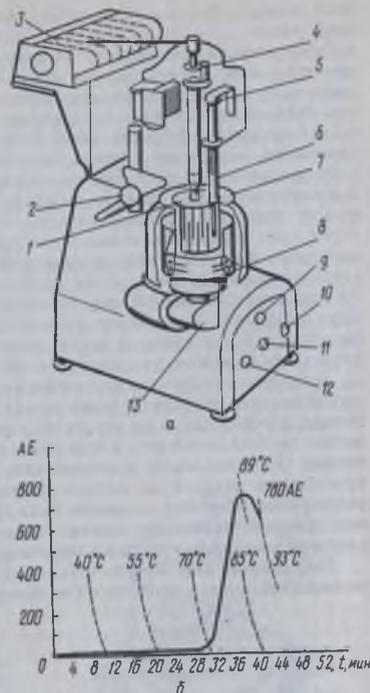


Рис. 5.37. Схема амилографа (а) и амилограмма (б)

ратуре до 70 °С и времени до 30 мин изменения вязкости не наблюдается, затем — от 30 до 46 мин — вязкость резко возрастает и в дальнейшем снова снижается. Исследование заканчивается после достижения этого максимума. Так как 1000 АЕ отвечают 175 Па·с, то в случае работы с более вязкими суспензиями можно специальными грузами увеличить в несколько раз возможности прибора.

Консисометр «Элгеп» (рис. 5.38) предназначен для контроля консистенции молочного сгустка непосредственно в ванне. Принцип его работы состоит в вытягивании индентора через свертываемое молоко. В молочную смесь опускают почти до дна ванны индентор 8, выполненный в виде крестовины с тремя кольцами. Нить 7 перекидывают через блок силоизмерительного устройства. Затем совмещают подвижный указатель 3 с нулевым делением шкалы 5 и с помощью ручки 4 устанавливают прорезь на диске против того деления шкалы, которое соответствует желаемой консистенции сгустка. После включения прибора тумблером 1 начинает работать электродвигатель, соединенный с барабаном 6, на который наматывается нить. При этом индентор начинает подниматься, разрезая сгусток.

В процессе свертывания плотность сгустка нарастает, увеличивается сопротивление движению индентора. При достижении заданной консистенции сгустка (прорезь на диске совместилась с уровнем указателя) автоматически зажигается красная лампочка 2 и включается звуковой сигнал. Как показали исследования, недостатком прибора оказалось прилипание сгустка к индентору, что ухудшает воспроизводимость результатов. Поэтому он может быть больше использован для определения времени готовности сгустка и меньше для научных исследований влияния разных факторов на свертывание молока.

Переносной эластометр (рис. 5.39) предназначен для определения готовности сгустка к резке. Он состоит из измерительного блока 2,

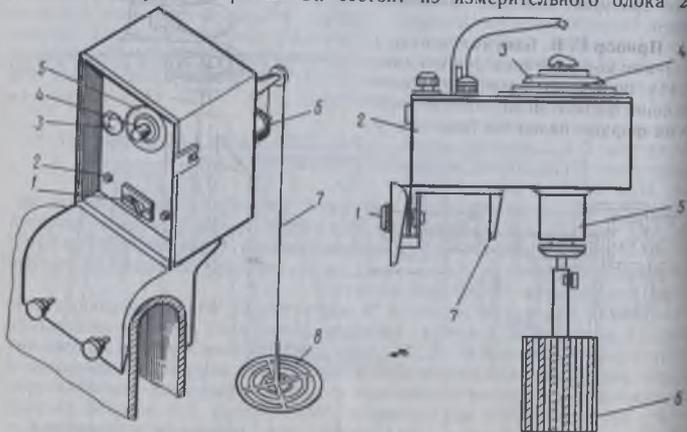


Рис. 5.38. Консисометр «Элгеп»

Рис. 5.39. Переносной эластометр

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

Мембранный прибор (рис. 5.40) для определения готовности молочного сгустка к резке работает на принципе деформации мембран под влиянием повышенного давления [34]. Прибор состоит из двух капсул 3 и 4, на внутренней поверхности которых поставлены гофрированные мембраны. Они погружаются в емкость с молоком так, чтобы были полностью залиты. С помощью насоса 2 задается циклически (2 раза в минуту) повышенное давление в капсуле 3, которое ведет к деформации мембран, и это воздействие передается молоку. Пока молоко жидкое, эта деформация мембран почти не передается на приемную капсулу 4. Приемная капсула связана с приемным устройством, состоящим из камеры давления и трансформаторного датчика 1 с линейной дифференциальной характеристикой. При свертывании молока и увеличении плотности сгустка пульсации мембран приемной капсулы увеличиваются.

Прибор Г. В. Бакунца для определения консистенции фарша (рис. 5.41) позволяет определять важнейшие физико-механические свойства фарша: вязкость, напряжение

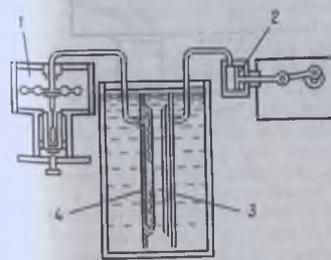


Рис. 5.40. Мембранный прибор

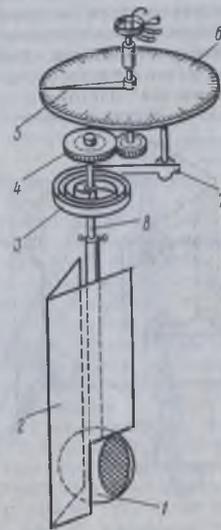


Рис. 5.41. Прибор Г. В. Бакунца для контроля консистенции фарша

сдвига, липкость [3]. Прибор состоит из шара 1, навинченного на вал 8, на противоположном конце которого находится зубчатое колесо 4, сцепленное с шестеренкой, насаженной на ось со стрелкой 5. Поворот шара передается стрелке и фиксируется по шкале 6. При помощи втулки к валу 8 прикреплена спиральная пружина 3, конец которой находится в держателе 7. Перемещая пружину в держателе, можно получить разную степень ее натяжения. К корпусу прибора прикреплен щиток 2 V-образной формы таким образом, что с движущимся фаршем контактирует только часть поверхности шара.

Прибор непрерывно регистрирует изменение физико-механических свойств непосредственно в куттере и определяет готовность фарша. График зависимости крутящего момента от физико-механических свойств во времени позволяет судить об изменении консистенции фарша при механической обработке.

Переносной ротационный прибор «Вискотестер» фирмы «Хааке» используется для технологических определений вязкости. Синхронный электродвигатель с двухступенчатой коробкой передач находится в корпусе 2 (рис. 5.42) и осуществляется движение вала 3 с постоянной скоростью. С помощью переключателя 5 задаются две скорости. Прибор выпускается двух модификаций: VT-181 со скоростями вращения внутреннего цилиндра 45,4 и 181 мин^{-1} и VT-24 со скоростями вращения цилиндра 5,66 и 22,6 мин^{-1} (для высоковязких продуктов). Возникающий при изменении скорости момент сопротивления передается на электродвигатель, который поворачивается на некоторый угол, при этом закручивается пружина и шкала 1 перемещается относительно неподвижного указателя. Нулевое положение восстанавливается винтом 4.

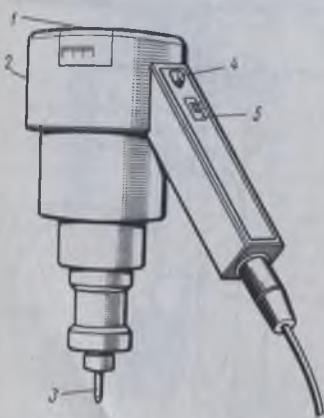


Рис. 5.42. Схема измерительной головки вискозиметра «Вискотестер»

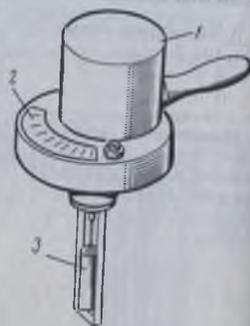


Рис. 5.43. Вискозиметр системы Брукфильда

Синхроэлектрический вискозиметр системы Брукфильда (рис. 5.43) предназначен для автоматического контроля вязкости ньютоновских жидкостей. Приборы этого типа снабжены шпинделями разной формы (диск, игла и т. п.), вращающимися в неограниченной среде. В измерительное устройство 1 входят синхронный двигатель, редуктор и пружина из сплава бериллия с медью. В жидкость погружают вращающийся с постоянной скоростью шпindel 3. С помощью пружины измеряется сопротивление вращению, которое отсчитывается по шкале 2 в делениях от 0 до 100.

Прибор имеет в комплекте роторы и диски разных диаметров, калиброванные в единицах динамической вязкости. Приборы производятся в разных сериях, имеют четыре или восемь скоростей вращения в интервале от 0,3 до 600 мин^{-1} . Ими можно определять вязкость до 640 $\text{кПа} \cdot \text{с}$. Замер вязкости проводится при погружении шпинделя в емкость или сосуды объемом 600 см^3 . Прибор выпускается и с непрерывным цифровым отсчетом и записью вязкости. Замер длится 25 с. Точность — 1 %, воспроизводимость — 0,2 %. Прибор широко используется для определения вязкости клеев, шоколадных и конфетных масс, косметических продуктов и др. Для замера вязкости на большой глубине можно использовать удлинители для шпинделей до 1,8 м.

Для таких продуктов, как зубная паста или косметические кремы, которые имеют очень маленькую текучесть, определение вязкости с цилиндрическим шпинделем дает большую ошибку, поэтому их заменяют специальной системой с T-образным шпинделем. При этом вискозиметр связывается со специальным устройством, штатив которого медленно движется вверх или вниз со скоростью 23 мм/мин . Таким образом рабочий орган непрерывно врезается в материал, образуя в нем спиральный путь.

На этих приборах, хотя и они дают значения вязкости, невозможно точно определить напряжение и скорость сдвига.

5.8. ПРОЦЕССНЫЕ И НЕПРЕРЫВНОДЕЙСТВУЮЩИЕ ПРИБОРЫ

В настоящее время для контроля технологических процессов разработано большое число приборов, работающих на принципе капиллярного и ротационного вискозиметров или на других принципах. Некоторые из них не только позволяют замерять характеристики продукта, но и используются для контроля и регулирования процесса.

Процессные вискозиметры позволяют непрерывно измерять динамическую вязкость жидкостей или эффективную вязкость как функцию времени, а при смешивании многокомпонентных систем регулировать ее. Они используются там, где вязкость внутри процесса представляет собой прямо или косвенно важный параметр качества.

На рис. 5.44 даны два типа процессных вискозиметров: проходной а и погружной б производства фирмы VEB Prüfgerate Werk Medingen (ГДР). Проходной вискозиметр можно вставлять в трубопроводы под давлением для непрерывного измерения и регулирования вязкости жидкости в потоке, а погружной вискозиметр обычно ставится в реакторы и сосуды. Измерительная головка (рис. 5.44, в) одинакова для двух типов. В ней находятся привод (синхронный двигатель 9 и передача) и измерительный механизм (пружина 7 и датчик 8).

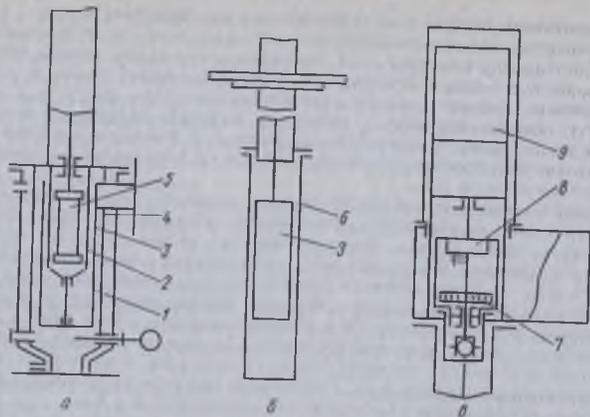


Рис. 5.44. Схемы процессных вискозиметров:
 а — проходной зонд; б — погружной зонд; в — измерительная головка

Принцип действия этих вискозиметров основан на измерении вязкости коаксиальной цилиндрической системой. Сдвиг продукта получается в двойном кольцевом зазоре 1, находящемся между неподвижными цилиндрами 2 и 4. Ротор 3 получает движение от магнитного устройства 5, связанного с синхронным двигателем 9. Это дает возможность получать постоянную угловую скорость. У погружного вискозиметра цилиндрический ротор 3 связан с синхронным двигателем, а защитная труба 6 играет роль неподвижного цилиндра. Необходимый крутящий момент для вращения ротора в измеряемом продукте является мерой вязкости. С помощью пружины 7, которая находится в измерительной головке, момент преобразуется в пропорциональное угловое отклонение. Этот угол поворота измеряется дистанционным датчиком 8, соединенным мостовой схемой. Между вязкостью исследуемого материала и диагональным напряжением моста существует прямо пропорциональная зависимость. Выходной электрический сигнал от преобразователя ($4 \div 20$ мА) служит для определения и регистрации вязкости.

Процессный вискозиметр фирмы Covimat (ФРГ) может работать как погружной и как проходной при использовании специальной приставки. Он представляет собой вискозиметр с дистанционным обслуживанием и управлением. Имеет следующие технические данные: градиент скорости $0,1-200 \text{ мин}^{-1}$; пределы измерения вязкости $1-4,5 \cdot 10 \text{ кПа}\cdot\text{с}$; максимальный крутящий момент $4 \text{ мН}\cdot\text{м}$. Так как значения вязкости или ее изменения отсчитываются сразу, есть возможность при необходимости осуществить регулирование технологического процесса.

Капиллярные вискозиметры предназначены для измерения вязкости порообразных и густых продуктов.

Вискозиметр Елкина (рис. 5.45, а) позволяет измерять вязкость при двух скоростях сдвига одновременно [16]. Пуле насосом 1 прокачивается через прибор в направлении, показанном стрелками. Трубки 2 капиллярированы так, чтобы сопротивление в них пуле было идентичным сопротивлению потока ньютоновской жидкости. Перепад давления (P_2-P_4), показывающий разницу в сопротивлении потока пуле в двух разных зонах сдвига, регистрируется прибором 4. Сигнал предварительно проходит через дифференциальный манометр 3. В условиях постоянного потока перепад давлений пропорционален дифференциалу вязкости и наклон кривой вязкости к оси скорости сдвига.

Другой вид процессного вискозиметра капиллярного типа дан на рис. 5.45, б. От основного потока продукта, движущегося по трубопроводу 1, насосом 2 засасывается определенное количество массы, которая протекает через капилляр 5 и вновь вливается в трубу 1. При этом датчиками 6 замеряется давление на входе и выходе, а датчиками 4 — температура. Полученные результаты обрабатываются микропроцессорной системой. Прибор производится фирмой Gottfert (ФРГ).

Ротационные вискозиметры позволяют регулировать структурно-механические свойства и вязкость материалов. Схема регулирования не отличается принципиально от схемы регулирования других физических параметров — концентрации, температуры, давления. Она строится по принципу обратной связи одного или нескольких датчиков системы с исполнительными механизмами. В качестве датчиков могут быть использованы приборы, способные измерять вязкость, консистенцию, модуль сдвига и др.

Ротационный вискозиметр (рис. 5.46, а) состоит из цилиндра 1, находящегося в камере 2 с вязкой средой. Он подвешен и скреплен с головкой вискозиметра упругой стальной проволокой; приводится во

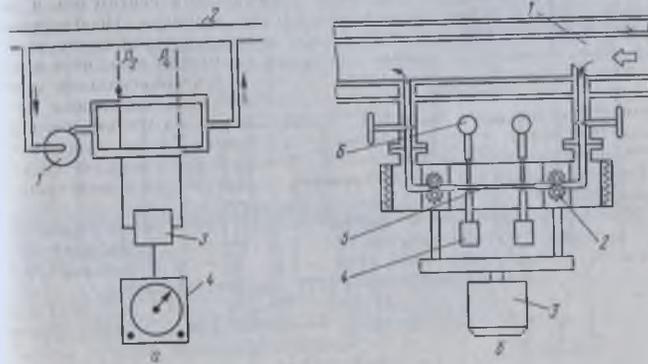


Рис. 5.45. Схемы капиллярных вискозиметров:
 а — Елкина; б — процессный

вращение от синхронного электродвигателя 5 через редуктор, емкостный преобразователь 4 и медно-бериллиевую пружину 3. В зависимости от вязкости продукта пружина закручивается на определенный угол. Преобразователь трансформирует угловое смещение в электрический сигнал (при низкой вязкости). При высокой вязкости используется потенциометрический преобразователь.

Схема автоматического регулирования вязкости дана на рис. 5.46, б. Система состоит из смесителя 9, вискозиметра 3, пишущего и регулирующего прибора 4 с устройством для установки заданной вязкости, датчика уровня 2 и пульта управления 5. Насосами 10 продукт непрерывно перекачивается от смесителя 9 к сборнику 1 и от сборника в приемную камеру 6 вискозиметра. В зависимости от отклонения вязкости от заданной величины срабатывает питатель 7 сыпучего материала или клапан 8 жидкости. При падении уровня продукта ниже заданного система получает сигнал от уровнемера 2 и добавляются ингредиенты без изменения вязкости.

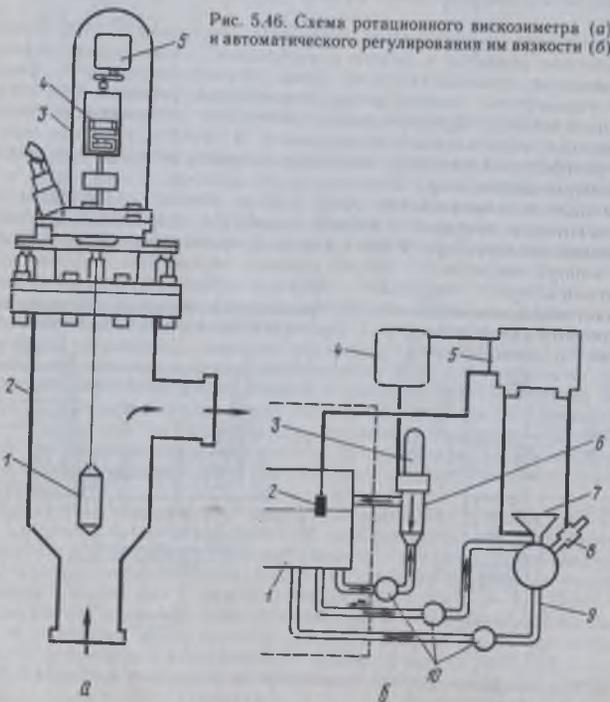


Рис. 5.46. Схема ротационного вискозиметра (а) и автоматического регулирования им вязкости (б)

Устройство для непрерывного измерения вязкости теста, приготовляемого на тестосмесительных машинах [А. с. № 162707 (СССР). — Б. И., 1964, № 10], работает следующим образом. Тесто непрерывным потоком подается в бункер, а затем двухступенчатым шнеком нагнетается в камеру под мембрану датчика давления. Пройдя камеру, тесто выходит через отверстие. Изменение физико-механических свойств теста влияет на давление, воспринимаемое мембраной датчика, по показаниям которого определяют вязкость теста.

Представляют интерес автоматические вискозиметры, выпускаемые и позволяющие испытывать неньютоновские жидкости при различной температуре (от 20 до 97 °С), постоянной и переменной во времени.

Конвиграф (рис. 5.47) — устройство для непрерывного измерения вязкости суспензий и эмульсий, паст, теста, шоколадных масс, выпускаемое фирмой «Брабендер» (ФРГ). Цилиндрическая головка 2 измерителя, смонтированная на изогнутом валу 5, помещается в трубопровод, по которому непрерывно движется материал. Для повышения точности замера вязкости продукта (путем исключения воздействия скоростного напора движущейся массы) головка измерителя заключена в защитный кожух 1 с продольными прорезями. Гибкая рубашка 4 предотвращает попадание массы в корпус прибора и в опоры вала измерителя. Синхронный электродвигатель 9, имеющий две частоты вращения (15 и 12 мин⁻¹), приводит во вращение вал головки измерителя, движению

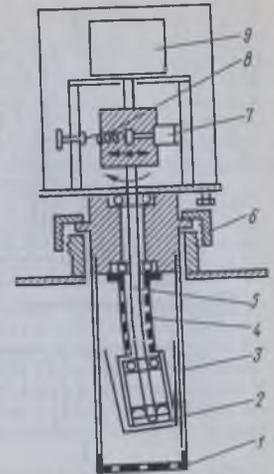


Рис. 5.47. Конвиграф

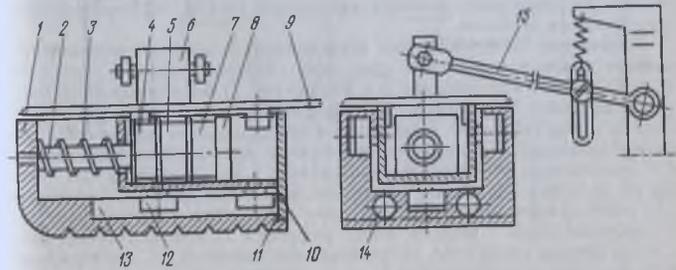


Рис. 5.48. Устройство МТИМПа для исследования реологических свойств материала в потоке

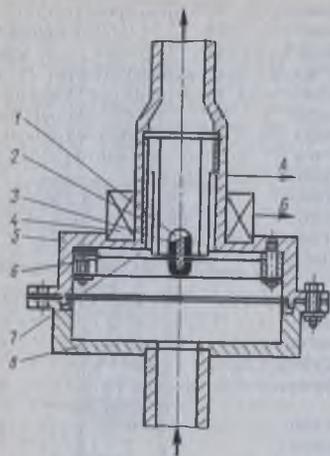
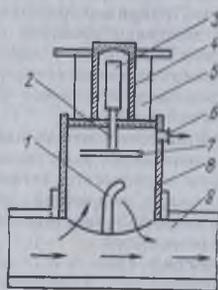


Рис. 5.49. Проточный вискозиметр

Рис. 5.50. Прибор для контроля консистенции теста в потоке



которой препятствуют силы вязкостного трения материала. Когда измеряют вязкость масс малой консистенции, на головке измерителя закрепляется обечайка 3. В результате увеличиваются рабочая поверхность головки и равнодействующая сил вязкостного сопротивления, что повышает точность определения консистенции.

Прибор крепится к материалопроводу накидной гайкой 6. Устанавливая переключатель 8 диапазона измерения момента сопротивления в определенное положение и задавая задатчиком 7 соответствующую частоту вращения головки, можно определять вязкость в широких пределах. Точность измерения составляет $\pm 1\%$ от предельного значения шкалы. Прибор может быть также использован в системах автоматического регулирования вязкости дисперсных систем, транспортируемых по различным каналам.

Устройство МТИММПа для исследования структурно-механических свойств материала в потоке (рис. 5.48) включает корпус, состоящий из двух частей: неподвижной 9 и подвижной 1. На неподвижной части укреплен рама 10 с роликом 12 и проушиной 6, связанной с подпружиненным кронштейном 15. Внутри рамы 10 установлена катушка 8 с первичной обмоткой 5 и вторичными встречно включенными обмотками 4 и 7, подключенными через преобразователь к потенциометру (на чертеже не показан). Встречное включение вторичных обмоток необходимо для компенсации начальной ЭДС при отсутствии внешней нагрузки. Подвижная часть 1 корпуса имеет рифления 11 для контактирования с исследуемым продуктом, нагревательные элементы 14, поддерживающие постоянную температуру в месте контакта, каналы 13, служащие направляющими для роликов 12, сердечник 2 из магнитного материала и возвратную пружину 3.

При определении структурно-механических свойств устройство устанавливается в технологической машине при помощи подпружиненного кронштейна 15 таким образом, чтобы рифления 11 соприкасались с исследуемым материалом (например, колбасным фаршем). После этого включают нагревательные элементы, которые поддерживают температуру рифленной поверхности в пределах $35-36^\circ\text{C}$. Затем подают на первичную обмотку 5 переменное напряжение, что вызывает возникновение ЭДС во вторичных обмотках 4 и 7, фиксируемое контрольными приборами, например автоматическим потенциометром.

При движении продукта относительно устройства он взаимодействует с рифлениями 11 подвижной части корпуса, при этом происходит его перемещение относительно неподвижной части. Сердечник 2, перемещаясь в катушке, меняет ЭДС вторичных обмоток, что фиксируется контрольным прибором.

Низкочастотный проточный вискозиметр (рис. 5.49), разработанный А. Н. Соловьевым и А. Б. Каплуном, содержит сердечник 1 цилиндрической формы с запрессованным в нем магнитом 3. Сердечник укреплен на растяжках 7 на съемном кольце 6. Верхняя часть сердечника входит в высокочастотную катушку индуктивности 2. Возбуждающая катушка 4 расположена снаружи корпуса 5 и соединена с усилителем мощности. Исследуемая жидкость протекает по направлению стрелок через стакан 8 и корпус 5.

Прибор может быть подсоединен к высокочастотному генератору (А) или усилителю мощности (Б).

Прибор для контроля консистенции теста в потоке (рис. 5.50) работает следующим образом [А. с. 669288 (СССР). — Б. И. — 1979, № 23]. Тесто из трубы 9 всасывается вакуум-насосом, подсоединенным к патрубку 6, в трубу 8. Благодаря перегородке 1 тесто постоянно обновляется. На поверхности теста расположен поршень 7, перемещение которого зависит от консистенции материала. Перемещение поршня через шток 2 передается сердечнику 3, расположенному в преобразователе 4, закрытом кожухом 5. Это перемещение преобразуется в сигнал переменного тока, который регистрируется вторичным прибором. Прибор может присоединяться и к резервуарам.

6. ВИБРОРЕОМЕТРЫ

6.1. МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДИСПЕРСНЫХ СИСТЕМ ПРИ ВИБРАЦИОННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

В настоящее время вибрационные методы интенсификации технологических процессов получают все большее распространение. Это обусловлено тем, что при использовании вибрационного воздействия на обрабатываемые материалы повышается производительность оборудования, снижаются удельные энергетические затраты, улучшается качество готовой продукции.

Вибрационное воздействие на обрабатываемые среды легко поддается регулированию путем изменения амплитуды и частоты вибрации, что дает возможность оптимизировать режимы технологических процессов.

Изучение закономерностей деформации и течения структурированных дисперсных систем при воздействии на них вибрационного поля является предметом вибродинамики. Это направление как самостоятельный раздел реологии связано с разработкой методов и экспериментальным определением полной реологической кривой [13].

Метод наложения вибрации на стационарное течение получил в вибродинамике наибольшее распространение. Этот метод основан на определении реологических характеристик дисперсных систем, находящихся одновременно в условиях вибрации и стационарного течения. Его целью является выбор оптимальных параметров вибрации для управления реологическими свойствами дисперсных систем в процессе технологической переработки.

Основу такого метода составляют классические методы реологии, устанавливающие зависимости $\tau = \tau(\dot{\gamma})$ и $\dot{\gamma} = \dot{\gamma}(\tau)$ во всем возможном диапазоне изменений этих характеристик, а воздействие вибрации на систему оценивается по изменению этих реологических зависимостей. В этом случае реологическое поведение систем изучается как результат воздействия вибрации, путем определения реологических констант при непрерывной деформации сдвига по методикам $\dot{\gamma} = \text{const}$ или $\tau = \text{const}$.

Метод, моделирующий исследуемый процесс, основан на определении реологических характеристик исследуемого материала при вибрации в процессах, связанных с изменением объема и деформацией систем (при уплотнении, транспортировании, смещении).

Метод частотных характеристик [14] заключается в том, что колебания служат средством для измерения реологических характеристик. С помощью этого метода определяются динамические константы, характеризующие упругие и вязкие свойства материала, — комплексный модуль $G^*(\omega)$, упругий динамический модуль $G'(\omega)$ и модуль потерь $G''(\omega)$.

Виброреометры — приборы, предназначенные для измерения реологических характеристик материалов в условиях вибрации с заданной частотой и амплитудой. Виброреометр состоит из следующих составных частей: измерительной системы с испытуемым образцом или пробой материала, вибровозбудителя, датчиков измерительной аппаратуры.

По назначению виброреометры можно разделить на следующие группы:

реометры для изучения реологических свойств в условиях объемной вибрации. При этом целью является сравнение реограмм и других зависимостей или характеристик, полученных на тех же приборах, но без вибрации [16];

реометры, в которых реализуется строго определенное деформационное поведение материала. Как правило, это деформация в условиях сложного сдвига с зависящими от времени компонентами тензора напряжений. Целью исследования является определение вязкости и других реологических характеристик в условиях сложного напряженного состояния. При этом достигается моделирование какого-либо реального процесса [11, 15];

реометры для динамических исследований материалов, в которых образец или проба материала подвергается колебательной деформации, в результате чего исследуются переходные характеристики материалов, связанные с их реологическими свойствами [10];

так называемые колебательные реометры, предназначенные для изучения реологических свойств среды путем наблюдения и анализа процессов колебаний контактирующих с ней тел — зондов [5, 8].

По конструктивному признаку виброреометры можно разделить на ротационные, капиллярные, основанные на законе Стокса и др.

По типу вибровозбудителя виброреометры подразделяются на механические (эксцентрикные), инерционные, электродинамические, ультразвуковые.

По диапазону применяемых колебаний виброреометры делятся на низкочастотные (менее 50 Гц) высокочастотные.

По типу определяемых реологических характеристик виброреометры бывают статическими (скорость сдвига, напряжение сдвига, эффективная вязкость), динамическими (комплексные модули упругости и динамическая вязкость) и резонансными (модуль упругости, резонансная частота).

6.2. РОТАЦИОННЫЕ ВИБРОВИСКОЗИМЕТРЫ

Приборы этого типа позволяют создавать в исследуемом объеме системы однородное или близкое к нему поле распределения скорости сдвига.

Среди вибровискозиметров ротационного типа особую группу составляют приборы, которые обеспечивают измерение вязкости в условиях наложения вибрации (периодической деформации сдвига) на стационарное течение. Этот принцип может быть реализован в виде ротационного вискозиметра с коаксиальными цилиндрами, один из которых вращается вокруг собственной оси, вызывая стационарное течение массы, находящейся в зазоре, а другой совершает колебательное движение

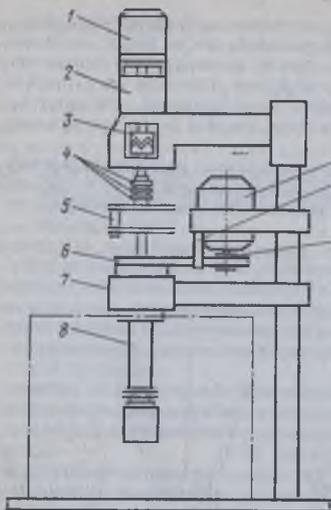


Рис. 6.1. Ротационный вискозиметр с наложением колебаний вдоль стационарного течения

вокруг или вдоль своей оси. В первом случае направления периодического и стационарного течения совпадают, во втором — перпендикулярны друг другу.

Ротационный вискозиметр с наложением колебаний на стационарное течение (рис. 6.1) был использован для исследования влияния вибрации на полимеры [3]. Электропривод вискозиметра состоит из синхронного двигателя 1 и многоступенчатой коробки скоростей 2. Зубчатая муфта 3 дает возможность быстро задавать постоянную скорость вращения или останавливать внутренний цилиндр. На валу, выходящем из муфты, расположены кольца 4, с которыми контактируют токосъемники. Кольца соединены с тензометрическим датчиком 5, который регистрирует крутящий момент на внутреннем цилиндре рабочего узла. Наружному цилиндру могут быть заданы колебания с помощью эксцентрика 9 и коромысла 6. Эксцентрик работает от электродвигателя 11. Коромысло 6 связано с тензометрическим датчиком 10. Рабочий

узел 8, состоящий из двух коаксиальных цилиндров, крепится в подшипнике кронштейна 7 и погружается в термостат.

В конструкции прибора реализуются синусоидальные колебания наружного цилиндра рабочего узла с частотой от 6 до 110 Гц. Амплитуда угловых смещений наружного цилиндра может изменяться в пределах от $1,7 \cdot 10^{-3}$ до $24,5 \cdot 10^{-3}$ рад, что соответствует деформациям сдвига от 0,5 до 80 %.

Предложена [1] конструкция вискозиметра, в котором внутренний цилиндр вращается вокруг собственной оси, а наружный жестко соединен с электромагнитным вибратором, сообщаям цилиндру осевые колебания с заданной частотой и амплитудой. Тем самым обеспечивается ортогональное наложение колебаний на стационарное течение материала, создаваемое непрерывным вращением внутреннего цилиндра.

В Институте физической химии АН СССР разработан ряд ротационных вискозиметров [15], предназначенных для исследования реологических свойств различных дисперсных систем (табл. 6.1)

Ротационный вискозиметр с коаксиальными цилиндрами (рис. 6.2) предназначен для исследования кинетики процесса разрушения при вибрации и восстановления в потоке при сдвиговой деформации двухфазных коагуляционных структур. Блок-схема прибора состоит из выпрямителя 1, электродвигателя постоянного тока 2, семиступенчатой

6.1. Вибровискозиметры ИФХ АН СССР

Технические данные	Для двухфазных систем	Для вязкопластичных систем	Для высокопрочных структур	На базе прибора «Реотест»
Метод измерения крутящего момента	Электронно-сельсинный	Электротензометрический с жестким динамометром		Электрический с измерителем торсионного типа с омическими датчиками
Пределы измерений вязкости, Па·с	$5 \cdot 10^{-3} - 1,5 \cdot 10^5$	$10^{-3} - 10^6$	$10 - 10^9$	$0,1 - 10^4$
напряжения сдвига, Па	$10 - 1,5 \cdot 10^3$	Менее $1,5 \times 10^3$	$10 - 10^6$	$1,6 - 3 \cdot 10^3$
скорости сдвига, с ⁻¹	0,015—1500	$10^{-7} - 400$	$3 \cdot 10^{-3} - 10^3$	$0,2 - 1,3 \cdot 10^3$
Параметры вибровозбудителя				
тип	Эксцентриковый вибростенд	Электродинамический вибростенд ВЭДС-80	Гидравлический вибростенд	Электродинамический вибростенд ВЭДС-10а
частота, Гц	20—200	20—80	25—150	4—40000
амплитуда, мм	0—2	0—4	0,01—1	—
максимальное виброускорение	20g	—	40g	100g

коробки передач 3, электромагнитной муфты 4, сельсина-датчика 5, измерительного сельсина 6, шлейфового осциллографа 7, измерительного сельсина-трансформатора 8, силового сельсина-приемника 9, наружного цилиндра 10, внутреннего цилиндра 11, рабочего столика 12, эксцентрикового вибростенда 13, пятиступенчатой коробки передач 14, электропривода вибростенда 15.

Измерения проводятся при гармонической вибрации с ускорениями до 20 g и при ударном режиме до 500 g. Метод измерения напряжения сдвига основан на измерении угла рассогласования между двумя парами сельсинов. Расчет реологических характеристик производится в соответствии с общей теорией ротационных вискозиметров с коаксиальными цилиндрами.

Вискозиметр работает по методике $\tau - \dot{\gamma}$ при $\dot{\gamma} = \text{const}$. Изменение амплитуды колебаний, а также переход от гармонического к ударному режиму вибрации достигается путем установки сменных эксцентриков, профиль которых определяет закон движения толкателя с рабочим столиком и закрепленным на нем блоком коаксиальных цилиндров. Определение параметров вибрации осуществляется с помощью измерительного микроскопа (амплитуда), блока измерения частоты и ускорения вибрации, снабженного пьезоэлектрическим датчиком, закрепленным на вибрируемой поверхности, анализатора частотных характеристик для гармонического анализа поличастотной вибрации.

Измерительная система позволяет фиксировать кинетику спада напряжения сдвига в момент включения вибрации до достижения равновесного состояния при одновременной деформации сдвига по методи-

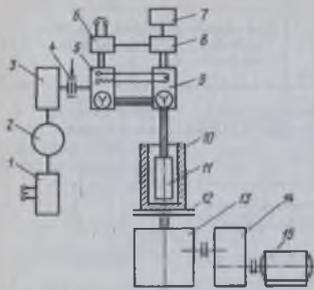


Рис. 6.2. Ротационный вискозиметр с коаксиальными цилиндрами

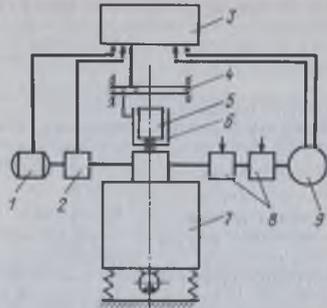


Рис. 6.3. Ротационный вискозиметр с коаксиально расположенными стаканом и цилиндром

ке $\dot{\gamma} = \text{const}$, а также кинетику восстановления структуры. Возможна регистрация изменений реологических свойств системы за период между двумя последовательными ударами (при виброударном режиме).

Ротационный вискозиметр с коаксиально расположенными стаканом и цилиндром (рис. 6.3) предназначен для изучения реологических свойств вязкопластичных систем. Блок-схема прибора включает управляющий электродвигатель привода внутреннего цилиндра 1, редуктор 2, блок 3 регистрации частоты вращения двигателей привода внутреннего цилиндра, жесткий электротензодинамометр 4, внутренний рабочий цилиндр 5, наружный измерительный цилиндр 6, вибростенд 7, четырехступенчатые коробки передач 8, электропривод 9. Блок измерения вязкости представляет собой коаксиально расположенные стакан и цилиндр с рифлениями и тензометрическую регистрирующую систему, состоящую из тензобалки с датчиками, жестко закрепленную на валу. При вращении измерительного стакана с заданной угловой скоростью, определяющей скорость деформации исследуемой системы, измерительный цилиндр поворачивается на некоторый угол и изгибает тензобалку. Величина изгиба тензобалки пропорциональна напряжению сдвига исследуемой системы.

Угловая скорость измерительного стакана может изменяться на восемь десятичных порядков.

Для регистрации вязкости исследуемой системы используются универсальная тензометрическая станция УТЧ-1 и шлейфовый осциллограф Н-107. Также может быть использован двухкоординатный самописец ПДС-021м или «endim». Для регистрации формы вибрационных воздействий используется пьезоэлектрический измеритель ПИУ-1М.

Данный вискозиметр позволяет исследовать реологические характеристики дисперсных систем по методике $\tau - \dot{\gamma}$ при $\dot{\gamma} = \text{const}$ в широком интервале изменения скоростей деформаций и напряжений сдвига как в условиях воздействия вибрационного поля, так и без

него. С помощью жесткого электротензодинамометра этот вискозиметр позволяет исследовать процесс разрушения структуры при вибрации, вибрационную тиксотропию в пределах одного периода колебаний системы, а также закономерности тиксотропного восстановления после прекращения воздействия вибрационного поля.

Ротационный вискозиметр для изучения поведения высокопрочных и высоковязких коагуляционных структур (рис. 6.4) позволяет проводить исследования в условиях совместного действия вибрации и сдвиговой деформации. Блок-схема прибора включает гидравлический вибростенд 1, наружный измерительный цилиндр 2, внутренний измерительный цилиндр 3, блок коаксиальных цилиндров, червячное колесо 4, блок регистрации частоты вращения электродвигателя 5, изгибающего момента на жестком электротензодинамометре и параметров вибрации, жесткий электротензодинамометр (тензометрическая балка) 6, червяк 7, карданный вал 8, декадный редуктор 9, соединительную муфту 10, электродвигатель 11. Конструктивная особенность прибора состоит в том, что наружный рабочий цилиндр выполнен в виде отливки из пластинчатых элементов, радиально сходящихся от периферии к внутренней рабочей поверхности и зафиксированных с небольшим зазором относительно друг друга. Этот цилиндр устанавливается в цилиндрической емкости, заполненной исследуемой дисперсной системой. При вибрации дисперсная система через продольные щели между пластинами заполняет кольцевой рабочий зазор между наружным и внутренним цилиндрами. Таким образом, блок измерительных цилиндров как бы «плавает» в исследуемой системе. Если вязкость пастообразной дисперсной системы настолько велика, что рабочий зазор между коаксиальными цилиндрами не может заполняться даже при вибрации, то заполнение производится путем воздействия на систему наряду с вибрацией избыточного давления.

При изменении вязкости крутящий момент от двигателя через редуктор передается посредством кардана и червячной пары к внутреннему цилиндру. Величина этого момента зависит от сопротивления вращению цилиндра и фиксируется по величине усилия, передаваемого от шестерни к червяку, который деформирует жесткую тензобалку — динамометр.

Ротационный вискозиметр, выполненный на основе вискозиметра «Реотест», предназначен для определения интегральных реологических характеристик сыпучих и вязкопластичных структурированных систем, находящихся под комплексным воздействием поля гармонических механических колебаний и напряжений, возникающих в за-

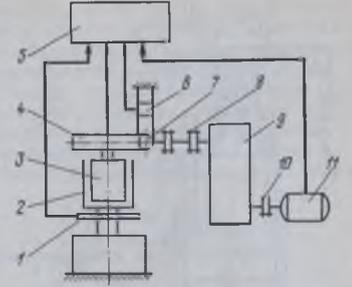


Рис. 6.4. Ротационный вискозиметр для исследования высокопрочных и высоковязких коагуляционных структур

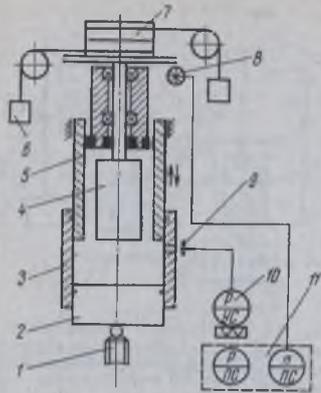


Рис. 6.5. Измерительный блок вибровискозиметра для высоковязких пищевых масс

плитуда задаются жестко, определенными величинами. Предусмотрена возможность изменения направления колебательных деформаций относительно направления стационарного течения массы. Измерительные поверхности снабжены рубашками для обогрева, связанными с термостатом.

Измерительный блок вибровискозиметра для высоковязких пищевых масс включает (рис. 6.5) внутренний 4 и наружный 5 соосные цилиндры, неподвижную камеру 3 с поршнем 2. Внутренний цилиндр (ротор) 4 приводится во вращение парой свободно падающих грузов 6 посредством нитей, закрепленных на шкиве 7, установленном на валу ротора. Во избежание проскальзывания массы по измерительным поверхностям ротор и наружный цилиндр имеют рифления глубиной 1 мм. Поршень 2 перемещается по камере 3 с помощью винтового механизма 1.

Измерительная аппаратура вибровискозиметра содержит датчик 8 угловой скорости ротора фотоэлектрического типа. Для этой цели служит перфорированный диск, закрепленный на валу ротора. Сигнал этого датчика выведен на самопишущий вторичный прибор 11. Давление в полости камеры 3 регистрируется тензометрическим датчиком давления 9, сигнал которого поступает в усилитель 10 и непрерывно фиксируется на ленте самописца 11.

В конструкции вибровискозиметра применен механический вибровозбудитель эксцентрикового типа, связанный с наружным цилиндром 5 посредством сменных рычагов, один из которых обеспечивает колебательное движение цилиндра вдоль оси, а второй — вокруг оси.

Привод возбудителя обеспечивает 45 фиксированных частот вращения вала эксцентрика в пределах от 62 до 1900 мин⁻¹. Эксцентрик выполнен в виде двух составных частей с равными эксцентриситета-

ми с возможностью углового смещения одной части относительно другой. Такая конструкция позволяет обеспечить плавное изменение суммарного эксцентриситета практически от 0 до 5 мм. Наружная поверхность эксцентрика выполнена сферической, что позволяет применять сменные рычаги в любой плоскости относительно эксцентрика. Таким образом, имеется возможность без изменения положения вибратора изменять направление колебаний наружного цилиндра вибровискозиметра путем простой смены промежуточных рычагов. Контроль суммарного эксцентриситета осуществляется индикатором часового типа с точностью 0,01 мм.

Отличие вибровискозиметра от базового прибора «Реотест» заключается в том, что наружный цилиндр жестко закреплен на площадке вибростенда ВЭДС-10А, создающего вертикально направленную вибрацию. Расчет реологических параметров производится по формулам, приведенным в инструкции по эксплуатации прибора «Реотест».

Ви́бровискозиметр для исследования высоковязких масс разработан в МТИППе. Он обеспечивает измерение реологических характеристик кондитерных и других пищевых масс в широком диапазоне температур как при вибрации, так и без нее, а также в условиях всестороннего сжатия и при атмосферном давлении. Частота и ам-

плитуда задаются жестко, определенными величинами. Предусмотрена возможность изменения направления колебательных деформаций относительно направления стационарного течения массы. Измерительные поверхности снабжены рубашками для обогрева, связанными с термостатом.

Техническая характеристика вибровискозиметра для высоковязких пищевых масс [11]

Длина ротора, мм	80
Диаметр ротора, мм	20; 22; 24; 26
Диаметр цилиндра, мм	30
Пределы измерений скорости сдвига, с ⁻¹	0,1—120
напряжения сдвига, Па	400—2,5·10 ⁵
эффективной вязкости, Па·с	50—10 ⁶
Параметры колебаний цилиндра частота, Гц	1—32
амплитуда, мм	0,1—2

Обработка результатов измерений заключается в определении по диаграмме, полученной на самописце, угловой скорости вращения ротора и по суммарной массе грузов — момента на роторе. Величины момента и угловой скорости являются исходными для расчета напряжения сдвига и скорости сдвига в зазоре вибровискозиметра.

Реологическое поведение многих пищевых масс, находящихся в вязкопластичном состоянии, в большой степени зависит от соотношения стационарных и динамических напряжений сдвига. При вибровискозиметрии стационарное напряжение создается вращающим моментом на роторе вискозиметра, а динамическое определяется вибрационным движением наружного цилиндра.

Например, при стационарном напряжении меньше предельного напряжения сдвига течение в рабочем зазоре вискозиметра отсутствует. Однако в тех же условиях, но при наложении вибрации ротор вискозиметра начинает вращаться с определенной угловой скоростью, в результате чего может быть рассчитана эффективная вязкость, которая в данном случае будет зависеть только от параметров вибрации.

Таким образом, при проведении вибровискозиметрических исследований используют два деформационных режима. Первый режим, или режим нагружения, характерен тем, что напряжение сдвига выбирается меньшим предельного напряжения сдвига и сохраняется постоянным в течение всего цикла измерений. При этом определяются значения эффективной вязкости при изменяющихся параметрах вибрации. Второй режим нагружения заключается в получении кривой течения исследуемого материала при фиксированных значениях параметров колебаний.

6.6. Значения эмпирических коэффициентов обобщенной зависимости эффективной вязкости конфетных масс от скорости сдвига и параметров вибрации

Конфетная масса	a_1	a_2	a_3	a_4
При скорости сдвига менее 5 с^{-1}				
Морозко	1100	-1,05	-1,02	-0,24
Дуэт	30400	-0,52	-0,85	-0,39
Аквапель	10000	-0,47	-0,57	-0,49
Сонет	7300	-0,79	-0,89	-0,30
При скорости сдвига выше 5 с^{-1}				
Морозко	5500	-0,72	-0,92	-0,35
Дуэт	23000	-0,36	-0,36	-0,51
Аквапель	9200	-0,43	-0,75	-0,51
Сонет	6130	-0,63	-0,88	-0,50

уравнение Оствальда (табл. 6.7). Анализ кривых течения позволил заключить, что вибрационное воздействие вызывает значительные изменения в реологических свойствах макаронного теста. При этом коэффициент K уменьшается, а индекс течения n увеличивается.

Одним из недостатков описанного вибровискозиметра является относительно большое сопротивление вращению внутреннего цилиндра в режиме холостого хода. Это препятствует исследованию маловязких кондитерских масс. Например, предельное напряжение сдвига для шоколадной массы составляет 20 Па; для преодоления этого напряжения к ротору вискозиметра необходимо приложить момент $1,45 \cdot 10^{-3}$ Н·м, что значительно меньше момента трения в подшипниках вибровискозиметра (около $6 \cdot 10^{-3}$ Н·м). В связи с этим возникла необходимость создать вибровискозиметр специально для маловязких кондитерских масс.

В конструкции вибровискозиметра для маловязких масс была использована измерительная система ротационного вискозиметра РВ-8, широко применяемого в реологической практике, поэтому расчетные формулы для определения скорости сдвига, напряжения сдвига и вязкости были взяты из стандартной методики.

6.7. Зависимость констант степенной модели от влажности макаронного теста и режима течения

Влажность теста, %	Режим течения			
	без вибрации		с вибрацией	
	$K \cdot 10^3$	n	$K \cdot 10^3$	n
30	104,5	0,13	51,6	0,16
31	76,0	0,09	49,8	0,17
32	73,4	0,13	46,1	0,18
33	57,5	0,12	45,7	0,23

Размеры измерительных поверхностей полностью соответствовали прибору РВ-8. Отличие конструкции состояло лишь в том, что наружный цилиндр был снабжен водяной рубашкой и установлен на виброплощадке, которая кинематически связана с эксцентриковым вибровозбудителем.

Частота колебаний наружного цилиндра изменялась в пределах от 1 до 32 Гц, амплитуда — от 0 до 4 мм. Пределы измерения эффективной вязкости — от $0,5$ до 10^5 Па·с, напряжения сдвига — от 5 до 10^4 Па.

В технологических процессах пищевых производств, связанных с механической обработкой материалов (при смешивании, транспортировании по трубам, формовании, резании и т. п.), давление на пищевые массы со стороны рабочих органов машин не остается постоянным, а изменяется, как правило, по циклическому закону.

Основные расчетные зависимости были получены в основном при анализе стационарного течения массы и не учитывают пульсирующего воздействия, оказывающего существенное влияние на свойства перерабатываемой массы. Очевидно, такой подход к расчетам позволяет получить результаты лишь в первом приближении, поэтому возникла необходимость изучения свойств в условиях, максимально приближенных к реальному процессу.

Виброреометр, разработанный в МТИППе

(рис. 6.9), имеет устройство, выполненное в виде механизма со сменным пазовым кулачком 4; при его вращении, контролируемом датчиком угловой скорости 5, поршень 3 совершает возвратно-поступательное движение, контролируемое датчиком 6, в результате которого давление в массе, находящейся в цилиндре 2, изменяется по закону, заданному профилем кулачка. Прибор оснащен тензометрическими датчиками давления 7, тензоусилителем ТА-5 8, самописцем 9, датчиком 10 угловой скорости ротора, тензометрическим датчиком 12 крутящего момента на роторе. Ротор 1 приводится в движение электроприводом 11.

Таким образом, реологические характеристики исследуемого материала определяются в условиях непрерывно изменяющегося избыточного давления.

Измерения, выполненные на реометре при изучении свойств пряничного теста, показали, что вращающий момент на роторе зависит от давления в рабочем зазоре реометра, причем характер

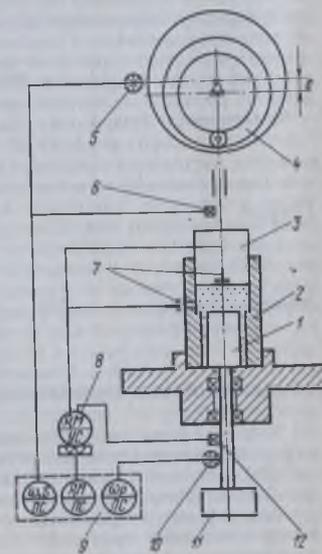


Рис. 6.9. Реометр для изучения структурно-механических свойств пищевых материалов при переменном давлении

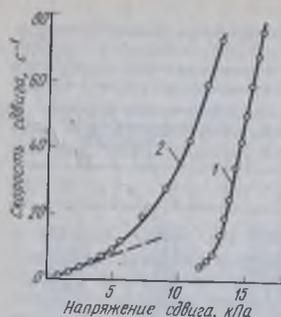


Рис. 6.6. Кривые течения массы батончиков Походные: 1 — без вибрации; 2 — с вибрацией

Для помадной конфетной массы (молочная помада) при температуре 40 °С и изменении скорости сдвига от 0,5 до 3 с⁻¹ эффективная вязкость увеличивается от 720 до 960 Па·с, а затем начинает уменьшаться, т. е. на определенном участке кривой течения для помадной массы характерны дилатантные свойства (рис. 6.7).

Это явление объясняется тем, что при вибрации резко увеличивается подвижность частиц твердой фазы в дисперсионной среде и сокращается число контактов между отдельными частицами, благодаря чему сопротивление сдвигу по сравнению со стационарным течением значительно уменьшается. При увеличении скорости сдвига число контактов увеличивается, а сопротивление сдвигу и, следовательно, вязкость, повышаются. Затем рост числа контактов замедляется

и начинается процесс разрушения связей между отдельными частицами. Этому моменту соответствует максимум эффективной вязкости. Естественно, что скорость сдвига, при которой вязкость принимает максимальное значение, зависит от параметров колебаний, т. е. от степени подвижности частиц. Так, при частоте 10,6 Гц скорость сдвига равна 0,7 с⁻¹, а при частоте 25,5 Гц — 2,6 с⁻¹. Эффективная вязкость при этом соответственно равна 1690 и 970 Па·с.

Специальные исследования на вивровискозиметре для маловязких масс в области малых скоростей сдвига (до 5 с⁻¹) показали, что для ряда пралиновых масс, содержащих какао-масло (Кара-Кум, Чародейка), характерны дилатантные свойства и отсутствие предела текучести. Помадные конфетные массы при температуре 60 °С и выше проявляют свойства ньютоновской жидкости.

Иногда кривую течения при вибрации невозможно без ущерба для точности описать степенным уравнением с постоянными коэффициентами. В этом случае кривую разбивают на участки с собственными значениями эмпирических коэффициентов. Например, кривые течения помадных масс, приготовленных на базе мелкодисперсных компонентов так называемым «холодным» методом, были описаны степенными уравнениями отдельно на начальном и конечном участках (рис. 6.8). При увеличении динамической скорости сдвига ($\gamma_d = 2\pi f\gamma_0$) различия между коэффициентами начального и конечного участков кривой течения сглаживаются (табл. 6.5).

Анализ полученных результатов позволил получить обобщенную зависимость эффективной вязкости конфетной массы от скорости сдвига и параметров вибрации в виде степенного уравнения:

$$\eta_{эф} = a_1 f^{a_2} A^{a_3} \dot{\gamma}^{a_4}, \quad (6.2)$$

где f — частота колебаний, Гц; A — амплитуда, мм; $\dot{\gamma}$ — скорость сдвига, с⁻¹; a_1, a_2, a_3 и a_4 — эмпирические коэффициенты (табл. 6.6).

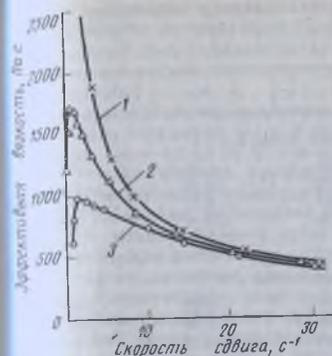


Рис. 6.7. Зависимость эффективной вязкости от скорости сдвига помадной конфетной массы: 1 — без вибрации; 2 — с вибрацией частотой 10,6 Гц ($\gamma_0 = 0,13$); 3 — с вибрацией частотой 25,5 Гц ($\gamma_0 = 0,13$)

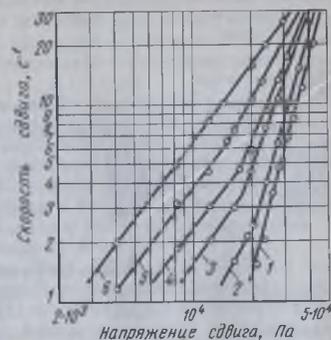


Рис. 6.8. Кривые течения помадных конфетных масс на основе мелкодисперсных компонентов (в логарифмических координатах) при различных значениях динамической скорости сдвига γ_d (в с⁻¹): 1 — без вибрации; 2 — 41; 3 — 44; 4 — 63; 5 — 82; 6 — 122

Поведение макаронного теста при вибрационном воздействии было изучено в интервале изменения влажности от 30 до 33 % при температуре 24 °С. Колебания наружного цилиндра вивровискозиметра накладывали ортогонально стационарному течению теста со следующими фиксированными значениями: $f = 25,5$ Гц, $\gamma_0 = 0,22$. Наиболее хорошее соответствие с экспериментальными данными обеспечивает степенное

6.5. Значения коэффициентов степенной модели для различных участков кривой течения конфетной массы Дуэт

Частота, Гц	Амплитуда, мм	Динамическая скорость сдвига, с ⁻¹	K · 10 ³ , Па		n	
			начальный участок	конечный участок	начальный участок	конечный участок
0	0	—	18,5	18,5	0,28	0,28
17,5	0,6	22	12,3	16,0	0,61	0,29
25,0	0,6	31	11,0	15,0	0,66	0,30
32,5	0,6	41	10,2	13,5	0,60	0,33
17,5	1,2	44	7,4	11,5	0,70	0,37
25,0	1,2	63	5,0	9,2	0,82	0,42
17,5	1,8	66	4,8	7,0	0,70	0,48
32,5	1,2	82	3,7	5,4	0,78	0,55
25,0	1,8	34	2,5	3,9	0,86	0,64
32,5	1,8	122	2,4	2,4	0,77	0,77

изменения момента совпадает с законом изменения давления. Например, при периодическом изменении давления от атмосферного до 2 МПа момент на роторе также периодически увеличивается практически без запаздывания на 30—40 % от номинального значения при атмосферном давлении. Так как скорость сдвига в момент измерений постоянна, что обеспечивается приводом реометра, можно заключить, что напряжение сдвига и эффективная вязкость не остаются постоянными, а периодически изменяются во времени.

На экспериментальной установке, состоящей из вибростенда и дискового вискозиметра, проведены исследования реологических свойств высоковязких карамельных начинок [6]. Свойства начинок определяли до виброобработки, во время вибрационного воздействия, а также после двухминутной виброобработки и последующей трехминутной выдержки в покое. Исследования показали, что снижение вязкости начинок во время виброобработки и тиксотропное восстановление структуры после прекращения вибрации можно использовать для механизации до их дозирования и транспортирования при формировании карамели. В зависимости от условий виброобработки реологическое поведение высоковязких начинок может описываться моделями псевдопластичных ньютоновских или дилатантных жидкостей (табл. 6.8).

6.8. Зависимость эмпирических коэффициентов реологической модели Оствальда от режима течения

Наименование начинки	Без вибрации		Частота вибрации, Гц	Во время вибрации			
	K	n		A = 0,2 мм		A = 0,8 мм	
				K	n	K	n
Пралине	90	0,7	30	600	0,42	400	0,44
			35	540	0,44	310	0,54
			40	480	0,49	220	0,67
			45	400	0,57	150	0,80
			50	310	0,66	110	1,04
Масляно-сахарная	350	0,47	30	244	0,68	175	0,71
			35	220	0,69	60	1,00
			50	85	0,80	40	1,28

6.3. КАПИЛЛЯРНЫЕ ВИБРОВИСКОЗИМЕТРЫ

К этой группе относятся приборы, основанные на истечении исследуемого материала через трубчатые, плоские или кольцевые капилляры при вибрации. При этом вибрация может быть сообщена измерительной системе в целом или одному капилляру. Кроме того, к разряду капиллярных вибровискозиметров относятся также конструкции, в которых истечение происходит под действием циклически изменяющегося перепада давления.

Вибровискозиметр с плоским щелевым капилляром (рис. 6.10) предназначен для изучения влияния вибрации на высоковязкие дисперсные системы [15]. Установка включает баллон 1 со сжатым азо-

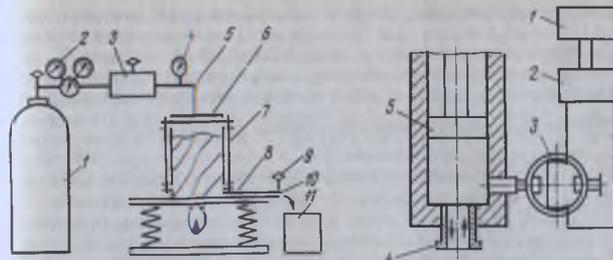


Рис. 6.10. Вибровискозиметр с плоским щелевым капилляром

Рис. 6.11. Реометр с вибрирующим щелевым капилляром

том, редуктор 2 с манометрами, редуктор 3 для точного регулирования давления в системе образцовый прецизионный манометр 4, высоконапорный шланг 5, камеру 7 для термостатирования вибровискозиметра с крышкой 6, вибрационную площадку 8, плоский щелевой капилляр 10, затвор капилляра 9 приемный сосуд 11 для дисперсной системы, вытекающей из капилляра. Капилляр установлен таким образом, чтобы направление колебаний вибровозбудителя было перпендикулярно плоскости сдвига (направлению истечения). Это обеспечивает одинаковые условия для передачи виброимпульса всему объему движущейся системы.

Пределы измерения прибора были следующие: вязкости 10^{-2} — 10^5 Па·с; напряжения сдвига 10^2 — 10^6 Па; скорости сдвига 10^{-1} — 10^3 с $^{-1}$.

Для получения дивой течения при заданных параметрах вибрации определяли объемный расход в единицу времени при постоянном значении избыточного давления, которое изменялось от опыта к опыту.

Путем регулирования зазора между рабочими поверхностями плоского капилляра определяли область инвариантных значений реологических характеристик исследуемого материала в условиях вибрации.

Изменяя параметры вибрации (амплитуду и частоту), можно получить спектр виброграмм, по которому строят зависимость эффективной вибровязкости $\eta = \tau/\dot{\gamma}$ от частоты ω (при заданной амплитуде A), амплитуды (при заданной частоте) или от их сочетания, т. е. от виброускорения $A\omega^2$ или интенсивности вибрации $I = A^2\omega^3$.

Вискозиметр с вибрирующим капилляром (рис. 6.11) предназначен для исследования высоковязких материалов, например резиновых смесей, в условиях овмещения стационарного потока и вибрации [9]. В основу конструкции положен капиллярный вискозиметр постоянного расхода. Капилляр 4 совершает вслед за плунжером 5 возвратнопоступательное движение в направлении течения с определенной частотой ω и амплитудой A . На протяжении всех экспериментов фиксировали давление перед вводом в капилляр с помощью тензометрического датчика (на рисунке — тензометрическое кольцо 3 с датчиками), усилителя «Топаз» 1 и осциллографа Н117 1. Реологические характеристики определяла полагая, что исследуемый материал подчиняется степенному закону.

Капиллярный вибровискозиметр для высоковязких пищевых масс (рис. 6.12) предназначен для всестороннего исследования реологических свойств макаронного теста, выбора оптимальных параметров вибрации и отработки конструкции вибровозбудителя для применения его в производстве макаронных изделий на этапе формования теста [12].

Техническая характеристика капиллярного вибровискозиметра

Давление в камере прессования, Па	0—200 · 10 ⁵
Пределы измерения скорости выпрессовывания, м/с	0,5 · 10 ⁻³ —10 ⁻¹
Размеры капилляров, мм	
длина	50—160
диаметр	3—10
Параметры колебаний	
амплитуда, мм	0,05—10
частота, Гц	0,5—60
Объем загружаемой массы, см ³	1200

Капиллярный вибровискозиметр содержит термостатируемую камеру 23 с капиллярами 25, термостат 21, силовой гидроцилиндр 20 с поршнем 22, гидросистему, состоящую из двигателя переменного тока с редуктором 15, соединенного муфтой с насосом 16, предохранительного клапана 13, шлангов высокого давления 19, манометра 17, вентиля 14

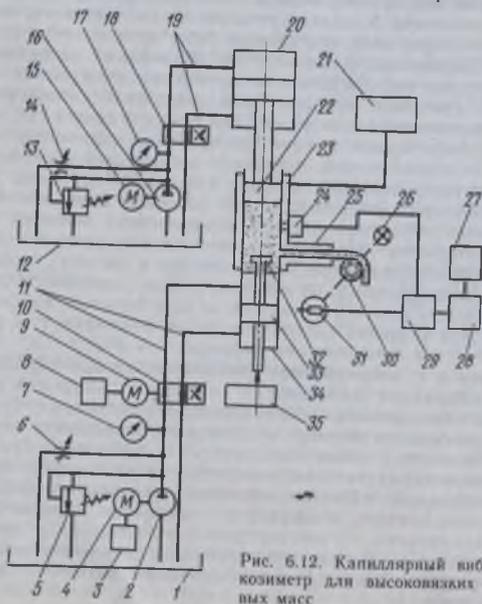


Рис. 6.12. Капиллярный вибровискозиметр для высоковязких пищевых масс

и золотника 18 для переключения направления движения поршня 22 на противоположное.

Гидравлический вибровозбудитель содержит рабочий гидроцилиндр 34 с поршнем 33, на верхнем штоке которого расположена насадка 32, золотниковый распределитель 10, вращающийся от двигателя постоянного тока 9, напорные шланги 11, манометр 7, вентиль 6, насос высокого давления 2, предохранительный клапан 5, приводной двигатель постоянного тока 4, соединенный муфтой с насосом. Гидросистема работает на масле АМГ-10, находящемся в баках 1 и 12.

Измерительно-регистрирующая аппаратура состоит из датчика давления тензометрического типа 24 и датчика скорости выпрессовывания теста, который, в свою очередь, включает электрическую лампочку 26, ролик с отверстиями 30, свободно вращающийся на оси, и фоторезистор 31. Оба датчика соединены с входом тензостанции 29 (ТА-5). Выход тензостанции, а также сигнал с электронного задатчика времени 27 (П-104) подается на осциллограф 28 (Н-041 У4.2). Для регулирования частоты вращения двигателей 4 и 9 использованы тиристорные блоки управления 3 и 8 (ЭТО 2-16 У4). Для регистрации частоты и амплитуды вибрации применяется виброграф 35 (ВР-1), шток которого крепится к нижнему штоку рабочего цилиндра 34.

Вибровискозиметр работает следующим образом. Исследуемый продукт, например макаронное тесто с известной влажностью, помещается в камеру прессования 23, где термится до температуры, устанавливаемой на термостате 21. Включаются тензостанция 29, задатчик времени 27, осциллограф 28. Датчик давления 24, тарированный на специальном прессе, ввинчивается в камеру прессования 23. Далее открывается вентиль 14 и включается двигатель 15. Золотник 18 переключается в положение, указанное на схеме, а вентилем 14 устанавливается необходимое давление масла, которое контролируется манометром 17.

Тесто выпрессовывается из капилляра 25, попадает на ролик 30 и вращает его. При этом фоторезистор 31 периодически освещается, его сопротивление падает и в цепи возникает пульсирующий ток. На ленте осциллографа 28 записываются синусоида задатчика времени 27, электрический сигнал датчика давления 24 и импульсы тока в фоторезисторе 31. По тарировочному графику определяется давление прессования, а по числу импульсов тока в фоторезисторе за определенный промежуток времени — скорость выпрессовывания теста.

Основные реологические параметры теста определяют по известной методике капиллярной вискозиметрии.

Для изучения влияния вибрации на реологические свойства макаронного теста используют гидравлический вибровозбудитель. Для этого включают блоки управления 3 и 8, устанавливают определенные частоты вращения золотника 10 (частоту колебаний) и масляного насоса 2 (амплитуду колебаний). Затем закрывают вентиль 6 и поток масла от насоса 2 через вращающийся золотник 10 поступает то в верхнюю, то в нижнюю часть рабочего цилиндра. При этом насадка 32 совершает колебания в массе теста, близкие по форме к синусоидальным. Амплитуду вибрации устанавливают регулированием частоты вращения масляного насоса с помощью блока 3 и вентиля 6, частоту вибрации — двигателем 9 от блока 8. Для исключения влияния потерь

давления на входе в капилляр опыт проводят с двумя капиллярами одного диаметра, но разной длины.

По окончании измерений золотник 18 переключают, поршень 22 выходит из камеры прессования и установку очищают и готовят к следующей серии измерений.

В процессе исследований установлено [12], что при вибрации реологические свойства макаронного теста хорошо описываются степенным уравнением. При течении теста по цилиндрическим каналам при использовании «глубинного» индентора были получены соотношения между коэффициентом эффективности вибровоздействий ϕ и реологическими константами массы. При этом отношение объема индентора к объему камеры прессования определяли коэффициентом α , значения которого изменяли в пределах от 0,004 до 0,08.

В результате анализа полученных данных установлено, что коэффициент эффективности вибровоздействия ϕ в степени $\frac{1}{n}$ линейно зависит от произведения частоты вибрации на ее амплитуду (fA), причем эффективность вибровоздействия практически не зависит от влажности макаронного теста.

Эмпирическая зависимость реологических констант теста от параметров вибровоздействия для оптимального значения α (0,02—0,035) может быть записана в виде:

$$K_1 = K_0(1 + \beta fA)^{-n}, \quad (6.3)$$

где K_1 и K_0 — коэффициенты консистенции соответственно при вибрации и при стационарном течении (табл. 6.9); β — коэффициент пропорциональности, равный $0,203 \text{ (мм} \cdot \text{Гц)}^{-1}$.

Полученные зависимости могут быть использованы при расчете параметров прессования (производительности, создаваемого давления) при условии, что кривая течения перерабатываемого материала может быть аппроксимирована степенным законом, а вибрируемый индентор находится в предматричной камере прессы.

6.9. Зависимость реологических констант K и n макаронного теста при влажности 33 % от параметров колебаний

Частота вибрации, Гц	Амплитуда вибрации, мм	K	n	$\phi \frac{1}{n}$	fA
0	0	40700	0,50	1	0
6,91	1,37	37400	0,495	1,19	9,97
	2,58	34600	0,492	1,40	17,83
	4,08	32150	0,500	1,61	28,19
16,4	0,49	38400	0,497	1,12	8,02
	1,38	34000	0,500	1,44	22,60
	1,71	32800	0,498	1,54	28,00
23,19	0,19	38400	0,502	1,12	4,41
	0,54	37100	0,509	1,21	12,52
	0,81	34260	0,504	1,41	18,78

6.4. ВИБРОРЕОМЕТРЫ, ОСНОВАННЫЕ НА РАЗЛИЧНЫХ ПРИНЦИПАХ

Относительно полную характеристику реологических свойств материала можно получить с помощью приборов, основанных на методе тангенциального смещения пластины. Основным преимуществом таких приборов является то, что они позволяют определить модуль мгновенной упругой деформации, модуль замедленной упругой деформации, эффективную вязкость при малых скоростях сдвига, изучить процесс релаксации напряжений, а также снять кривые кинетики деформации по двум методикам: $\tau = \text{const}$ и $\dot{\gamma} = \text{const}$.

Прибор, основанный на принципе вибрационного уплотнения (рис. 6.13), предназначен для изучения реологических свойств в процессе уплотнения дисперсных систем в условиях вибрации. На платформе 2 электродинамического стенда 1 жестко закреплена кювета 3 с помещенной в ней рифленной пластиной 5. На кювете установлен пневмоцилиндр 4 со штоком, к которому прикреплен штамп для уплотнения материала (на рисунке не показан). Перемещение штампа фиксируется с помощью реостатного датчика и регистрирующего прибора. Подвижная пластина 5 гибкой нитью 6 соединена с динамометром растяжения 7. Установка приводится в действие от электродвигателя 9 с редуктором 8.

Установка позволяет определить реологические характеристики дисперсной системы τ и $\eta_{\text{эф}}$ в процессе уплотнения в зависимости от состава исследуемой системы и параметров вибрации.

К недостаткам таких приборов следует отнести инвариантность реологических характеристик по отношению к размерам приборов, а также необходимость использования условных величин.

Прибор, основанный на принципе всестороннего сжатия, позволяет изучать такие процессы, как релаксация напряжений, ползучесть, изменение плотности в зависимости от давления и т. д. Для изучения влияния вибрационного воздействия на характер протекания названных процессов предназначена установка (рис. 6.14), которая содержит цилиндр 2 с поршнем 3. Давление создается перемещением поршня с

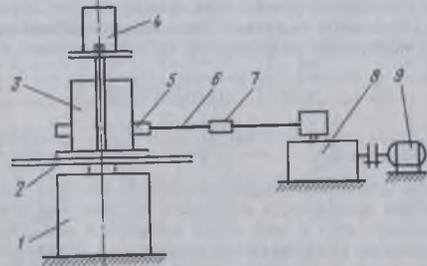


Рис. 6.13. Прибор для исследования структурно-механических свойств дисперсных систем в процессе вибрационного уплотнения

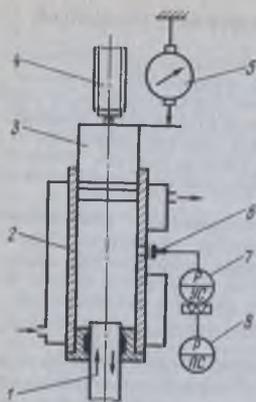


Рис. 6.14. Прибор для исследования реологических свойств пищевых материалов в условиях всестороннего сжатия

30 мин. Затем, вращая винт 4, в цилиндре создают начальное давление, включают вибратор и секундомер и записывают показания миллиамперметра через равные промежутки времени в течение 3 мин. После этого давление снимают, массу заменяют и повторяют измерения, но при другом начальном давлении.

При изучении ползучести кондитерских масс задают начальное давление, предварительно отметив показание индикатора при атмосферном давлении. Затем включают вибратор и секундомер и, поддерживая давление в полости цилиндра постоянным, регистрируют показания индикатора через равные промежутки времени.

В результате опытов получают зависимость деформации от времени: $\varepsilon = \varepsilon(t)$. Начальная деформация ε_0 рассчитывается по формуле

$$\varepsilon_0 = (1 - \rho_0/\rho_p) \cdot 100 \%, \quad (6.4)$$

где ρ_0 — начальная плотность массы, кг/м^3 ; ρ_p — плотность массы при рабочем давлении, кг/м^3 .

Для опытов брали постоянное количество массы — 0,15 кг.

При изучении зависимости плотности от давления показания индикатора фиксируют через 3 мин после включения вибратора. При этом давление в цилиндре поддерживают постоянным. Измерения повторяют, увеличивая давление с заданным шагом и не меняя массу. В результате опыта получают зависимость плотности массы от давления прессования при определенной интенсивности поля периодических объемных деформаций.

помощью винта 4. Перемещение поршня фиксируют индикатором 5 часового типа, давление в цилиндре — тензометрическим датчиком 6, сигнал которого поступает в усилитель 7 и регистрируется миллиамперметром 8. Сквозь дно в полость цилиндра введен поршень 1, соединенный с виброплощадкой, которая кинематически связана с механическим эксцентриковым вибратором. Поршень 1 колеблется с заданной частотой и амплитудой вдоль вертикальной оси, тем самым обеспечивая продольное вибрирование массы в цилиндре, в результате чего в полости цилиндра наряду со стационарным давлением возникают периодические объемные деформации. Цилиндр снабжен рубашкой, в которой циркулирует вода из термостата.

Методика проведения исследования заключается в следующем. При изучении релаксации напряжений предварительно оттерперированную массу помещают в цилиндр, устанавливают поршень и терперируют установку в течение 20—

Для определения количественных и качественных характеристик воздействия вибрации при исследованиях релаксации напряжений, ползучести и зависимости плотности от давления проводят параллельные опыты при неподвижном нижнем поршне (отключенном вибраторе).

Исследование релаксации напряжений проводили с прапиновой массой Таганай при температуре 30°C в диапазоне изменения давления от 0 до 0,5 МПа. Амплитуду объемной деформации определяли по отношению смещения поршня к объему цилиндра с массой.

Кривые релаксации описываются уравнением

$$\sigma = \sigma_0(1 - A_p \cdot 10^{-3} t^n), \quad (6.5)$$

где σ — напряжение в момент времени t , кПа; σ_0 — начальное напряжение, кПа; t — текущее время, с; A_p, n — эмпирические коэффициенты (табл. 6.10).

При вибрации уменьшается конечное напряжение, увеличивается скорость релаксации, особенно в начале процесса (табл. 6.11).

Наложение вибрации оказывает значительное воздействие и на ползучесть. Так, если без вибрации изменение объема массы за 300 с составляет 0,74 % (при напряжении 0,2 МПа), то с вибрацией — 1,3 %.

6.10. Зависимость коэффициентов уравнения (6.5) от параметров колебаний

Частота, Гц	Амплитуда, мм	Начальное напряжение, кПа	n	A_p	Частота, Гц	Амплитуда, мм	Начальное напряжение, кПа	n	A_p
0	0	305	0,90	3,2	24	0,25	293	0,78	8,0
8	0,5	500		1,8			515		5,2
		304	0,67	6,8	24	0,5	305	0,67	19,5
		507		8,0			520		12,8
16	0,5	301	0,67	14,5	24	1	306	0,63	29,4
		520		7,0			507		29,4

6.11. Зависимость скорости релаксации от времени, частоты (в Гц) и амплитуды A (в мм) колебаний

Время, с	$f=0; A=0$	$f=8; A=0,5$	$f=16; A=0,5$	$f=24; A=0,25$	$f=24; A=0,5$	$f=24; A=1,0$
0	1,01	0,95	2,92	1,82	2,82	7,35
60	0,46	0,45	0,58	0,48	0,71	1,06
120	0,28	0,28	0,34	0,24	0,41	0,50
180	0,16	0,18	0,25	0,14	0,22	0,30
240	0,09	0,10	0,18	0,12	0,14	0,22
300	0,05	0,09	0,13	0,12	0,08	0,14

Прибор, основанный на принципе деформации в условиях вибрации (рис. 6.15), позволяет изучать реологические свойства кондитерских масс в условиях вибрации с построением кривых кинетики сдвиговой деформации. Эксцентриковый вибровозбудитель 1 сообщает платформе 2 с расположенной на ней кюветой 3 возвратно-поступательное движение.

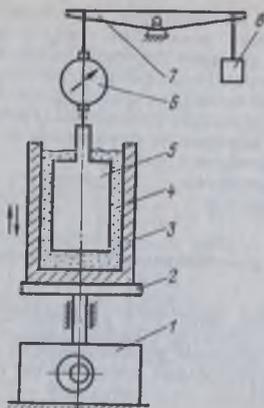


Рис. 6.15. Установка для исследования кинетики деформации в условиях вибрации

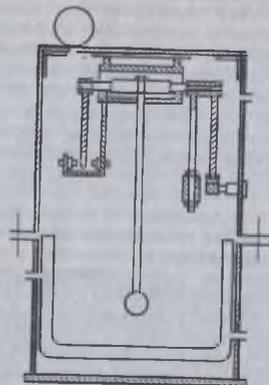


Рис. 6.16. Маятниковый вискозиметр

Исследуемую массу 4 помещают в кювету 3 прямоугольного сечения с параллельными стенками. Это обеспечивает достаточно точное определение деформации в зазоре между пластиной 5 и стенками кюветы. Частота и амплитуда колебаний фиксируются индикатором 6 часового типа, связанного с рычагом 7, на другом плече которого подвешен груз 8.

Кривые кинетики деформации снимают при различных статических напряжениях и параметрах вибрации. Полученные результаты описывали уравнением Бургерса:

$$\gamma = \frac{\tau}{G_1} + \frac{\tau}{G_2} \left[1 - \exp\left(-\frac{G_2}{\eta_2} t\right) \right] + \frac{\tau}{\eta_1} t, \quad (6.6)$$

где γ — текущее значение деформации; τ — напряжение сдвига, Па; G_1 — модуль мгновенной упругости деформации, Па; G_2 — модуль замедленной упругой деформации, Па; η_1 — вязкость ньютоновского течения, Па·с; η_2 — вязкость упругого последствия.

Исследования показали, что при увеличении частоты вибрации уменьшаются значения всех констант модели Бургерса (табл. 6.12), причем в наибольшей степени изменяются вязкость ньютоновского течения и модуль мгновенной упругой деформации.

Вискозиметр, основанный на маятниковом принципе (рис. 6.16), предназначен для определения вязкости ньютоновских и маловязких жидкостей [14]. Прибор имеет точное теоретическое обоснование только для ньютоновских жидкостей. При испытании аномальных систем определяется эффективная вязкость, соответствующая средней скорости движения рабочего тела. Принцип работы основан на регистрации

6.12. Значения констант модели Бургерса в зависимости от частоты колебаний при амплитуде $A = 0,04$ мм и напряжении сдвига $\tau = 200$ Па

Частота, Гц	G_1 , Па	G_2 , Па	η_1 , кПа·с	η_2 , кПа·с	Частота, Гц	G_1 , Па	G_2 , Па	η_1 , кПа·с	η_2 , кПа·с
	Конфетная масса Дуэт				Конфетная масса Сонет				
0	12000	4000	6800	65	0	5000	4200	3100	29
17	9000	3800	940	66	17	4200	3900	730	27
25	7000	3300	550	65	25	2500	1300	690	17
35	5500	3200	340	60	35	1900	1100	340	10

логарифмического декремента затухания колебаний физического маятника в испытуемой жидкости.

Наиболее значительная погрешность наблюдается при испытании слабоструктурированных, аномальных жидкостей. При увеличении скорости сдвига (например, для жидких полуфабрикатов хлебопекарного производства — более 12 с^{-1}) погрешность измерения эффективной вязкости резко снижается и составляет около 10 %.

Пределы измерения: динамической вязкости 0,001—5 Па·с, эффективной вязкости 0,1—5 Па·с, избыточного давления 0—1 МПа. Погрешность прибора ± 5 %, рабочее напряжение 220 В. Габаритные размеры $0,3 \times 0,3 \times 0,6$ м, масса 15 кг.

Ультразвуковые вискозиметры основаны на принципе измерения поглощения ультразвука в жидкой среде. Динамическая вязкость определяется по формуле [2]

$$\eta = \frac{K \rho v^3 \delta}{\pi^2 f^2}, \quad (6.7)$$

где K — постоянный коэффициент; ρ — плотность жидкости; v — скорость ультразвука; δ — коэффициент поглощения; f — частота ультразвука.

Обычно вискозиметр состоит из генератора, возбуждающего в продукте ультразвуковые колебания, и вибратора, принимающего колебания. Вибраторы бывают двух видов: пьезоэлектрический и магнетострикционный. Существующее соотношение между переменным напряжением на пьезоэлементе и вязкостью позволяет измерять ее величину. Обычно шкала стрелочного индикатора, включенного в цепь генератора, градуирована в единицах вязкости.

Прибор, основанный на принципе «камертона», служит для определения динамической вязкости жидкости методом затухающих колебаний — находят декремент колебаний и по величине этого показателя судят о вязкости жидкости [5]. Обычно в теле осциллятора (пластина, камертон и др.) в продольной оси высверливают полость и заполняют ее исследуемым материалом. Схема U-образного камертона дана на рис. 6.17, а. В ветви камертона 1 запрессовывается исследуемый продукт 2. На ветвях камертона расположены постоянные магниты с магнитоприводами 4, взаимодействующие соответственно с обмотками управления 3 и привода 5. Обмотка управления через разделительный конденсатор С включена в базовую цепь транзистора Т, а обмотка привода 5 — в коллекторную цепь. Сопротивление обеспечивает необхо-

димый режим работы транзистора по постоянному току. Цифровой прибор 6 через переключатель 7 присоединен к обмотке привода таким образом, что при подключении цифрового прибора, определяющего логарифмический декремент колебаний, отключается питание привода и колебания камертона становятся затухающими. Наводимое в катушке привода напряжение подается на цифровой прибор 6, который подсчитывает количество затухающих колебаний камертона от максимального значения амплитуды до величины, равной 0,7 ее максимума. Количество затухающих колебаний определяется динамической вязкостью исследуемого материала, запрессованного в полости камертона. Частота колебаний варьирует от 250 до 350 Гц.

Предложен [7] метод быстрого и точного определения содержания сухих веществ в мелассе камертонным вискозиметром, в котором использован чувствительный элемент в виде диска, опускаемый в раствор. Частота его автоколебаний зависит от произведения вязкости на плотность материала.

Акустический вибрационный вискозиметр (рис. 6.17, б) предназначен для определения вязкости с помощью ЭДС [4]. Вибрирующая пластина 1 (вибрации пластине сообщаются от генератора переменного напряжения 4 через обмотку возбуждения 3 и сердечник 2) погружается в исследуемую жидкость, под действием колебаний пластины на плоскостях пьезоэлемента 7 образуется переменное механическое напряжение. С увеличением вязкости жидкости уменьшается амплитуда колебания якоря, деформация пьезопластины также уменьшается. Развивающаяся на пьезоэлементе ЭДС усиливается усилителем 6 и измеряется стрелочным прибором 5, градуированным в единицах динамической вязкости.

Импульсный вискозиметр основан на измерении затухания собственных упругих колебаний пластинки, находящейся в жидкости, в зависимости от вязкости последней. Магнитострикционная пластинка, возбуждаемая периодическими прямоугольными импульсами, подаваемыми

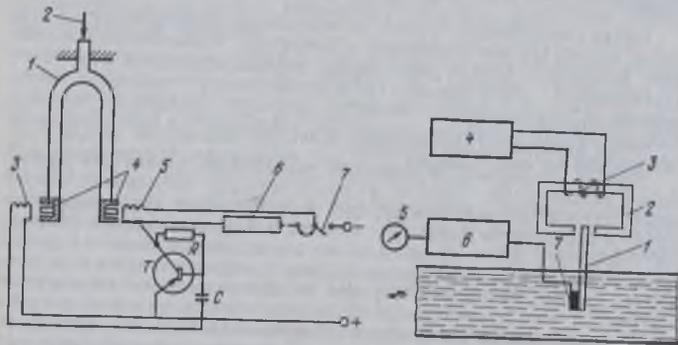


Рис. 6.17. Вискозиметры: а — камертонный; б — акустический

в ее обмотку, колеблется на собственной частоте. На пластину, являющуюся датчиком прибора, подаются возбуждающие продольные колебания пластины с коэффициентом затухания, зависящим от вязкости среды.

По тому же закону убывает и напряжение, индуцируемое колеблющейся пластиной в обмотке зонда. Это напряжение подается на усилитель, ограничитель, интегратор и усилитель постоянного тока. Снимаемое с последнего напряжение управляет частотой повторения пилообразных колебаний генератора. Прибор измеряет средний ток, потребляемый этим генератором.

В СССР разработан ряд приборов, работающих на этом принципе: вискозиметр автоматический ультразвуковой типа ВАУ-1 для измерения вязкости ньютоновских жидкостей; ультразвуковой вискозиметр типа УЗВ-58 для непрерывного контроля вязкости жидкостей в технологических потоках; вискозиметр типа ВАВ-1 для непрерывного измерения вязкости жидких продуктов (например, кефира).

Ультразвуковой вискозиметр ВУЗ-1 основан на поддержании непрерывной генерации импульсов, возбуждающих вибратор датчика. Это достигается тем, что в момент, когда амплитуда затухающих колебаний вибратора уменьшится до определенной величины, автоматически посылается очередной импульс. Шкала стрелочного индикатора градуирована в единицах вязкости, умноженных на плотность. Датчики прибора бывают проточного и погружного вида и позволяют измерять вязкость в пределах 0—50 Па при температуре воздуха до 30 °С и влажности до 80%; погрешность ±5% [9].

6.5. МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

Динамические методы изучения свойств пищевых продуктов являются менее разрушительными по сравнению с традиционными. Главным преимуществом динамических методов является то, что с их помощью можно получить обширную информацию за относительно короткий промежуток времени. Это позволяет избежать или свести до минимума химические и физические изменения пищевых продуктов в процессе измерений.

Метод резонанса был первоначально использован для определения резонансной частоты пищевых продуктов и модуля упругости Юнга при резонансной частоте.

Одна из первых формул для определения модуля упругости пищевых продуктов была предложена В. Дрейком [17] для образцов размером 6×12×50 мм:

$$E = 48\pi^2 \rho l^2 f^2 / (m^4 a^2), \quad (6.8)$$

где E — модуль упругости, Па; ρ — плотность материала, кг/м³; l — длина, м; f — частота, Гц; m — фактор, учитывающий характер резонанса, м^{-0.5}; a — толщина образца, м. Позднее уравнение было упрощено введением $m^4 = 12,36$ для основной частоты [18].

Более точные результаты дают испытания при продольных колебаниях образцов. Для цилиндрических образцов модуль упругости определяют по формуле

$$E = \frac{\rho}{K_n} \left(\frac{2H_n}{\pi} \right)^2, \quad (6.9)$$

где K_n — корректирующий фактор n -го резонанса, причем

$$K_n = 1 - \frac{\pi^2 n^2 \mu^2 d^2}{8l^2}, \quad (6.10)$$

где μ — коэффициент Пуассона.

Формула (6.9) справедлива при $d/\lambda \leq 1$, где λ — длина волны.

Для образцов квадратного поперечного сечения шириной b рекомендуется подстановка $d^2 = 4/3 b^2$. Для образцов прямоугольного поперечного сечения $d^2 = 2/3(a^2 + b^2)$, где a и b — стороны поперечного сечения.

Экспериментальная установка для резонансных исследований пищевых продуктов содержит частотный генератор, усилитель мощности, вибровозбудитель. Сигнал датчика ускорения измеряется специальным вольтметром. Для записи частотных характеристик и наблюдения за формой волн и сдвигом фаз служит осциллограф или самописец.

В литературе имеются данные о резонансных характеристиках овощей и фруктов (табл. 6.13) [18].

Метод непосредственного измерения напряжений и деформаций заключается в приложении к образцу 2 (рис. 6.18) синусоидально изменяющейся силы и определении с помощью специального датчика 1 величины деформации. Синусоидальная сила создается электродинамическим вибровозбудителем 4, который приводится в действие генератором синусоидальных колебаний 5 через усилители мощности 6 и 7. Датчик 3 виброускорения устанавливают на вибрирующем штоке. Образец 2 помещают между двумя дисками, один из которых связан с вибровозбудителем 4, а другой — с жестким вертикальным суппортом (одновременно служит датчиком динамической нагрузки). Между ними может быть помещен датчик статической силы. Сигналы датчиков виброускорения и нагрузок усиливаются и поступают на вертикальную и горизон-

6.13. Механические характеристики пищевых продуктов, полученные при резонансных испытаниях [18]

Пищевой продукт	Форма образца	Модуль упругости, МПа	Коэффициент внутреннего трения
Яблоки	В целом виде	6,2—10,0	0,034—0,160
	Цилиндрическая	1,7—4,5	0,09—0,125
Бананы	То же	0,85—2,72	—
Груши	»	12—29	0,072—0,099
Персики	»	1,95—19,3	0,09—0,143
Картофель	»	5,9—13,0	0,082—0,118
	Кубическая	7,4—13,3	—
Сладкий картофель	Цилиндрическая	9,4—18,0	0,095—0,198

тальную развертку электронно-лучевого осциллографа 8, образуя фигуры Лиссажу.

Для линейных виброупругих материалов функция силы выражается в напряжениях, которые можно разложить на две компоненты: одна — в фазе с деформацией, другая смещена по фазе на 90° . По этим значениям вычисляют компоненты комплексного модуля E^* и его составляющие: модуль упругости E' и модуль потерь E'' , причем

$$E^* = E' + iE'', \quad (6.11)$$

$$E^* = |E^*|(\cos\theta + i\sin\theta). \quad (6.12)$$

В формуле (6.12) θ — фазовый угол (угол потерь). Тангенс фазового угла (тангенс угла потерь) иногда называют коэффициентом внутреннего трения.

С помощью этого метода были определены реологические характеристики различных материалов при различных частотах возмущающей силы. Полученные при этом результаты сравнивались с данными сенсорного анализа. Отмечена довольно высокая корреляция (табл. 6.14).

Реогониометр Вайсенберга (фирма «Сангамо», Великобритания) используется для определения динамических характеристик [10]. Реогониометр представляет собой ротационный прибор с рабочим узлом конус—плоскость. Два привода обеспечивают вращение с постоянной

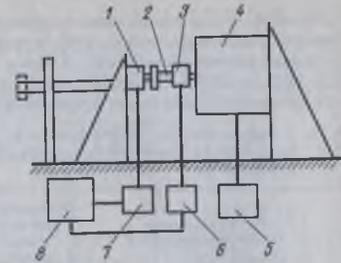


Рис. 6.18. Виброреометр

6.14. Механические характеристики пищевых продуктов, определенные по методу непосредственных измерений напряжения и деформации [18]

Пищевой продукт (образцы цилиндрической формы)	Частота, Гц	Абсолютный модуль, МПа	Фазовый угол, град
Пектиновый гель	100	5,9—11,4	6,65—34
	280	59,9—77,2	20,6—29
Сладкий картофель	40	15,0—19,0	4,0—6
	240	19,0—23,0	5,0—7
Персики	70	4,0—10,0	—
	300	9,0—30,0	—
Рис	100	840—4200	0,085—0,263*
	1000	1890—6710	0,038—0,088*
Картофель	50	6,96—9,18	16—18,7
	500	7,6—11,2	18,2—31,0
Яблоки	20	6,7—12,6	—
	330	18,7—23	—
Сосиски	40	1,4—2,3	—
	240	3,8—6,0	—
Зерно	1	213—675	9

* Значения тангенса угла потерь.

скоростью и гармонические колебания. Каждый привод включает синхронный электродвигатель и 60-ступенчатую коробку передач. Колебания с помощью механической системы могут осуществляться с частотой $2,5 \cdot 10^{-3} - 25$ Гц. Термостатирующая камера позволяет проводить исследования в диапазоне изменения температур от -50 до 150 °С.

6.15. Реодинамические характеристики сыров, полученные на реонометре Вайсенберга при частоте колебаний 0,1 Гц и температуре 18 °С (данные ВНИИМСа)

Наименование и характеристика сыра	Комплексный модуль сдвига $G^* \cdot 10^{-3}$, Па	Модуль упругости $G' \cdot 10^{-3}$, Па	Модуль потерь $G'' \cdot 10^{-3}$, Па	Комплексная вязкость $\eta^* \cdot 10^{-3}$, Па·с	Динамическая вязкость $\eta' \cdot 10^{-3}$, Па·с
Голландский (СВ = 0,592; рН 5,3)	100,7	96,9	27,7	160,3	44,0
Пошехонский (СВ = 0,57; рН 5,4)	87,9	84,3	23,9	140,0	38,0
Костромской (СВ = 0,588; рН 5,06)	88,9	84,9	26,0	141,3	41,3
Российский (СВ = 0,60; рН 5,25)	108,6	103,0	33,9	172,7	54,1
Чеддер (СВ = 0,644; рН 5,15)	230,6	226,2	44,6	367,0	71,0

В табл. 6.15 приведены реодинамические характеристики сыров, полученные на реонометре Вайсенберга: модуль упругости G' , характеризующий энергию, запасаемую и отдаваемую материалом в каждом цикле колебаний, $G' = (\tau_0/\gamma_0) \cos \theta$; модуль потерь G'' , характеризующий ту часть сопротивления деформации, которая в каждом цикле колебаний переходит в тепло, $G'' = (\tau_0/\gamma_0) \sin \theta$. По этим характеристикам можно вычислить динамическую вязкость материала $\eta' = G''/\omega$ (здесь ω — круговая частота колебаний), время релаксации напряжений при заданной частоте колебаний $t_\omega = 2G'/G''\omega$, а также тангенс угла механических потерь $\tan \theta = G''/G'$. Последняя величина характеризует степень твердообразности материала: для упругого тела $\tan \theta = 0$, для вязкой жидкости $\tan \theta \rightarrow \infty$.

Методы динамических испытаний представляют собой новое направление в изучении физических свойств пищевых продуктов. Результаты, полученные различными исследователями, показали, что динамические параметры в условиях резонанса находятся в достаточно тесной связи с текстурой пищевых продуктов. Испытания материалов по методу непосредственного измерения деформаций и напряжений могут быть с успехом использованы для предсказания текстуры этих материалов.

Распространение упругих волн в пищевых средах обусловлено динамическими характеристиками дисперсных систем, а также процессом затухания колебаний. С вопросом затухания колебаний связана величина поглощения энергии системой. Другая сторона этого вопроса — равномерность амплитуд колебаний по всему объему обрабатываемой среды.

Экспериментальный стенд

для исследования динамического поведения пищевых масс в условиях импульсных и периодических механических воздействий с целью определения скорости распространения возмущений, диссипативных, упругих $E(\omega)$ и вязкостных $\eta(\omega)$ характеристик масс создан в МТИПШе. Стенд позволяет импульсно и периодически механически воздействовать на пищевые массы и регистрировать параметры развивающихся вследствие этого процессов. В состав стенда входят цилиндрический термостатируемый сосуд для массы, термостат, два сменных силовых блока для создания импульсного и периодического механического воздействия на массы и блок измерительно-регистрирующей аппаратуры.

Стенд работает следующим образом. Исследуемую массу 6 (рис. 6.19) плотно, без пустот загружают в термостатируемый цилиндрический сосуд 5, при помощи винта поджимного устройства 1 устанавливают поршень 4 в положение, обеспечивающее необходимое давление. Для осуществления периодических воздействий включают двигатель постоянного тока 12, при повороте вала которого на один оборот поршень 8 при помощи регулируемого эксцентрика 11 и шатуна 10 совершает полный цикл возвратно-поступательного движения. Импульсное воздействие создается ударным электромагнитным устройством 15, при этом обратный ход поршня 8 ограничивается упором 14. Чтобы исключить искажающее влияние трения, поверхность контакта поршней с цилиндрическим сосудом тщательно шлифуют.

Частоту вращения вала двигателя 12 плавно меняют при помощи блока управления в пределах от 2 до 50 Гц, эксцентриситет задается в пределах от 0 до 8 мм.

Цепь контрольно-измерительных приборов состоит из датчика перемены 9, поршня 8, двух датчиков давления 3 индуктивного типа, установленных в торцовых поверхностях поршней, термометра 7, индикатора 2 часового типа и датчика 13 частоты вращения вала двигателя 12. Применение двухлучевого запоминающего осциллографа С8-17 и светолучевого осциллографа Н-117/1 позволяет синхронно регистрировать изменения всех параметров.

Исследования влияния температуры и плотности на некоторые

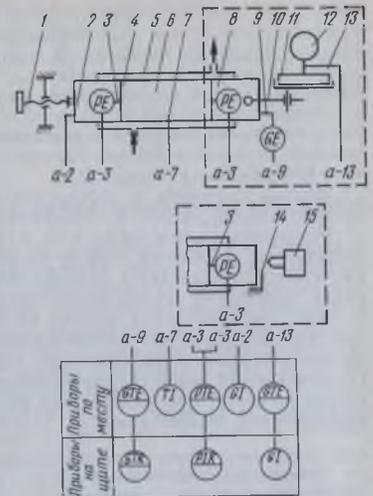


Рис. 6.19. Экспериментальный стенд для исследования распространения упругих волн в пищевых массах

физико-механические характеристики конфетных масс в условиях импульсного воздействия были проведены на Московской кондитерской фабрике «Красный Октябрь». В опытах определяли скорость распространения импульса для конфетных масс Маска, Теремок и Балет, плотность которых соответственно составляла 1225, 1266 и 1300 кг/м³, в интервале температур от 10 до 60 °С. Влияние плотности на скорость распространения импульса в указанных массах устанавливали, плавно изменяя их первоначальную плотность до 4 %. Температуру масс при этом поддерживали равной 30 °С.

Модуль упругости E рассчитывали по формуле $E = \rho v^2$, где ρ — плотность массы, кг/м³, v — скорость распространения импульса, м/с.

Результаты опытов (табл. 6.16, 6.17) показали, что при повышении температуры снижаются упругие свойства конфетной массы, повышение плотности приводит к возрастанию ее упругих свойств. Таким образом, результаты исследований указывают на существенное влияние температуры и плотности масс на их упругие свойства и скорость распространения в них импульсных воздействий. Это обстоятельство необходимо учитывать в динамических расчетах нестационарных режимов технологических процессов, таких, например, как формование, транспортирование по трубам, течение масс по каналам формирующих машин при вибрационном воздействии.

6.16. Зависимость скорости распространения импульса и модуля упругости от температуры конфетной массы

Температура, °С	Скорость импульса, м/с			Модуль упругости, МПа		
	Балет	Маска	Теремок	Балет	Маска	Теремок
10	240	262	285	184	211	244
20	142	158	183	25	37	56
25	91	105	120	11	14	20
30	70	78	92	6	8	11
40	52	63	76	2,5	5	7,5
50	47	58	70	2	4	6

6.17. Зависимость скорости распространения импульса и модуля упругости от относительного изменения плотности конфетной массы

Относительное изменение плотности, %	Скорость импульса, м/с			Модуль упругости, МПа		
	Балет	Маска	Теремок	Балет	Маска	Теремок
0	70	77	92	6,35	7,25	10,4
0,5	80	85	103	8,3	8,9	13,5
1,0	105	96	120	14,5	11,3	18,3
1,5	120	114	123	19,0	16,2	19,3
2,0	147	144	150	28,7	26,0	28,8
2,5	270	198	242	97,5	49,3	75,5
3,0	327	247	—	143	77,2	—

7. АВТОМАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ И КОНТРОЛЬ РЕОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

7.1. ПРИНЦИПЫ АВТОМАТИЗАЦИИ РЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

За последние 10 лет все наиболее известные фирмы — производители измерительных приборов (реометров) смогли достичь большого прогресса благодаря применению компьютеров для автоматизации реологических измерений и обработки полученных данных. Реометр и термостат посредством системного интерфейса были соединены с компьютером. К компьютеру могут быть подключены графопостроитель и печатающее устройство для выдачи графической или численной информации (рис. 7.1). Программа измерений вызывается с помощью компьютера. При этом выбранные условия измерений поступают на системный интерфейс и оттуда, как управляющие сигналы, на реометр и термостат.

Измеренные на ротационном реометре значения (вращающий момент M и температура T) аналогичным образом поступают на системный интерфейс и фиксируются через определенные интервалы времени, определяемые компьютером.

Программа для компьютера содержит следующие компоненты: предварительный выбор параметров опыта; управление ходом измерений; обработка и запись в память данных измерений; анализ результатов измерений; табуляция и графическое представление полученных результатов.

Программа, как правило, имеет модульное строение и входит в библиотеку программ. Хранение программы осуществляется на гибком диске или в постоянной памяти компьютера. Модульное строение делает возможным создать оптимальный пакет программ для любого конкретного случая путем присоединения дополнительных модулей, учитывающих изменяющиеся требования. Подобные прикладные программы полностью определяют методику проведения опыта: параметры опыта, метод измерений, представление результатов измерений, вычисление параметров модели, определение специальных характеристик.

Пакет программ может быть подобран по желанию пользователя при работе с дисплеем в диалоговом режиме, а также может быть вызван с гибкого или твердого диска.

Представление результатов в табличной форме с помощью печатающего устройства осуществляется различными методами после выполнения программ измерений. Как правило, кривые течения и вязкости печатаются точками в виде ряда значений напряжения сдвига τ и эффективной вязкости $\eta_{эф}$ с предварительно выбранным интервалом скорости сдвига D и при установленном значении температуры T (табл. 7.1).



Рис. 7.1. Структурная схема автоматического ротационного реометра «Висколаб» LC10 фирмы «Физика-Местехник»

ролируемого процесса конширования через вентиль 14, включаемый приводным механизмом 13, поступает в зазор коаксиальной цилиндрической системы ротационного реометра 2, вытесняя при этом массу, оставшуюся там от предыдущего замера, которая через слив возвращается в конш-машину. Крутящий момент на валу ротора контролируется датчиком 3, угловая скорость — датчиком 5. Ротор приводится в движение электродвигателем постоянного тока 4. Команда на его включение подается с микро-ЭВМ. Через цифровой преобразователь 7 и регулируемый электропривод 6. Шоколадная масса должна темперироваться в сосуде 1 при температуре измерений 40 °С и подвергаться предваритель-

7.1. Представление результатов в табличной форме для шоколадной массы

№ п/п	$D, 1/с$	$T, °C$	$\tau, Па$	$\eta, Па \cdot с$
1	0,200	35,77	10,036	50,178
2	5,453	39,78	19,472	3,571
3	10,705	39,80	26,734	2,479
4	15,958	39,81	33,055	2,071
5	21,211	39,82	40,382	1,904
6	26,463	39,83	46,276	1,749
7	31,716	39,84	53,300	1,681
8	36,968	39,84	59,412	1,602
9	42,221	39,85	64,988	1,539
10	47,474	39,86	70,988	1,495
...
20	100,000	39,94	129,774	1,298

Графическое представление с помощью графопостроителя осуществляется в различных масштабах: линейном, логарифмическом, функциональном (например, $\sqrt{x} - \sqrt{y}$). Типичными формами графического представления являются: кривые течения $\tau = f(D)$, кривые вязкости $\eta_{sp} = f(D)$, температурная функция вязкости $\eta = f(T)$, зависимость вязкости от времени $\eta = f(t)$.

Программирование для получения и обработки результатов измерений можно показать на примере автоматического контроля процесса конширования шоколадной массы с помощью квазипрерывного производственного реометра (рис. 7.2) в соответствии с законом Кэссона. Цикл измерений заключается в следующем. Исследуемая шоколадная масса из конт-

ному сдвигу с малой скоростью для достижения гомогенного состояния. Сигналы от датчиков крутящего момента 3 и температуры по линиям связи 12 через усилитель 11 и цифровой преобразователь 10 поступают в микро-ЭВМ, оснащенную клавиатурой 9 и принтером 8.

Измерения с помощью компьютера могут начаться только при достижении заданной температуры. Измерения проводятся в области скоростей сдвига от 5 до 60 $с^{-1}$ при возрастающей и убывающей скорости сдвига. По результатам измерений необходимо построить кривую течения и по ней определить параметры модели Кэссона τ_k и η_k . Результаты измерений необходимо показать в численной форме и выдать аналоговый сигнал для управления процессом.

На рис. 7.3 показана схема разработанного пакета программ для автоматического процессного реометра.

Общая программа делится на две части: управляющую и вычислительную. С помощью управляющей программы компьютер реализует порядок операций, необходимых для проведения измерений, и запись полученных результатов в память.

С помощью вычислительной программы, которая вызывается по окончании цикла измерений, выполняются операции, необходимые для получения реологических характеристик.

Программа состоит из следующих составных частей: инициализация; заполнение цилиндрической системы; предварительный сдвиг и темперирование; измерительный цикл, включая обработку полученных данных и выдачу их на печать.

Параметры модели Кэссона τ_k и η_k вычисляются по уравнению

$$\sqrt{D} = \frac{1}{\sqrt{\eta_k}} \left(\sqrt{\tau} - \frac{2\sqrt{\tau_k}}{H\alpha} \right), \quad (7.1)$$

которое в координатах $(1+a)\sqrt{D} - (1+a)\sqrt{\tau}$ представляет собой прямую линию. Для построения этой зависимости измеряются пары чисел

$$x_i = (1+a)\sqrt{\tau_i}, \quad (7.2)$$

$$y_i = (1+a)\sqrt{D_i}, \quad (7.3)$$

в области скорости сдвига $5 \leq D \leq 60 \text{ с}^{-1}$. Измерительный прибор позволяет определить напряжение сдвига τ_i по углу закручивания α , измерительной пружины в соответствии с уравнением $\tau_i = \alpha_i z_1$. При этом константа цилиндрической системы $z_1 = 0,580 \text{ Па/град}$.

Скорость сдвига D_i при заданной частоте вращения h_i получают по формуле

$$D_i = \frac{4\pi h_i}{1-a^2} \quad (7.4)$$

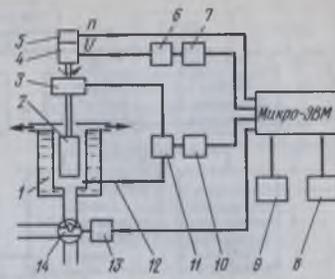


Рис. 7.2. Принципиальная схема квазипрерывного процессного реометра

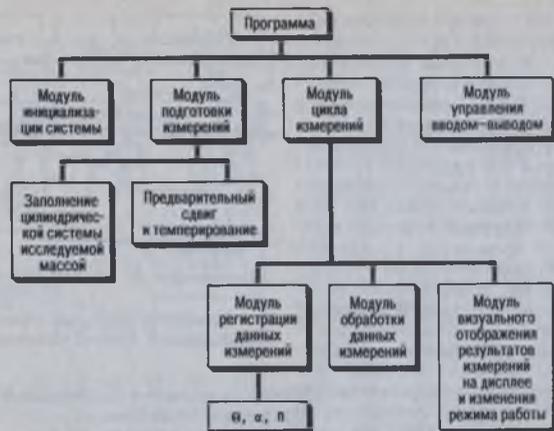


Рис. 7.3. Пакет программ для управления, измерения и обработки полученных данных процессного реометра

или, с учетом $z_2 = \frac{4\mu}{1-a^2}$ по формуле

$$D_i = z_2 n_i.$$

При этом $a = R_i/R_a$, где R_i и R_a — соответственно радиусы внутреннего и наружного цилиндров. Полученные пары значений $[(1+a)\sqrt{\tau}, (1+a)\sqrt{D}]$ образуют прямую (рис. 7.4)

$$y = B_0 + B_1 x. \quad (7.5)$$

Программа «Измерение» как ядро общей программы должна быть рассмотрена более подробно. Структурная схема программы «Измерение» показана на рис. 7.5. С помощью этой программы реализуются следующие функции:

- установка требуемой скорости сдвига посредством подачи соответствующего электрического напряжения на двигатель;
- регистрация данных измерений a , и n_i ;
- преобразование данных измерений сначала в ASCII-коде и затем представление в форме с плавающей запятой;
- статистические расчеты;
- запись пар чисел $[\tau_i, D_i]$ в память;
- обработка данных;
- выдача на печать параметров моделей τ_K и η_K .

Программа «Измерение» состоит из четырех подпрограмм: установка скорости сдвига; получение и первичная обработка данных измерений; определение средних значений измеряемых величин при возрастании и убывании скорости сдвига; вычисление параметров модели Кэссона.

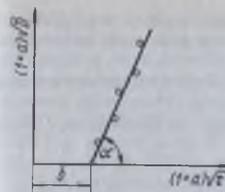


Рис. 7.4. Выравнивание при вычислении параметров модели Кэссона

Согласно программе первичной обработки данных значения a_i и n_i регистрируются несколько раз ($K=8\div 15$) при скорости сдвига, устанавливаемой на предыдущем этапе. Затем они пересчитываются в значения $[\tau_i, D_i]$. Реализация повторения измерений достигается организацией простейшего цикла. После этого получают K значений напряжения сдвига и скорости сдвига. Для напряжения сдвига рассчитывают эмпирическую дисперсию по формуле

$$S^2 = \frac{1}{K-1} \sum_{i=1}^K (\tau_{ii} - \bar{\tau}_i)^2, \quad (7.6)$$

$$\text{где } \bar{\tau}_i = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \tau_{ii}.$$

Эта дисперсия сравнивается с допустимой дисперсией S_{\max}^2 . Если отношение $S^2 \leq S_{\max}^2$ выполняется, то средние значения напряжения сдвига и скорости сдвига считаются готовыми для записи в память и подпрограмма завершается посредством команды return. Если соотношение не выполняется, то i -я анализируемая пара чисел $[\tau_i, D_i]$ отображается, к обработке принимается новая пара значений $[a_i, n_i]$ и определяются новые значения $[\tau_i, D_i]$. Затем цикл вычисления средних значений, определения дисперсии и сравнения выполняется вновь до тех пор, пока условие $S^2 \leq S_{\max}^2$ не будет выполнено. Многократное повторение измерений необходимо для того, чтобы учесть ошибку, которая может возникнуть из-за помех или собственной инерции измерительной системы.



Рис. 7.5. Структурная схема программы «Измерение»

Согласно следующей подпрограмме при возрастающей и убывающей скорости сдвига вычисляются и помещаются в определенную область памяти средние значения (τ, D).

При определении констант τ_K и η_K модели Кэссона выполняются следующие операции:

вычисление и запись в память значений $[x_i, y_i]$ по формулам (7.2) и (7.3);

вычисление и запись в память

$$\sum x_i, \sum y_i, \sum x_i^2, \sum x_i y_i \text{ при } 1 \leq i \leq N;$$

вычисление параметров B_0 и B_1 уравнения регрессии (7.5), причем

$$B_1 = \frac{\sum x_i y_i - (\sum x_i \sum y_i / N)}{\sum x_i^2 - (\sum x_i \sum x_i / N)};$$

$$B_0 = (\sum y_i - B_1 \sum x_i) / N;$$

вычисление и запись в память параметров модели Кэссона:

$$\tau = (B_0 / B_1)^2 / 4; \quad (7.7)$$

$$\eta_K = 1 / B_1^2. \quad (7.8)$$

Когда значения τ_K и η_K займут определенные ячейки памяти, компьютер вызывает подпрограмму, которая обеспечивает вывод данных на дисплей.

7.2. ЛАБОРАТОРНЫЕ АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ РЕОМЕТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Автоматизированные реологические измерения находят применение как в лабораторной практике, так и в производственных условиях. Лабораторные приборы являются универсальными и поэтому обладают различными измерительными системами и обширными прикладными программами. При этом испытуемый образец или порция массы готовится обычным методом, помещается в прибор и удаляется из него после измерения вручную. Производственный прибор создается специально для определенной задачи и диапазона измерений. Автоматическое устройство при этом должно обеспечивать помещение и удаление измеряемого материала, а также управление программой в течение длительного времени. Представление данных предусматривает также учет отклонений и выдачу сигнала для управления процессом.

Ниже приводятся краткие описания некоторых автоматизированных приборов.

Виброреометр ВР-02 предназначен для измерения реологических характеристик вязкоупругих текучих оптически прозрачных систем [3]. Прибор позволяет определять широкий комплекс реооптических характеристик полимерных систем в режиме наложения на непрерывную сдвиговую деформацию с постоянной скоростью гармонических колебаний, а также в более простых видах деформации: непрерывной сдвиговой с постоянной скоростью и периодической сдвиговой по различным законам.

Виброреометр ВР-02 предназначен для анализа оптически прозрачных материалов вязкостью от 10 до 10^6 Па·с с упругими модулями от 10 до 10^7 Па в диапазоне скоростей деформации от $4,6 \times 10^{-3}$ до $12,5 \cdot 10^2$ с $^{-1}$, частот от 10^{-3} до 100 Гц и амплитуд от $6'$ до 3° , температур от -10 до 300° С.

Прибор автоматизирован, что значительно сокращает время для проведения эксперимента и обработки результатов.

Функциональная схема прибора показана на рис. 7.6. Измерительный узел прибора выполнен в виде двух коаксиальных цилиндров 1 и 4, в зазор между которыми помещают исследуемую систему 5. Цилиндр жестко закреплен на корпусе 22 прибора. В цилиндре 4 имеются оптически прозрачные торцы 2 и 6, жестко связанные с выходным валом 7 следящего привода 10, который, в свою очередь, электрически связан с блоком управления 9. Преобразователь 8 углового перемещения цилиндра 4 в электрический сигнал установлен на валу 7 и подключен к блоку 11 регистрации и обработки информации. Измерительный узел помещен в термостат 3, имеющий оптически прозрачные окна 16 и 17.

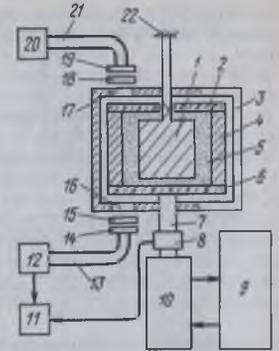


Рис. 7.6. Функциональная схема виброреометра

Поляризационно-оптический блок виброреометра ВР-02 представляет собой широко используемую в методе фотоупругости схему, содержащую источник света 20, поляризатор 19, две пластины 15 и 18 толщиной, кратной нечетному числу четвертей длины излучения источника света 20, установленного в откидных оправках, анализатор 14 и преобразователь 12 излучения в электрический сигнал, также подключенный к блоку 11 регистрации и обработки информации. Использование откидных оправ позволяет проводить измерения в условиях света, плоскополяризованного по кругу. Схема смонтирована на кронштейне, жестко закрепленном на корпусе 22 прибора. В ней использованы световоды 13 и 21 для передачи светового потока от источника света к поляризатору и от анализатора к преобразователю 12 излучения в электрический сигнал.

Блок 11 регистрации и обработки информации представляет собой автоматическую систему АС-1М, разработанную на базе ЭВМ ДЗ-28 и снабженную управляющими и вычислительными программами, позволяющими управлять приемом аналоговой информации, визуализировать исследуемые сигналы, проводить обработку данных и рассчитывать реологические параметры, а также осуществлять вывод результатов обработки информации на печать и графопостроитель.

Блок-схема автоматизированной системы АС-1М обработки информации, полученной поляризационно-оптическим методом, показана на рис. 7.7. Диапазон амплитуд исследуемого сигнала — от -1 В до $+1$ В, диапазон частот исследуемого сигнала — от 10^{-3} до 10^2 Гц.

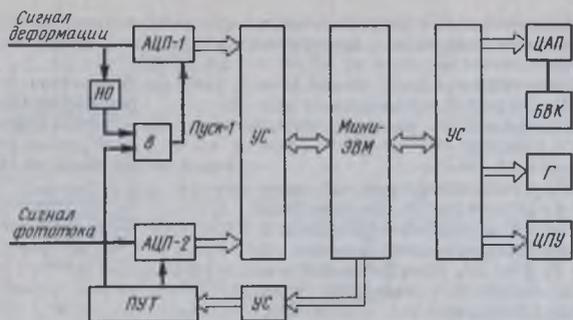


Рис. 7.7. Блок-схема автоматизированной обработки информации, полученной поляризационно-оптическим методом

Прием информации датчика деформации и датчика напряжения в материале (сигнал фототока) осуществляется под управлением программы, записанной в оперативном запоминающем устройстве (ОЗУ) мини-ЭВМ. Программно-управляемый таймер (ПУТ) включает аналого-цифровые преобразователи (АЦП-1 и АЦП-2) соответствующими сигналами («Пуск-1» и «Пуск-2»), которые через устройства сопряжения (УС) передаются на мини-ЭВМ, откуда могут быть выведены на цифроаналоговый преобразователь (ЦАП), блок визуального контроля (БВК), графопостроитель (Г) или цифрпечатающее устройство (ЦПУ). Измеренные мгновенные значения аналоговых сигналов датчиков преобразуются в эквивалентный двоичный код и вводятся в ОЗУ ЭВМ, причем за начало ввода принимается нулевой сигнал датчика деформации. Этот момент фиксируется нуль-органом НО. Измерение заканчивается по прошествии полупериода сигнала деформации.

Ротационный реометр «Висколаб» LG10 (фирма «Физика Местехник», ФРГ) состоит из измерительного устройства и электронной части и укомплектован периферийными устройствами: компьютером IBM и графопостроителем.

Принцип измерений — коаксиально-цилиндрический. Различные скорости сдвига устанавливаются предварительным выбором частоты вращения. Крутящий момент, возникающий при вращении измерительного цилиндра, определяется компенсационным методом.

С помощью прибора можно измерить следующие характеристики: вязкость, структурную вязкость, предел текучести, дилатацию, тиксотропию, реопексию, время релаксации.

Диапазон измерения вязкости $1-3 \cdot 10^6$ МПа·с при 27 фиксированных значениях частоты вращения из диапазона от 0 до 799 мин⁻¹. Температурный диапазон — от -10 до 180 °С.

Реометр «Висколаб» LC10 может быть использован для автоматических измерений с помощью задатчика программ кривых течений «Висколаб» FP10 и компьютерной системы «Висколаб» VC10. Задат-

чик программ кривых течения представляет собой микропроцессорную управляющую систему для предварительного задания программ зависимости частота вращения — время и путь — время.

На рис. 7.8 показаны типичные программы представления результатов измерений. Двухкоординатный самописец РМ8043 служит для показа напряжения сдвига как функции скорости сдвига (кривой течения), а также вязкости как функции времени для жидкостей со свойствами, зависящими от времени, и вязкости как функции температуры при термометрических исследованиях.

Система «Хаак Ротовиско» РВ20 (фирма «Хаак Местехник», ФРГ) имеет модульную структуру и состоит из реометра «Ротовиско» РВ20, программирующего устройства РГ242 и двухкоординатного самописца. Она может быть укомплектована реоконтроллером RC20 и компьютером IBM. В качестве чувствительных элементов применяются различные измерительные системы в зависимости от конкретных задач исследования.

Универсальная измерительная система представляет собой коаксиальную цилиндрическую систему, позволяющую определять вязкость в диапазоне от 2 до 10^6 МПа·с. Для мелких проб материала (до 0,5 см³) предназначена измерительная система шар — плоскость. Максимальная скорость сдвига при измерениях достигает $4 \cdot 10^4$ с⁻¹.

Для вязкоупругих материалов применяется колебательная система с частотой от 0,05 до 5 Гц и скоростью сдвига от 0,1 до 10^3 с⁻¹.

Обработка аналогового измерительного сигнала достигается его преобразованием в цифровой сигнал. Компьютер сравнивает результаты, полученные с помощью регрессионного анализа, с моделями Ньютона, Оствальда, Кэссона, Штайгера и выбирает наиболее подходящую кривую для графического представления с помощью графопостроителя.

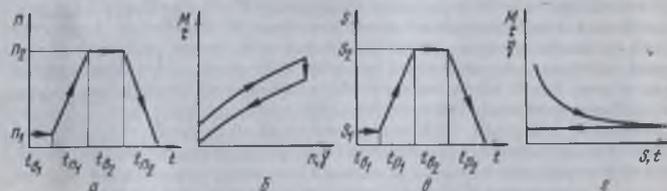


Рис. 7.8. Программы управления экспериментом и представление результатов измерений:

а — программа управления частотой вращения ротора вискозиметра. Регулируемые параметры: n_1 , n_2 (соответственно минимальная и максимальная частоты вращения мин⁻¹); t_{01} , t_{02} (время выстоя, мин); t_{03} , t_{04} (продолжительность изменения параметра, мин);
б — диаграмма, полученная с помощью двухкоординатного самописца. Регистрируемые величины: n (частота вращения, мин⁻¹); $\dot{\gamma}$ (скорость сдвига, с⁻¹); M (вращающий момент, Н·м); τ (напряжение сдвига, Па);
в — программа управления временем регистрации параметров. Регулируемые параметры: n , t_{01} , t_{02} , t_{03} , t_{04} (время регистрации, мин); S (путь регистрации, соответствующий длине ленты самописца);
г — представление результатов с помощью двухкоординатного самописца при нулевом времени выстоя. Регистрируемые величины: M , τ , η (вязкость, Па·с)

При изучении вязкоупругих материалов с помощью колебательной измерительной системы определяются значения η' , G' и G'' как функции угловой скорости.

Реометрические системы фирмы «Контравес» AG (Швейцария) — «Лоу Шер» 30, «Реомат» 115, «Реомат» 135, «Реомат» 145, «Реомат» 30 и др. предназначены для изучения вязкоупругих свойств материалов в различных диапазонах сдвиговых деформаций, имеют модульную структуру и содержат следующие элементы: задатчик программы «Реоскан» 30, графопостроитель для x - y - и x - t -реограмм, реоанализатор «Контравес».

Задатчик программ служит для предварительного программирования при изменении следующих параметров:

скорости сдвига — программа зависимости частоты вращения от времени для получения кривых течения, а также определения параметров тиксотропии и реопексии; программа ступенчатого измерения частоты вращения для определения сдвиговой вязкости и вязкостных свойств, зависящих от продолжительности сдвига;

времени — зависимость частоты вращения от времени при постоянной скорости сдвига для получения сведений о разрушении структуры как функции времени и скорости сдвига;

температуры — программа зависимости температуры от времени при постоянной скорости сдвига; определение вязкостно-температурных свойств; программа ступенчатого изменения температуры для автоматического получения кривых течения при различных температурах;

параметров и условий процесса — изменяющееся нагружение продукта; оптимизация критериев переработки; определение свойств продукта; время хранения; время варки; время размягчения.

Задатчик программ имеет 200 вариантов для любой программы зависимости частоты вращения от температуры с максимальной продолжительностью 10 ч на одну программу. Путем прямого обращения к той или иной программе возможно простое изменение параметров.

Запоминающее устройство задатчика программы содержит 9 программ, которые сохраняются в течение 100 ч при отсутствии напряжения в сети. Все 9 программ могут быть объединены во внешний программный модуль. С помощью этого модуля можно образовать обширную библиотеку программ. При изменении сначала производится вызов желаемой программы и ее отладка. Затем задатчик программ автоматически управляет частотой вращения реометра, термостатом или регулятором температуры и пером двухкоординатного самописца.

Реоанализатор с настольной вычислительной машиной и графопостроителем расширяет функции и превращает его в компьютеризованный измерительный прибор с автоматической обработкой данных по различным программам.

«Реомат» 135 является модульной реометрической системой для определения вязкоупругих свойств жидкостей при разграничении деформации исследуемого продукта на вязкую и упругую. Обладает широким охватом определенных величин: $\eta = 1 \div 10^9$ МПа·с, $D = 10^{-1} \div 80\,000$ с $^{-1}$. Встроенный микродатчик непосредственно дает величины τ и $\dot{\gamma}$ и возможность автоматического проведения опыта. Его можно подключать к периферийным устройствам. На мониторе получают цифровые данные для $\dot{\gamma}$, τ , M , η .

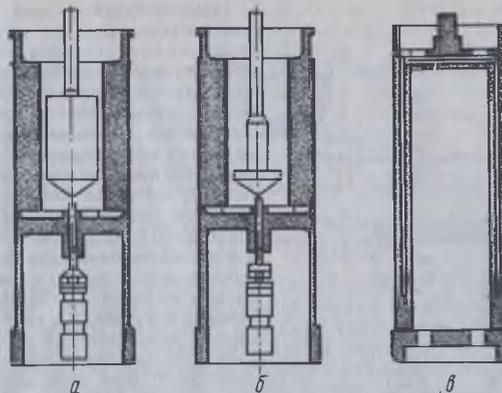


Рис. 7.9. Комплект измерительных систем прибора «Реомат» 135:

a — датчик температуры, встроенный в неподвижный цилиндр; *b* — измерительная система для высоких скоростей сдвига; *v* — система для маловязких жидкостей (вязкостью менее 1 МПа·с)

Вся документация измерения выводится на печать. На графопостроителе получают реограмму продуктов, кривые вязкости, кривые релаксации. В приборе имеется комплект разных измерительных систем, некоторые из которых показаны на рис. 7.9.

«Реомат» 145 представляет собой компьютерно-реометрическую систему исследования кривой текучести, кривой вязкости, вязкости в зависимости от времени, структурообразования, релаксации и тиксотропии. Прибор имеет буквенно-цифровую клавиатуру и специальные клавиши для задания опытных параметров.

Полученные результаты можно представить разными способами: изображением на экране кривых по времени замера; графическим представлением и вычерчиванием полученных кривых; запоминанием и каталогизированием данных на дискетах; анализом результатов регрессионной модели в виде полинома от 1-й до 5-й степени.

Технические данные: частота вращения 50—1000 мин $^{-1}$, крутящий момент 0—7,5 Н·м; область напряжения 10—483 Па; область вязкости 0,076—60 Па·с; емкость встроенных Ni—Cd аккумуляторов 1 ч при полной нагрузке. При работе от электрической сети аккумуляторы заряжаются.

Специальная реометрическая система «Лоу Шер» 30 предназначена для определения вязкоупругих свойств жидкостей при низких скоростных градиентах и минимальных напряжениях сдвига. Это позволяет исследовать реологические свойства продуктов без разрушения их структуры, и без изменений структуры высокомолекулярных растворов. Таким образом, она может быть использована для исследования белковых и пектиновых растворов, эмульсий, густых суспензий и др.

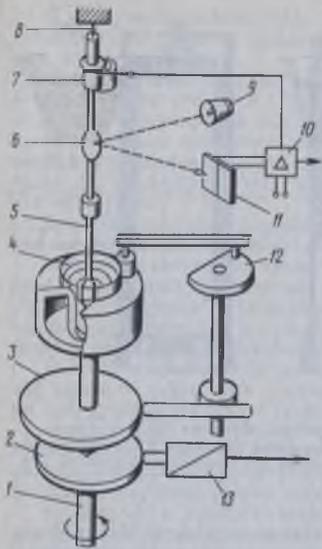


Рис. 7.10. Принципиальная схема реометрической системы «Лой Шер» 30

Принципиальная схема устройства системы дана на рис. 7.10. Крутящий момент приводит к минимальному отклонению измерительного вала 5. Луч от источника света 9, отраженный зеркалом 6, принимается фотоэлементом 11, усиливается устройством 10 и передается бobbине 7 компенсационной системы. Материал загружается в стакан 4. Колебания создаются с помощью осциллирующего вала с помощью эксцентрических дисков 2 и 3, находящихся на валу 1 с датчиком угловой скорости 13. Замеряемые значения получаются в виде эллипсов при использовании координат $D-M$ или синусоиды при координатах $D-t$. При этом возможны запись релаксационных кривых и определение времени релаксации. Пульт управления включает цифровой индикатор значений определяемых параметров, переключатель 30 скоростей вращения. Осциллирующее устройство отклоняется на 7,5; 15 и 30°.

Прибор укомплектован универсальным программирующим устройством. При этом возможен подбор разных программ в зави-

симости от вида исследуемого материала. С помощью дополнительного прибора (реоанализатора) система превращается в управляемую измерительную и вычислительную систему с автоматической оценкой данных. Полученные результаты выдаются на печатающее устройство (принтер) или в виде графиков сразу записываются на магнитной ленте. При этом исключены ошибки при замере, отсчете и обработке результатов.

Кроме стандартных коаксиальных цилиндров в систему включены специальные измерительные тела (рис. 7.11) для отдельных случаев: цилиндр (рис. 7.11, а) диаметром 11 мм, высотой 18 мм, диаметром стакана 12 мм, для пробы объемом 0,5 см³; цилиндр (рис. 7.11, б) диаметром 3,5 мм, высотой 3,5 мм, диаметром стакана 4 мм, для пробы объемом 0,07 см³.

Технические данные системы: диапазон вязкости $1,5 \cdot 10^{-3} - 10^6$ мПа·с; модуль упругости $7 \cdot 10^{-4} - 4 \cdot 10^4$ мПа; напряжение сдвига $2 \cdot 10^{-5} - 0,1$ Па; скорость сдвига $3,5 \cdot 10^{-3} - 250$ с⁻¹; крутящий момент $9,5 \cdot 10^{-10} - 6 \cdot 10^{-6}$ Нм; частота $0,2 \cdot 10^{-3} - 1,63$ Гц.

Реометрическая система «Болин» (фирма «Болин Реологи», «Швеция») выпускается в трех модификациях: V-модель, OR-модель и VOR-модель. Первая предназначена для вискозиметрии в шести диапазонах

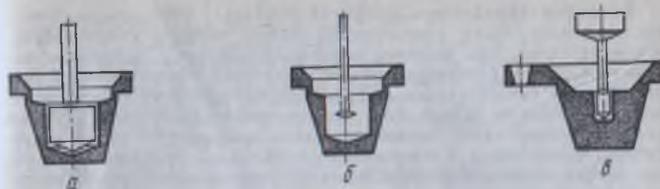


Рис. 7.11. Специальные измерительные узлы реометрической системы «Лой Шер» 30:

а — коаксиальная цилиндрическая система для большого объема пробы; б — измерительная система для высоковязких материалов; в — коаксиальная измерительная система для малого объема пробы

частоты вращения; вторая — для колебательных и релаксационных измерений с малыми амплитудами колебаний и изменением частоты в пределах четырех десятичных порядков. Реолометр снабжен устройством для контроля начальной скорости сдвига; третья модель является комбинацией предыдущих моделей в одном приборе.

Реометрическая система «Болин» состоит из реометра, контролирующего устройства, реометрического контроллера и системного интерфейса, компьютера с четырехцветным цифровым графопостроителем и цветным дисплеем.

Измерительная система выполнена съемной в трех вариантах: шар — плоскость и плоскость — плоскость; коаксиальная цилиндрическая; цилиндрическая с двойным зазором. Измерительная система может быть дополнительно снабжена высокотемпературным блоком, блоком с жидким азотом и блоком высокого давления.

Техническая характеристика: частота вращения $0,0013 - 1300$ мин⁻¹; скорость сдвига $0,001 - 10^4$ с⁻¹; напряжение сдвига $10^{-3} - 10^5$ Па; вязкость $10^{-4} - 10^8$ Па·с; сдвиговая деформация $10^{-3} - 1,0$; частота $10^{-3} - 20$ Гц; температура в стандартном исполнении $5 - 90$ °С, в специальном исполнении $(-150) - 350$ °С.

VOR-реометр может быть подключен к IBM PC, IBM XT и IBM AT, а также к любым подобным компьютерам. Программное обеспечение VOR-модели включает подбор модели и выполнение всех остальных измерительных программ. Выдача результатов измерений производится в буквенно-цифровой форме или графически в виде следующих диаграмм: вязкость как функция скорости сдвига (функция вязкости); эффективная вязкость как функция температуры; модуль накопления G' и динамическая вязкость η' , а также тангенс угла потерь $\text{tg} \delta$ как функции температуры при постоянной частоте; динамическая вязкость η' и модуль накопления G' как функции частоты колебаний при постоянной температуре; модуль потерь G'' и тангенс угла потерь $\text{tg} \delta$ как функции температуры при ее уменьшении, а также при постоянной частоте и деформации; модуль сдвига G' и модуль потерь G'' , а также фазовый угол δ как функции времени при коагуляции дисперсной системы; релаксационные свойства как функция времени желеобразования (релаксационный спектр); модель накопления G' и тангенс угла потерь $\text{tg} \delta$ как функции времени для определения быстрого тиксотропного образования структуры.

Вискотрон «Брабандер» (фирма «Брабандер», ФРГ) предназначен для измерения таких реологических свойств жидких и пастообразных материалов, как вязкость, структурная вязкость, предельное напряжение сдвига, сдвиговая упругость, дилатация, тиксотропия, реопексия, а также температурные и компрессионные зависимости этих материалов. Вискотрон может быть укомплектован задатчиком программ для программирования изменения частоты вращения, а также интерфейсом, компьютером и печатающим устройством с графопостроителем для автоматизированной обработки и графического представления результатов измерений.

Измерительный узел представляет собой коаксиальную цилиндрическую систему или систему типа конус — плоскость в восьми различных сочетаниях. Выбор измерительной системы позволяет определять вязкость в пределах от 1 до $7 \cdot 10^8$ мПа·с, скорость сдвига — от 0,07 до $2 \cdot 10^4$ с⁻¹, напряжение сдвига — от 0,5 до $7 \cdot 10^4$ Па. Температурный диапазон вискотрона — от 0 до 90 °С и в специальном исполнении — от -30 до 300 °С.

Частота вращения изменяется ступенчато (12 ступеней) от 0,05 до 1024 мин⁻¹ или плавно от 0 до 1000 мин⁻¹ с помощью задатчика программ.

Во МТИППе усовершенствованы конструкция и характеристики капиллярного вискозиметра АКВ-5 [1]: для измерения перемещения подвижного штока и установления его зависимости от длительности t использовали индикатор линейных перемещений фотоэлектрического типа (рис. 7.12), который преобразует величину хода поршня в последовательность электрических импульсов; для непрерывного контроля эксперимента составлен алгоритм и написана программа автоматизированной обработки показаний на базе микро-ЭВМ «Электроника-60».

Расчет параметров кривой течения производится в два этапа: расчет консистентных переменных и расчет переменных (касательных напряжений и градиента скорости сдвига) по уравнениям течения. При ходе поршня порядка 90 мм можно получить около 30 экспериментальных точек.

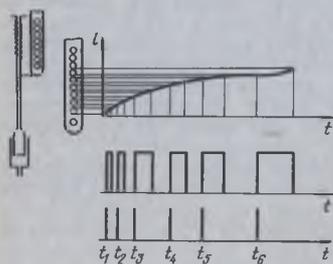


Рис. 7.12. Преобразование зависимости $l(t)$ во временно-импульсную последовательность l_i

Устройство контроля реологических характеристик мясных продуктов разработано в МТИММПе. Работа пенетрометра-динамометра типа ПД основана на принципе внедрения игольчатого индентора в продукт с постоянной скоростью до достижения фиксированного усилия. Пенетрометр-динамометр состоит из следующих основных элементов: корпуса, электродвигателя, датчика фиксированного усилия и индикатора времени внедрения. Измерения производятся следующим образом. Контактная площадка прикладывается к исследуемому образцу, включается

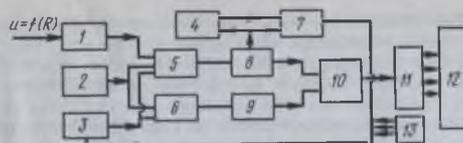


Рис. 7.13. Блок-схема электронной системы реометра ПД

электродвигатель, и индентор приводится в движение с постоянной скоростью. При касании индентором поверхности продукта происходит замыкание электрической цепи, контактами которой являются игла индентора и корпус прибора. С этого момента начинается отсчет времени внедрения на цифровом индикаторе с точностью до 0,01 с. При погружении индентора в продукт появляются силы сопротивления, препятствующие внедрению. По достижении заданного усилия происходит регистрация показаний цифрового индикатора времени.

Конструктивное решение устройства ПД позволяет производить измерения в нескольких диапазонах задаваемого усилия, что дает возможность оценивать структурно-механические характеристики продуктов, существенно различающихся по консистенции.

Устройство работает следующим образом (рис. 7.13). В момент включения информация с ползункового резистора, жестко связанного с механизмом линейного перемещения индентора, поступает на аналого-цифровой преобразователь, который, воспринимая входные сигналы в аналоговой форме, преобразует их в соответствующие цифровые сигналы. Частота опорных импульсов преобразователя равна 1 МГц. В начальный момент преобразования сопротивления резистора в число импульсов с выхода преобразователя 1 (АЦП) на блок питания 5 поступает сигнал, равный логической единице, разрешающей прохождение импульсов с генератора 2 на сумматор 8, информация на котором соответствует величине перемещения индентора. Сопротивление резистора преобразуется в длительность импульса и в дальнейшем в цифровой код с помощью устройств 2, 5, 8. Параллельно осуществляется отсчет внедрения блоками 3, 2, 6, 9. В процессе измерения перемещения информация пересылается в оперативное запоминающее устройство 4 и посредством блока 7 обрабатывается. Мультиплексор 10 позволяет отображать на дисплее 12 (после дешифратора 11) в цифровой форме информацию о времени и глубине внедрения индентора.

Анализатор текстуры «Стевенс» LFRA (фирма «С. Стевенс», Великобритания). Анализатор текстуры является многоцелевым автоматизированным прибором, предназначенным для измерения прочности гелей и анализа структуры паст, теста, желеобразующих веществ и высоковязких материалов.

Принцип измерения заключается во внедрении зонда с заданной скоростью и на заданную глубину. Возникающее при этом усилие измеряется и показывается в цифровой форме. Диаграмма сила — перемещение может быть записана с помощью однокоординатного само-

писца. Графическое представление результатов позволяет сделать заключение о структуре измеряемого материала.

Пределы измерений силы от 0,05 до 10 Н, а также от 0,005 до 1 Н. Скорость пенетрации 0,2; 0,5; 1,0; 2,0 мм/с, глубина пенетрации 1÷50 мм.

Автоматическое измерение проводится по трем возможным программам:

программа «Normal»: зонд движется вниз и плавно касается поверхности материала. Начинается измерение. По достижении предварительно выбранного перемещения зонд останавливается. Указатель прибора блокируется, полученный результат регистрируется, и зонд возвращается в первоначальное положение;

программа «Halt»: зонд останавливается по достижении определенного заранее перемещения в конечном положении. Указатель прибора не блокируется, а показывает и записывает усилие, изменяющееся во времени;

программа «Zyklisch»: зонд движется циклически согласно заданным значениям. Материал подвергается действию постоянно изменяющегося напряжения.

В качестве зондов применяются цилиндрические штифты различного диаметра, конусы с различными углами, шары с различными диаметрами, иглы, цилиндрические штампы для компрессионных измерений.

Для исследования твердых пищевых продуктов с вязкоупругими свойствами используются приборы, которые реализуют сжимающее, растягивающее или колебательное нагружение. Автоматизация этих приборов достигается главным образом сочетанием их с компьютерами.

Вискоэластограф «Шопин» (фирма «Триплетте и Ренойде», Франция) проводит компрессионные измерения при нагрузке и разгрузке на образце твердого пищевого материала цилиндрической формы. При этом измеряется кинетика деформации при постоянной или возрастающей сжимающей нагрузке, а также упругое последствие (ретардация) при разгрузке.

Вискоэластограф может быть подключен к персональному компьютеру IBM или другому аналогичному. Компьютер обеспечивает измерение по предварительно выбранной программе и обработку полученных данных. Результаты измерений выдаются в графическом или буквенно-цифровом виде на дисплей, а также могут быть выданы с печатающего устройства в виде таблиц.

Универсальная испытательная машина «Инстрон» для определения реологических свойств пищевых продуктов имеет различные модели и устройства. Система для нагрузки представляет автоматически меняющиеся грузы в диапазоне от 0 до 500 г. Стержень, который создает деформацию, движется с постоянной скоростью от 50 до 500 мм/мин. Рабочий орган, например для измерения твердости фруктов и плодов, представляет цилиндр диаметром 8 мм. Используются инденторы разных форм и разных размеров. При постоянной скорости деформации на пищевом приборе получается диаграмма сила — деформация. Можно также определять силу, необходимую для резки, твердость различных овощей и фруктов, прочность твердых материалов, используя различные по форме и размерам инденторы.

«Инстрон» предназначен для проверки механических свойств пластмасс, тканей, резины, бумаги. Его применяют также для определения структуры и консистенции яблок, моркови, картофеля, колбасы, гороха и др. Прибор работает на сжатие, растяжение, сдвиг, изгиб, им можно измерять максимальное напряжение сдвига, деформацию при разрушении, можно снять кривые деформация — сила, определить релаксацию напряжений, чувствительность продукта к скорости деформации, подсчитать энергию деформации и релаксации.

Для определения и записи нагрузки на образец используют датчики давления, а также электронный чувствительный прибор и фальговые тензометрические датчики. Сигнал с последних передается на высокоскоростной самопишущий прибор, обеспечивающий регистрацию различных показателей при всех условиях и диапазонах нагрузки с точностью около 0,5%. Подвижная траверса машины приводится в движение двумя винтами и свободным от люфта устройством. Скорость измерения реологических свойств регулируется системой синхронного привода, которая независимо от нагрузки обеспечивает постоянную скорость деформации образца. Большая точность показаний машины позволяет применять ее для контроля некоторых качественных характеристик мяса и мясопродуктов.

Виброанализатор для сохраняющих форму пищевых продуктов, разработанный в Дрезденском техническом университете на отделении

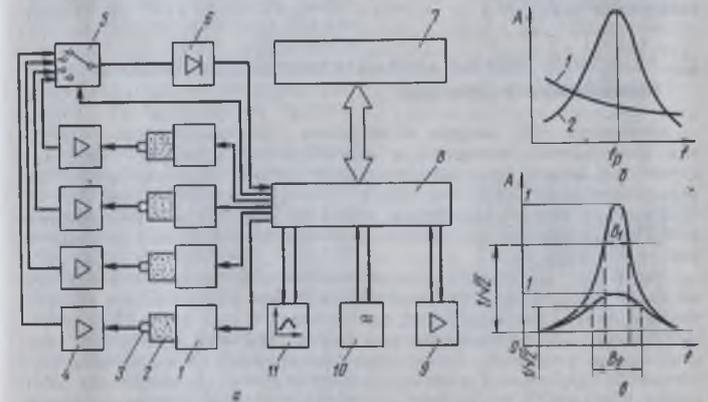


Рис. 7.14. Виброанализатор для сохраняющих форму продуктов [4]: а — блок-схема прибора (1 — электродинамический электровозбудитель; 2 — исследуемый образец; 3 — датчик виброускорения; 4 — усилитель; 5 — переключатель; 6 — выпрямитель; 7 — микро-ЭВМ; 8 — системный интерфейс; 9 — усилитель мощности; 10 — генератор синусоидальных сигналов; 11 — двухкоординатный самописец); б — амплитудно-частотные характеристики (1 — вибровозбудителя; 2 — исследуемого образца); в — схема, иллюстрирующая методику определения ширины полосы резонанса для различных амплитудно-частотных характеристик

пищевой технологии, служит для неразрушающего анализа сохраняющих форму вязкоупругих пищевых продуктов, таких, как хлебный мякиш, сыр, колбаса и т. д. Принцип измерения основан на нагружении образца механическими колебаниями и на измерении ответных колебаний.

Прибор состоит из генератора колебаний, усилителя мощности, электродинамического вибровозбудителя, датчика ускорения для измерения ответных колебаний, интегрального усилителя и системного интерфейса с компьютером и двухкоординатным самописцем. Перед измерением создаются механические колебания с увеличивающейся частотой. Ответные колебания при резонансной частоте достигают максимальной амплитуды. Максимальная амплитуда и ширина полосы резонанса являются характерными реологическими константами, из которых могут быть определены упругость и вязкость тела. Измерения проводятся автоматически с помощью микрокомпьютера. Результаты измерений показываются на двухкоординатном самописце и на дисплее.

Данный способ измерений наиболее подходит для длительных измерений в автоматических устройствах, предназначенных для регистрации во времени таких изменений в продуктах, как старение, созревание, структурообразование.

На рис. 7.14 показана структурная схема вибронализатора, а также амплитудно-частотная характеристика, которая лежит в основе обработки данных.

7.3. ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ПРИБОРЫ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

«Ковимат» 105 (фирма «Контравес», Швейцария) предназначен для непрерывных измерений и регулирования вязкости продукта в потоке. Он может быть проточным или погружаться в продукт. Прибор, работающий по ротационному принципу при постоянной или изменяющейся частоте вращения, измеряет момент на измерительном элементе цилиндрической формы в измерительной камере при температуре процесса.

«Ковимат» 105 снабжен дистанционным управлением частотой вращения и может определять широкий диапазон реологических характеристик. Измерительный элемент выполняется в трех вариантах: открытый элемент для высокоскоростных опытов; основное исполнение, обеспечивающее сохранение соотношений ламинарного течения, измерения возможны при высоких частотах вращения при различных видах сдвигового нагружения; исполнение, основанное на принципе двух зазоров и предназначенное для материалов с малой вязкостью.

Частота вращения имеет следующие значения: 10, 20, 45, 95, 200 мин⁻¹, диапазон измеряемой вязкости от 1 до 4,9·10⁶ мПа·с. Результаты измерений показываются на управляющем приборе, а их регистрация проводится ленточным самописцем.

На рис. 7.15 показан «Ковимат» 105 в разрезе.

Электрический цифровой ротационный вискозиметр М. М. Благовещенской предназначен для контроля процессов брожения теста по

реологическим характеристикам, которые связаны со структурой и отражают изменения в молекулярном строении материала.

Техническая характеристика вискозиметра: предел измерения вязкости 10⁹ Па·с, относительная погрешность измерения вязкости ±2,5 %, порог чувствительности 0,05 %, температура окружающего воздуха 5—50 °С

Принцип действия вискозиметра основан на измерении величины момента сопротивления, создаваемого исследуемой массой при вращении в ней тела определенной формы. Конструкция прибора позволяет менять тела вращения в зависимости от диапазона изменения вязкости пищевой массы и условий работы.

Реометр хорошо зарекомендовал себя при контроле процессов брожения полуфабрикатов хлебопекарной промышленности, так как обладает высокой надежностью в работе; он может явиться основой для создания системы управления технологическими процессами.

Цифровой капиллярный вискозиметр М. М. Благовещенской служит для определения реологических характеристик. Принцип его действия основан на измерении времени истечения фиксированного объема исследуемой массы через калиброванное отверстие (рис. 7.16).

Вискозиметр работает следующим образом. При включении прибора в работу в измерительную ячейку 1 с терперирующей рубашкой начинает поступать исследуемая масса. При достижении массой определенного уровня L₁, измеряемого блоком 2, подача ее прекращается, одновременно с этим на схему прибора подается питание. При этом включается генератор импульсов 3, который начинает

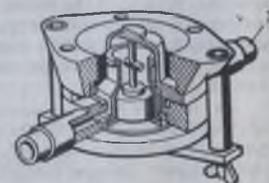
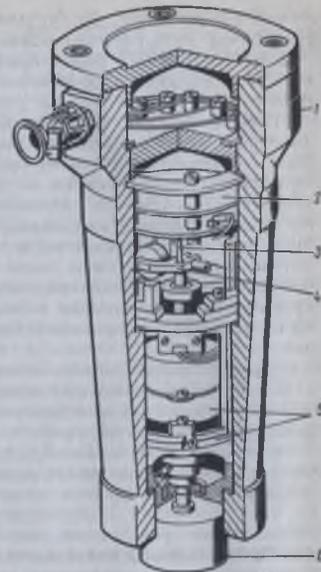


Рис. 7.15. «Ковимат» 105 (фирма «Контравес»):

1 — измерительная головка; 2 — блоки управления и печати; 3 — торсион для определения крутящего момента; 4 — индуктивный датчик перемещения; 5 — вращающийся блок с синхронным двигателем; 6 — магнитный передатчик крутящего момента; 7 — проточная измерительная система

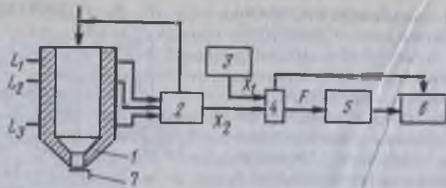


Рис. 7.16. Структурная схема цифрового капиллярного вискозиметра [2]

генерировать прямоугольные импульсы заданной длительности. Так как уровень исследуемой массы находится выше первичного преобразователя L_2 , то сигнал x_2 на выходе блока измерения 2 отсутствует, а следовательно, и сигнал F на выходе счетчика импульсов 5 также отсутствует, т. е. счетчик импульсов находится в ждущем режиме.

По истечении некоторого времени после прекращения подачи в измерительную ячейку исследуемой массы, определяемого настройкой реле времени, которое находится в измерительном блоке, заслонка 7 на выходе измерительной ячейки 1 автоматически открывается и исследуемая масса начинает вытекать через калиброванное отверстие.

Как только ее уровень станет ниже первичного преобразователя L_2 , блок измерения 2 формирует единичный сигнал на выходе. Этот сигнал станет равен нулю только после того, как уровень исследуемой массы в измерительной ячейке станет меньше L_3 . В течение времени, пока масса вытекает из измерительной ячейки от уровня L_2 до уровня L_3 , сигнал на выходе блока измерения равен единице и соответственно элемент 4 (селектор импульсов) открыт. При этом сигналы от генератора импульсов 3 поступают на счетчик импульсов 5 в течение времени, пока уровень исследуемой массы не станет меньше L_3 . Результат измерений высвечивается цифровым индикатором 6. Далее показания прибора обнуляются, и цикл измерения вязкости повторяется.

Для измерения уровня в качестве чувствительного элемента используется фотодиод, периодически принимающий импульсы, излучаемые светодиодом, если уровень исследуемой массы находится ниже данного отметчика. Если же уровень продукта равен или выше отметчика, то выходной сигнал блока измерения равен нулю.

Схема состоит из двух основных частей: генератора импульсов, в котором вырабатываются импульсы, излучаемые светодиодом, и приемника импульсов, в котором излучаемые импульсы принимаются фотодиодом.

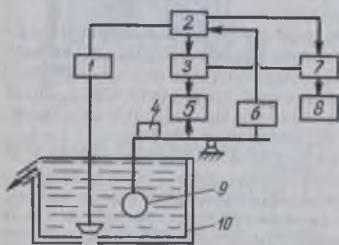


Рис. 7.17. Обобщенная функциональная схема колебательного вискозиметра [2]

Цифровой колебательный вискозиметр М. М. Благовещенской позволяет автоматически определять вязкость пищевой массы. В состав вискозиметра (рис. 7.17) входят измерительная ячейка с нагревающей рубашкой 10, чувствительный элемент 9, устройство перемещения этого элемента, состоящее из груза 4, механизма возврата чувствительного элемента в исходное положение 5 и отметчика конца этого движения 6. Измерительно-управляющая система содержит блоки управления 2 и задержки 3, измерительно-вычислительный блок 7 и регистрирующее устройство 8. Для подвода исследуемой массы предназначен исполнительный механизм перемещения заслонки 1, связанный с блоком управления 2. Управляющий и измерительные блоки имеют взаимные связи, что дает возможность регулировать режим колебаний чувствительного элемента в процессе измерений. Измерительно-вычислительный блок 7 предназначен для преобразования времени перемещения чувствительного элемента в величину, соответствующую вязкости исследуемой массы. По полученным данным судят о реологических свойствах исследуемой среды.

На основе обобщенной функциональной схемы работы вискозиметра были разработаны автоматические промышленные вискозиметры, построенные на серийных элементах пневмоавтоматики (автоматический пневматический вискозиметр) и на серийных элементах электроники и электроавтоматики (электрический цифровой колебательный вискозиметр), принцип действия которых основан на измерении с большой степенью точности времени движения чувствительного элемента в исследуемой среде на заданном участке пути.

Градуировочные характеристики большинства вискозиметров обладают значительной нелинейностью. Применение различного рода коррекций нелинейности путем изменения структуры вискозиметра сопряжено с большими сложностями конструкторско-технологического характера. Поэтому линеаризацию градуировочных характеристик вискозиметров целесообразно проводить с помощью вычислительной техники.

Автоматический контроль вязкости в технологических линиях пищевых производств необходимо производить с погрешностью не более 2,5—3,0%. При этом погрешность вычислительного устройства должна быть не менее чем на порядок ниже погрешности всего вискозиметра.

Следует учитывать, что вязкость приготавливаемых пищевых продуктов, как правило, резко не меняется. На вязкость оказывают влияние изменение состава приготавливаемой массы или температуры и многие другие факторы, однако при этом вязкость меняется с достаточно большой постоянной времени. Следовательно, наиболее рациональным режимом работы устройства является следящий.

Встраивание микропроцессоров в контрольно-измерительную аппаратуру позволяет в несколько раз повысить точность, скорость и надежность измерений, снизить стоимость приборов, осуществить их самодиагностику, автоматизацию измерений, их обработку и передачу данных, значительно расширяет функциональные возможности прибора.

Объединение микропроцессоров с первичными измерительными преобразователями позволяет решать проблему индивидуальной настройки и компенсации погрешностей первичного преобразователя. Решение дан-

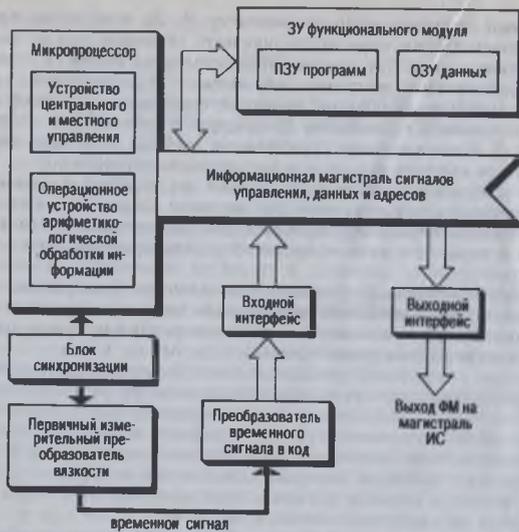


Рис. 7.18. Общая логическая структура ФМ

ной задачи показано М. М. Благовещенской на примере колебательного вискозиметра маятникового типа с временным выходным параметром.

Для реализации вычислительных операций в вискозиметре используется функциональный модуль (ФМ), основное назначение которого — прием с выхода автоматического первичного измерительного преобразователя вязкости временного сигнала, нелинейного преобразования его в код, выполнения вычислительных операций и выдачи результатов на магистраль измерительной системы (ИС).

ФМ включает интерфейсы, преобразователь временного сигнала в код, постоянное (ПЗУ) и оперативное (ОЗУ) запоминающие устройства, блок синхронизации. Взаимодействие перечисленных аппаратных средств осуществляется по информационной магистрали под управлением специальной программы, хранящейся в ПЗУ (рис. 7.18).

В измерительной технике в зависимости от ее назначения находят применение самые разные микропроцессоры. В первом приближении можно выделить две группы измерительных устройств, каждой из которых соответствует определенный класс микропроцессоров: промышленное оборудование для контроля и управления процессами; аппаратура для лабораторного анализа и исследований.

Решение задачи вычислительной обработки измерительной информации, поступающей от колебательного первичного измерительного пре-

образователя вязкости, осуществляется следующим образом: при появлении очередного сигнала от первичного измерительного преобразователя вязкости, преобразуемого ПВС в существующий код, ФМ прерывает выполняемую программу обработки и автоматически переключается на выполнение подпрограммы. После выполнения этой подпрограммы выполнение прерванной программы возобновляется с того места, где она была прервана. Полученный результат в цифровом виде в единицах вязкости фиксируется на цифровом индикаторе.

Кроме цифрового индикатора, к прибору можно подключить также стандартные устройства вывода: дисплей, графопостроитель, электронную пишущую машинку, позволяющие эффективно вести контроль протекания технологического процесса и своевременно его корректировать.

Подобным же образом можно организовать непрерывный съем и представление измерительной информации непосредственно в измеряемых единицах для вискозиметров других типов, пенетрометров, приборов для определения углов естественного откоса и т. д.

Глава 3

1. Байгильдин Р. Х. Совершенствование процесса механической обработки творога жирного и творожно-сырковых продуктов по структурно-механическим характеристикам. — Автореф. канд. дис. — М.: МТИМП. — 1983. — 24 с.
2. Белкин И. М., Виноградов Г. В., Леонов А. И. Ротационные приборы. — М.: Машиностроение. — 1968. — 272 с.
3. Гольцын А. А. Определение величины скорости сдвига на ротационных приборах по различным формулам. — Мясная индустрия СССР. — 1974. — № 7. — С. 39—42.
4. Горбань М. В., Груздев И. Э., Корнильев И. Б. Определение вязостных характеристик колбасного фарша. — Мясная индустрия СССР. — 1978. — № 6. — С. 38—40.
5. Горбатов А. В. Реология мясных и молочных продуктов. — М.: Пищевая промышленность. — 1979. — 384 с.
6. Горбатов А. В., Шукин В. М. К теории ротационной вискозиметрии. — Известия вузов СССР. Пищевая технология. — 1980. — № 6. — С. 108—113.
7. Исследование реологических свойств яичного меланжа/Г. А. Полякова, А. В. Гаврилин, Н. И. Булгаков, Ю. В. Космодемьянский. — Мясная индустрия СССР. — 1979. — № 11. — С. 32—34.
8. Крутоголов В. Д., Кулаков М. И. Ротационные вискозиметры. — М.: Машиностроение. — 1984. — 112 с.
9. Крючков И. В. Основные закономерности непрерывного извлечения плодовых соков и разработка оборудования для поточных линий. — Автореф. докт. дис. — М.: МТИПП. — 1978. — 37 с.
10. Маслов А. М. Аппараты для термообработки высоковязких жидкостей. — Л.: Машиностроение. — 1980. — 208 с.
11. Маслова Г. В., Маслов А. М. Температурно-инвариантная характеристика вязкости рыбных фаршей. — Известия вузов. Пищевая технология. — 1973. — № 5. — С. 61—63.
12. Мачихин Ю. А., Мачихин С. А. Инженерная реология пищевых материалов. — М.: Легкая и пищевая промышленность. — 1981. — 216 с.
13. Николаев Л. К. Обобщенные реологические характеристики плавящихся сыров. — Известия вузов. Пищевая технология. — 1978. — № 6. — С. 97—106.
14. Проселков В. Г., Самусенко Ю. В. О практическом использовании ротационной вискозиметрии при исследовании реологических характеристик рыбных фаршей. — М.: ЦНИИТЭИРХ. — 1983. — 5 с.
15. Савченко И. В. Сравнение реологических уравнений состояния, найденных при помощи капиллярного и ротационного вискозиметров. — Коллоидный журнал. — 1967. — Т. 29. — № 6. — С. 887—890.
16. Сорокин С. В. Исследование реологических свойств и процесса транспортирования заквасок в хлебопекарном производстве. — Автореф. канд. дис. — М.: МТИПП. — 1979. — 25 с.
17. 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 промышленность. — 1982. — 296 с.
18. Шульман З. П., Носов В. М. Вращение непроводящих тел в электрореологических суспензиях. — Минск: Наука и техника. — 1985. — 112 с.

Глава 4

1. Андрианова В. А. Исследование адгезионных свойств пшеничного теста и разработка мероприятий по предотвращению прилипания теста к рабочим поверхностям оборудования тесторазделочных линий. — Автореф. канд. дис. — М.: МТИПП. — 1968. — 27 с.

2. Бурашников Ю. М. Адгезионные свойства помадных масс. — Хлебопекарная и кондитерская промышленность. — 1979. — № 6. — С. 29—30.
3. Бурляй Ю. В. Научное обоснование и совершенствование завершающих процессов в технологии производства штучных пищевых продуктов. — Автореф. докт. дис. — М.: МТИПП. — 1982. — 54 с.
4. Боровикова О. П. Исследование структурно-механических свойств плавящихся сыров. — Автореф. канд. дис. — М.: МТИМП. — 1972. — 20 с.
5. Вельтишев В. Н. Исследование процесса формирования некоторых кондитерских масс валковыми нагнетателями. — Автореф. канд. дис. — М.: МТИПП. — 1970. — 27 с.
6. Высоцкий А. В. Адгезионные свойства конфетных масс. — Хлебопекарная и кондитерская промышленность. — 1982. — № 5. — С. 26—27.
7. Зимон А. Д. Адгезия пищевых масс. — М.: Агропромиздат. — 1985. — 272 с.
8. Исследование прочности и адгезии формового мармелада и механизация выборки его из форм/С. Д. Шимановский, В. Э. Шапран, В. Ф. Запорожский, Ю. Д. Кобинек//Хлебопекарная и кондитерская промышленность. — 1968. — № 11. — С. 13—15.
9. Калинина С. М. Управление поверхностными свойствами высоковязких пищевых масс с целью интенсификации технологических процессов. — Автореф. канд. дис. — М.: МТИПП. — 1986. — 23 с.
10. Крагельский И. В. Трение и износ. — М.: Машгиз. — 1968. — 480 с.
11. Маршалкин Г. А., Егоров В. А., Карпин Б. А. Адгезия помадных масс. — Хлебопекарная и кондитерская промышленность. — 1969. — № 11. — С. 19—21.
12. Мур Д. Основы и применение трибоники. — М.: Мир. — 1978. — 488 с.
13. Панин А. Д. Исследование физико-механических характеристик плодовоощного сырья с целью уточнения расчета резательных машин. — Автореф. канд. дис. — Одесса; ОТИПП. — 1971. — 24 с.
14. Роль капиллярных сил в адгезии кристаллов сахарозы к поверхностям кристаллизационной аппаратуры/А. И. Украинец, В. О. Штангеев, Е. А. Амелина, А. М. Парфенова. — Известия вузов. — 1985. — № 2. — С. 60.
15. Северинова Г. Т., Ремов Н. Н. Определение липкости слизистого покрова свежевыловленного реинового карпа//Сб. трудов КТИРПиХ. — Вып. 101 «Техника и технология тепловой обработки пищевых продуктов». — 1984. — С. 61—64.
16. Сила адгезии конфетных масс к стали/Г. А. Маршалкин, В. А. Егоров, Г. К. Берман, Б. А. Карпин//Хлебопекарная и кондитерская промышленность. — 1973. — № 10. — С. 14—15.
17. Силаев О. Г. Разработка способов изменения адгезионных и фрикционных свойств пшеничного теста. — Автореф. канд. дис. — М.: МТИПП. — 1983. — 23 с.
18. 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 промышленность. — 1982. — 296 с.
19. Сухой Л. А. Определение коэффициентов трения штучных кондитерских изделий. — Хлебопекарная и кондитерская промышленность. — 1966. — № 8. — С. 18—21.
20. Сухой Л. А., Новицкий П. А. Тензометрический метод определения коэффициентов трения хлеба при транспортировании. — Хлебопекарная и кондитерская промышленность. — 1968. — № 1. — С. 7—9.
21. Фрикционные свойства пшеничного теста/О. Г. Силаев, Ю. А. Мачихин, С. М. Калинина, И. Г. Благовещенский//Хлебопекарная и кондитерская промышленность. — 1985. — № 4. — С. 30—32.
22. Хромеевков В. М. Исследование процесса резания сахарных плит

в производстве сдобных сухарей. — Автореф. канд. дис. — М.: МТИПП. — 1970. — 24 с.

Глава 5

1. Азаров Б. М., Зайчик Ц. Р., Шарыгин М. А. О предельном напряжении сдвига яблочной мезги. — Известия вузов. Пищевая технология. — 1980. — № 6. — С. 135—136.
2. Ауэрман Л. Я., Мелькина Г. М. Определение физико-механических свойств мякиша хлеба на автоматизированном пенетрометре. — Хлебопекарная и кондитерская промышленность. — 1973. — № 2. — С. 5—8.
3. Бакунц Г. В. Прибор для измерения физико-механических свойств фарша при куттеровании. — Мясная индустрия СССР. — 1968. — № 6. — С. 6—11.
4. Бернштейн Т. С., Антокольская М. А. Исследование реологических свойств хрекерного теста. — Хлебопекарная и кондитерская промышленность. — 1978. — № 12. — С. 31—32.
5. Бронштейн Э. А., Бурляй Ю. В., Сухой Л. А. Экспериментальное определение упругопластичных и прочностных характеристик хлеба. — Хлебопекарная и кондитерская промышленность. — 1975. — № 4. — С. 22—24.
6. Жуковский С. С., Гуткин А. М. О методе определения предельного напряжения сдвига. — Коллоидный журнал. — 1966. — Т. XXVIII. — № 1. — С. 151—152.
7. Золотов Э. Б., Тропп В. Д. Усовершенствованный прибор для определения физико-механических свойств теста при растяжении. — Хлебопекарная и кондитерская промышленность. — 1981. — № 3. — С. 33—35.
8. Зюзько А. С., Максименко С. Н. Применение пенетрометра ОА-204 для оценки физических свойств теста. — Хлебопекарная и кондитерская промышленность. — 1982. — № 1. — С. 30—31.
9. Карпычев В. А., Косой В. Д., Горбатов А. В. Теоретическое обоснование метода пенетрации. — Мясная индустрия СССР. — 1985. — № 12. — С. 32—34.
10. Ковалев Г. И. Определение физико-механических свойств тестовых полуфабрикатов и мякиша хлеба на пенетрометре «Игла-72». — Хлебопекарная и кондитерская промышленность. — 1978. — № 8. — С. 6—8.
11. Козлов Г. Ф., Бражник А. М. Исследование структурно-механических свойств теста методом плоскостного растяжения. — Пищевая промышленность (Киев). — 1985. — Вып. 31. — С. 42—46.
12. Комогоров Г. П., Мачихин Ю. А., Казумян З. Б. Реологические свойства теста для лаваша. — Хлебопекарная и кондитерская промышленность. — 1980. — № 12.
13. Косой В. Д. Определение предельного напряжения сдвига безшпигового колбасного фарша для оценки качества готовых изделий. — Мясная индустрия СССР. — 1978. — № 4. — С. 26—32.
14. Косой В. Д. Совершенствование процесса производства вареных колбас. — М.: Легкая и пищевая промышленность. — 1983. — 272 с.
15. Мазур П. Я., Столяров Л. И., Черпаков В. П. Формирование реологических свойств теста в зависимости от условий созревания муки. — Хлебопекарная и кондитерская промышленность. — 1985. — № 1. — С. 28—30.
16. Матц С. А. Структура и консистенция пищевых продуктов. — М.: Пищевая промышленность. — 1972. — С. 237.
17. Назаров Н. И. Технология макаронных изделий. — М.: Пищевая промышленность. — 1978. — С. 287.
18. Нетесов В. П. Определение некоторых физических свойств томатов. — Консервная и овощесушильная промышленность. — 1975. — № 8. — С. 36—39.
19. Николаев Б. А. Измерение структурно-механических свойств пищевых продуктов. — М.: Экономика. — 1964. — С. 224.
20. Погонцева Э. И., Карнаушенко Л. И., Чмырь А. Д.

Реологические свойства жележных масс. — Хлебопекарная и кондитерская промышленность. — 1981. — № 3. — С. 41—42.

21. Прибор для объективной оценки консистенции колбасных изделий/Е. Гольдман, О. Холоднова, А. Большаков, А. Фомин//Мясная индустрия СССР. — 1969. — № 1. — С. 29—30.
22. Пучкова Л. И. Лабораторный практикум по технологии хлебопекарного производства. — М.: Пищевая промышленность. — 1971. — 190 с.
23. Пучкова Л. И., Шеголева И. Д. Влияние пористой структуры мякиша хлеба на его структурно-механические свойства. — Хлебопекарная и кондитерская промышленность. — 1983. — № 12. — С. 20—22.
24. Разоренов В. Ф. Пенетрационные испытания грунтов. — М.: Стройиздат. — 1968. — 182 с.
25. Табачников В. П., Барков Е. Я. Портативный прибор для контроля консистенции сыра. — Молочная промышленность. — 1970. — № 8. — С. 25—27.
26. Тешитель О. В., Пшенишнюк Г. Ф. Изменение реологических свойств теста при замораживании. — Хлебопекарная и кондитерская промышленность. — 1985. — № 9. — С. 38—40.
27. Чувахин С. В., Блаушвили Т. Г. Определение структурно-механических характеристик кремовых конфетных масс в опытах одноосного сжатия. — Известия вузов. Пищевая технология. — 1981. — № 5. — С. 71—74.
28. Brekke J., Marion M. A. A simple objective method of determining firmness of brined cherries. — Food Technology. — 1961. — N 3. P. 335—336.
29. Czczesniak A. S. Objective Measurements of Food Texture. — J. Food Science. — 1963. — V. 28. N 4. — P. 410—420.
30. Feillet P., Abecassis J., Lalary L. Description den nouvel appareil pour mesurer les proprietes, viscoelastiques des produits cerealiers. — Application a l'appréciation de la qualite du gluten, des pates alimentaires et du riz. — Bull. ENSMIC. — 1978. — P. 57—101.
31. Frentz R., Mlle Dreuihe. Application de la thombe lastographie de Hartert a l'etude de la coagulation du lait. — Le Lait. — 1965. 45. — N 448. — P. 489—508.
32. Mohsenin N. N. Application of engineering techniques to evaluation of texture of solid food materials. — Journal of Texture Studies. — 1970. — N 1. — P. 133—154.
33. Mohsenin N. N. Physical properties of plant and animal materials Gordon and breach science publishers. — London. — 1970. — 734 p.
34. Olson N. F., Kowalchuk A. W. A new method of determining the best time to cut chesse curd. — Dairy and Ice Cream Field. — 1978. — N 8. — P. 68.
35. Sherman P. Industrial Rheology. — London, New-Jork. — Academic Press. — 1970. — 423 p.

Глава 6

1. Бреслав И. Б., Бриедис И. П., Файтельсон Л. А. Влияние гармонических сдвиговых деформаций на вязкость наполненных эпоксидных композиций. — Механика полимеров. — 1969. — № 2. — С. 327—331.
2. Вайнберг А. Я. Приборы технологического контроля в молочной промышленности. — М.: Пищевая промышленность. — 1971. — 343 с.
3. Виноградов Г. В., Яновский Ю. Г., Исаев А. И. Воздействие вибраций на полимеры. — В кн.: Успехи реологии полимеров; Под ред. Г. В. Виноградова. — М.: Химия. — 1970. — С. 79—97.
4. Гершгал Д. А., Фридман В. М. Ультразвуковая технологическая аппаратура. — М.: Энергия. — 1976. — 318 с.
5. Денисов В. И., Казаков П. В., Нарайкин О. С. Определение вязкости теста методом затухающих колебаний. — Хлебопекарная и кондитерская промышленность. — 1978. — № 4. — С. 30—31.

6. Итбаев К. Е. Совершенствование процесса дозирования высоковязких начнок с целью повышения эффективности производства карамели. — Автореф. канд. дис. — М.: МТИПП. — 1982. — 20 с.
7. Казаков П. В. Применение камертонного вискозиметра для анализа меласс. — Хлебопекарная и кондитерская промышленность. — 1979. — № 6. — С. 36—37.
8. Крутин В. Н. Колебательные реометры. — М.: Машиностроение. — 1985. — 160 с.
9. Ломов А. А., Гончаров Г. М., Бекин Н. Г. Реологическое поведение тиксотропной системы в условиях совмещенного стационарного потока и вибраций. — В сб.: Новое в реологии полимеров. — Материалы XI Всесоюзного симпозиума по реологии. — 1981. — Вып. 2. — С. 324—328.
10. Малкин А. Я., Аскадский А. А., Коврига А. В. Методы измерения механических свойств полимеров. — М.: Химия. — 1978. — 336 с.
11. Мачихин Ю. А., Мачихин С. А. Инженерная реология пищевых материалов. — М.: Легкая и пищевая промышленность. — 1981. — 216 с.
12. Никаноров С. Н. Исследование процессов макаронной промышленности с целью повышения эффективности их работы. — Автореф. канд. дис. — М.: МТИПП. — 1979. — 32 с.
13. Овчинников П. Ф. Виброреология. — Киев: Наукова думка. — 1983. — 272 с.
14. Сорокин С. В. Исследование реологических свойств и процесса транспортирования заквасок в хлебопекарном производстве. — Автореф. канд. дис. — М.: МТИПП. — 1979. — 25 с.
15. Урьев Н. Б. Высококонцентрированные дисперсные системы. — М.: Химия. — 1980. — 320 с.
16. Урьев Н. Б., Талейсник М. А. Физико-химическая механика и интенсификация образования пищевых масс. — М.: Пищевая промышленность. — 1976. — 239 с.
17. Drake V. K. Automatic recording properties of foodstuffs — T. of Food Sci. — 1952. — V. 27. — N 2. — P. 182—188.
18. Rao V. N. M., Griffith D. L. Measurement of dynamic mechanical properties of foods. — Food process engineering. — AICHE Symposium series. — N 218. — V. 78. — P. 154—162.

Глава 7

1. Азаров Б. М., Баг Х., Хромеев В. М. Автоматизированная система непрерывного съема и обработки данных капиллярной вискозиметрии. — Хлебопекарная и кондитерская промышленность. — 1986. — № 5. — С. 33—34.
2. Благовещенская М. М. Применение микропроцессорной техники в хлебопекарной и макаронной промышленности. — ЦНИИТЭИ Минхлебопродуктов СССР. Хлебопекарная и макаронная промышленность. Обзорная информация. — 1987. — 28 с.
3. Яновский Ю. Г., Черквин М. М., Карнет Ю. Н. Автоматизированный метод определения реооптических характеристик полимеров при периодическом деформировании с помощью ЭВМ. — Заводская лаборатория. — 1987. — № 11. — С. 40—44.
4. Bindrich U., Tscheuschner H.-D., Roller T. Automatisches Vibrationsrheometer für viskoelastische Lebensmittel. — Lebensmittel. — 33, 1986. — N 3. — S. 247—250.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- А**
- Автоматизация измерений 237
- Адгезиометры:
- АМ-1 142
 - ВНИИМПа 141
 - Клаповского Ю. В. 140
 - МТИППа 140, 142
 - Николаева Б. А. 140
 - сдвига 149
- Адгезионные свойства 138, 151
- Альвеограф Шопена 188
- Амляограф Брабендера 195
- Анализатор текстуры «Стивенс» 251
- Б**
- Букингама уравнение 38
- В**
- Валоригграф типа ОА-203 194
- Виброанализатор 253
- Виброреометры:
- акустический 230
 - ВР-02 242
 - импульсный 230
 - камертонный 229
 - капиллярный 220
 - классификация 207
 - МТИППа 219
 - принципы измерений 225
 - ротационные 207
- Вибровискозиметр МТИППа 212
- Вискозиметры капиллярные:
- Азарова Б. М. 52
 - АКВ-5 56, 250
 - Арвесаи 52
 - вакуумный 57
 - ВК-4; ВПЖ-1; ВПЖ-2; ВПЖ-4 51
 - ВПЖ 49
 - Канон — Фенске 50
 - Лейба 59
 - Оствальда 49
 - Оствальда — Фенске 50
 - Рендвуда 61
 - РК-2 54
 - теория 35
 - Уббелде 48
 - Умшгетера 54
 - Энглера 60
- Вискозиметры прочие:
- колебательный 256
 - мятниковый 228
 - проточный 204, 205
 - процессные 199, 200
 - ультразвуковой 229
 - цифровой 256
 - шариковый 163
- Вискозиметры ротационные:
- Брукфильда 199
 - «Вискотестер» 198
 - «Брабендер» 250
 - Воляровича РВ-2, РВ-8 107, 108
 - воспринимающие элементы 80, 85
 - ВР-2М 109
 - Гатчека 107
 - классификация 78
 - Мачихина С. А. РМ-1, РМ-2 111, 113
 - МТИППа РМ-2 40
 - МТИММПа 110
 - Павлова В. П. 114
 - преобразовательные элементы 79
 - РВД-М 111
 - РК 100 119
 - «Реотест» 114
 - Реутова 107
 - «Ротовиско» 117
 - теория 86
 - Штормера 106
 - Хеллера 117
- Вискозастограф 185
- «Шолин» 252
- Вязкость:
- жира говяжьего топленого 51
 - рыбного 51
 - закваски ржаной 114
 - конфетной массы пралине 54

крови скота 51
меланжа 115
мясокостного бульона 51, 61
теста хлебопекарного 53, 112
раствора желатина 61
фарша колбасного 115
— рыбного 116

Г

Гершеля — Балкли уравнение 45, 91
Градиент скорости сдвига:
в капиллярном вискозиметре 37, 41
в ротационном вискозиметре 89, 92
Гука уравнение 17

Д

Динамические свойства 231, 233
Дисперсные системы, типы 7

И

«Инстрон» — испытательная машина 252

К

Капилляр, потери давления 74
Кельвина уравнение 18
«Ковимат» 254
Конвиграф 203
Консистентные переменные 96
Консистенция 25, 31, 33
Консистометр:
Бакунца Г. В. 197
Вейлера — Ребиндера 175
Гепплера 164
для густых материалов 178
для мясopодуKтов 174
для сыра 172
для фруктовых и овощных пюре 56
«Элгеп» 196
Конфетные массы:
адгезионное напряжение 154, 155
вязкость 113, 214, 215
релаксация напряжений 227
Кэссона уравнение 38, 93

М

Максвелла уравнение 15
Максвелла — Томсона уравнение 18
Маргулиса формула 95
Матурограф 183
Модели реологических тел 12, 14, 19
Модули сдвига, приборы 179, 180

Н

Нагружение, виды 9
Ньютона модель 10

О

Олдройда уравнение 15

П

Пенетрометры:
АР-4/1; АР-4/2 167, 168
для кисломолочных продуктов 171
КП-3 165, 167
МТИППа 167
ПД 250
ПП-5 169
пружинные 175
Пластометры:
ЛТИХПа 178
с горизонтальным зазором 178
с пластиной 48
Толстого Д. М. 176
Последствие упругое 18
Предельное напряжение сдвига 94
Продукты пищевые, классификация 6
Процессный реометр 239
Пуазейля уравнение 37

Р

Растяжения приборы:
Адаманиса В. Л. 186
МТИППа 183
Назарова — Калинина 184
ПР 185
Резонанса метод 231
Рейнольдса критерий 86
Реогониометр Вайсенберга 233
«Реомат» 247
Реометр «Висколаб» 244
Реометрические системы 248, 249
Реометрия, основные понятия 8
Реометры, классификация 29, 30, 34
Реоплексивная жидкость 15

С

Сжатие образца 22
Сжатия приборы 180, 181
Сектилометр 191
Сен-Венана модель 19
Сенсорная оценка качества, классификация 26
Среза приборы 190
Структуры дисперсных систем 5
Сыр, адгезионное напряжение 157
Сырково-творожная масса, сдвиговые характеристики 111

Т

Текстура 25
Текстуры анализатор 251
Тендерометр 191
Тесто пшеничное хлебопекарное:
адгезионное напряжение 152, 153
вязкость 112
Течение:
виды 28
реологические кривые 11
Тиксотропная жидкость 15
Торсиометр 189
Трения коэффициенты:
кондитерских изделий 158, 159
овощей и фруктов 161
сухарных плит 161
теста пряничного 162
хлебобулочных изделий 157, 160

Трибометры:
классификация 145
методы измерения сил трения 146
схемы приборов 147
УкрНИИпродмаша 148, 149
Тромбозластограф 189

У

Упругие волны в пищевых средах 234

Упругое тело 17
Упругости модуль фруктов и овощей 232

Ф

Фаринограф 192
Фарш колбасный, вязкость 115, 128
— рыбный, вязкость 116
— сосисочный:
адгезионное напряжение 156
сдвиговые характеристики 109, 123, 126, 131

Ш

Шоколад, кривые деформации 23
Штормера реометр 106
Шульмана уравнение 46

Э

Эластограф ОА-222 182
Эластометр переносной 196
Электрореометр ротационный 109
Экстенсограф Брабендера 185

Я

Яблоки, кинетика деформации 23

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3	6. Виброреометры (А. С. Максимов)	206
1. Основные реологические свойства пищевых продуктов (Х.-Д. Чойшнер)	5	6.1. Методы и приборы для изучения реологических свойств дисперсных систем при вибрационном воздействии	206
1.1. Пищевые продукты как реологические тела	5	6.2. Ротационные вибровискозиметры	207
1.2. Основные понятия реологии и теории напряженного и деформированного состояния	8	6.3. Капиллярные вибровискозиметры	220
1.3. Свойства жидкостей	10	6.4. Виброреометры, основанные на различных принципах	225
1.4. Свойства твердых тел	17	6.5. Методы и приборы для изучения динамических свойств	231
1.5. Описание свойств реологических тел с помощью механических моделей	19	7. Автоматические измерения и контроль реологических характеристик (Х.-Д. Чойшнер, А. С. Максимов, Ю. А. Мачихин)	237
1.6. Прочностные и компрессионные свойства твердых пищевых продуктов	21	7.1. Принципы автоматизации реологических исследований	237
1.7. Другие физико-механические свойства материалов	24	7.2. Лабораторные автоматизированные реометрические системы	242
1.8. Консистенция и текстура пищевых продуктов	25	7.3. Производственные автоматизированные приборы непрерывного действия	254
1.9. Методы измерений и измерительные приборы	26	Список использованной литературы	260
2. Капиллярные вискозиметры (А. В. Горбатов, Ю. А. Мачихин)	35	Предметный указатель	267
2.1. Теория капиллярных вискозиметров	35		
2.2. Конструкции капиллярных вискозиметров и работа на них	47		
2.3. Методика измерения и расчета характеристик материалов	62		
3. Ротационные вискозиметры (А. В. Горбатов, Ю. А. Мачихин)	78		
3.1. Общие требования, назначение и классификация	78		
3.2. Теория ротационных вискозиметров	86		
3.3. Конструкции ротационных вискозиметров и работа на них	106		
3.4. Методика измерения и расчета характеристик материалов	119		
4. Адгезиометры и трибометры (Ю. А. Мачихин)	134		
4.1. Основные понятия и определения	134		
4.2. Роль адгезии и трения в процессах пищевых производств	136		
4.3. Методы и приборы для измерения адгезионных характеристик	138		
4.4. Методы и приборы для измерения фрикционных характеристик	144		
4.5. Адгезионные и фрикционные характеристики продуктов	150		
5. Технологические приборы (К. Коларов)	163		
5.1. Шариковые вискозиметры	163		
5.2. Пенетрометры	165		
5.3. Консистомеры и пластометры	175		
5.4. Приборы сжатия и растяжения	180		
5.5. Приборы кручения	189		
5.6. Приборы среза	190		
5.7. Приборы для относительных измерений, контроля свойств и готовности продукта	192		
5.8. Процессные и непрерывнодействующие приборы	199		

Справочное издание

Мачихин Юрий Александрович
Горбатов Альфред Васильевич
Максимов Алексей Сергеевич
Коларов Кынчо
Чойшнер Хорст-Дитер

РЕОМЕТРИЯ ПИЩЕВОГО СЫРЬЯ И ПРОДУКТОВ
СПРАВОЧНИК

Зав. редакцией Л. М. Богатая
Редактор И. П. Вейшторд
Художественный редактор В. А. Чуракова
Технический редактор И. В. Макарова
Корректор Т. Р. Сидорова

ИБ № 4622

Сдано в набор 19.09.89. Подписано к печати 19.12.89. Т-03963. Формат 60×88¹/₁₆.
Бумага офсетн. № 2. Гарнитура Литературная. Печать офсетная. Усл. печ.
л. 16,66. Усл. кр.-отт. 16,66. Уч.-изд. л. 19,39. Изд. № 531. Тираж 4300 экз.
Заказ № 534. Цена 1 р. 30 к.

Ордена Трудового Красного Знамени ВО «Агропромиздат», 107807, ГСП-6,
Москва, 5-78, ул. Садовая-Спасская, 18.

Диaposитивы изготовлены в Ярославском полиграфкомбинате Госкомпечати
СССР. 150014, Ярославль, ул. Свободы, 97.

Отпечатано в Московской типографии № 8 Государственного комитета СССР по
печати. 101898, Москва, Центр, Хохловский пер., 7. Тип. зак. № 211.