

Министерство сельского хозяйства РФ
Брянский государственный аграрный университет

Инженерно-технологический институт

Кафедра технического сервиса

Никитин Виктор Васильевич

РЕОЛОГИЯ

*Методическое пособие для студентов
института ветеринарной медицины и биотехнологии
направления подготовки:*

19.03.03 Продукты питания животного происхождения

Брянск – 2018

УДК 639.3 (076)
ББК 22.251
Н 62

Никитин, В. В. Реология: методическое пособие / В. В. Никитин. – Брянск: Изд-во Брянский ГАУ, 2018. – 125 с.

Методическое пособие предназначено для самостоятельной работы студентов очной и заочной формы обучения по направлению подготовки: 19.03.03 Продукты питания животного происхождения.

Рецензент: д.с.-х.н., профессор кафедры ТСВАБПиДС
Ожерельев В.Н.

Рекомендовано методической комиссией инженерно-технологического института Брянского государственного аграрного университета, протокол № 7 от 21.02. 2018 года.

© Брянский ГАУ, 2018
© Никитин В.В., 2018

ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Реология» относится к общепрофессиональным дисциплинам и предназначена для подготовки студентов направления 19.03.03 Продукты питания животного происхождения.

Целью дисциплины является изучение основ инженерной реологии пищевых материалов, формирование у студентов знаний, умений и навыков в области структурообразования пищевых масс, методов и приборов для определения структурно-механических свойств пищевых материалов в целях контроля, регулирования и управления показателями сырья, готовой продукции на стадиях технологического процесса.

Основные задачи дисциплины:

- приобретение теоретических знаний в области прикладной инженерной реологии как составной части науки физико-химической механики пищевых производств;
- приобретение знаний в области структурообразования пищевых масс, построения реологических моделей для моделирования технологических процессов;
- приобретение знаний в области методологии измерения и приборной техники для определения структурно-механических свойств пищевых масс.

Изучение дисциплины базируется на знании естественнонаучных дисциплин: высшая математика, физика, теоретическая механика, гидравлика и др.

Тема № 1: Общие сведения о реологии

Реология – наука о деформации и течении различных тел. Слово «реология» происходит от греческого «реω», что означает «теку». Под деформацией понимается относительное смещение частиц материального тела, при котором не нарушается непрерывность (сплошность) самого тела. Если под действием конечных сил деформация тела увеличивается во времени непрерывно и необратимо, то это означает, что материал течет. При деформации обычно происходит изменение формы или размеров тела. Предметом реологии в общем понимании как науки является изучение различных видов деформации в зависимости от сопровождающих их напряжений.

Физико-химическая механика – наука о способах и закономерностях формирования структур дисперсных систем с заранее заданными свойствами, в задачи которой входят: установление существа образования и разрушения структур в дисперсных и нативных системах в зависимости от совокупности физико-химических, биохимических, механических и др. факторов; исследование, обоснование и оптимизация путей получения структур с заранее заданными технологическими свойствами.

Инженерная реология как наука о течении и деформации реальных тел сформировалась в связи с изучением материалов, механические свойства которых являются промежуточными между свойствами упругих тел и вязких жидкостей. К таким материалам относятся и пищевые продукты – мясо и мясопродукты, молоко и молочные продукты, рыба и рыбные продукты и т.д. Реология также занимается изучением течения других разнообразных вязко-пластичных материалов, как-то глинистых паст и суспензий, консистентных смазок, смол, строительных растворов и т.п.

Основателем физико-химической механики является

советский ученый, академик П.А. Ребиндер. Существенный вклад в развитие физико-химической механики и реологии внесли многие отечественные и зарубежные ученые М. П. Волорovich, Г.В. Виноградов, В.Е. Гуль, М. Рейнер и многие др. Значительный вклад в развитие реологических исследований в мясной и молочной промышленности внесли А.В. Горбатов, В.Д. Косой, в кондитерской, хлебопекарной и других отраслях пищевой промышленности Ю.А. Мачихин, С.А. Мачихин, Б.А. Николаев и др.

Инженерная реология пищевых производств или просто инженерная реология, является составной частью инженерной физико-химической механики пищевых производств, носит прикладной характер, в область изучения которой входят только пищевые материалы и их композиции.

Основными задачами инженерной реологии пищевых производств являются:

- определение основных реологических характеристик пищевых материалов и установление их изменения от различных технологических факторов (длительности механической обработки; температуры, влажности и др.);
- разработка методов и приборов для измерения реологических (структурно-механических) характеристик пищевых продуктов;
- разработка механических моделей для реальных пищевых продуктов;
- определение эталонных показателей реологических характеристик, установление связи реологических характеристик сырья и готовых продуктов;
- управление структурой и качеством продуктов;
- комплексное исследование различных физических характеристик для установления аналогии их изменения, для моделирования, прогнозирования, расчета и конструирования продуктов с заранее заданными технологическими показателями;

- разработка научно-обоснованных методов расчета оборудования.

Составные части инженерной реологии

Инженерная реология как наука включает в себя широкий круг вопросов, теоретическую основу, различные методы и приборы измерения реологических характеристик пищевых материалов, методики инженерных расчетов параметров, разработки по оптимизации, интенсификации технологических процессов, а также по контролю и управлению качеством продукции.

В целях систематизации материала инженерная реология пищевых производств условно разделена на четыре части:

- *реология пищевых материалов* – содержит основные сведения по теоретической части инженерной реологии пищевых материалов;

- *реометрия пищевых материалов* – посвящена методам измерения реологических характеристик пищевых материалов, приборной технике и представлению результатов измерения;

- *реодинамические расчеты* – посвящена представлению полученных экспериментальных данных в виде математических формул, графиков (реограмм), механических моделей, дающих количественную оценку результатам изменения пищевых материалов в результате воздействия рабочих органов машин, а также инженерные расчеты по технологическому оборудованию;

- *реологические основы оптимизации, интенсификации, контроля и управления качеством продукции* – посвящена использованию результатов, полученных в ходе экспериментальных исследований по разработке вопросов: оптимизации технологических параметров, интенсификации технологических процессов производства продуктов, проведения контроля качества продукции, а также разработке вопросов управления качеством выпускаемой продукции.

Пищевые материалы как предмет изучения реологии

В научных и производственных кругах среди специалистов, а также при изучении специальных дисциплин в вузах, техникумах и т.д. широко используется термин «пищевые материалы», под которым понимают реальные пищевые продукты – сырье растительного и животного происхождения (мясо, молоко, рыба, овощи, фрукты и т.д.), полуфабрикаты, смеси, композиции (мясной фарш, рыбный фарш, мучное тесто, кондитерские массы и т.д.) и готовая продукция (колбасные изделия, молочные продукты, хлебные, макаронные и кондитерские изделия и т.д.). Данный термин используется только для того, чтобы обозначить, что пищевые продукты как объект изучения, тоже рассматриваются как материал, но только как пищевой материал.

Пищевые продукты или пищевые материалы, как: сырье, полуфабрикаты, готовые продукты, в большинстве представляют собой сложные композиции, состоящие из двух, трех и более компонентов в различных пропорциях. Причем каждый компонент оказывает в той или иной мере влияние на свойства продукта и не учитывать их или абстрагироваться от них нельзя. С научной точки зрения пищевые продукты (материалы) относятся к дисперсным системам, объектом изучения которых является инженерная физико-химическая механика пищевых производств. Классификация дисперсных систем в зависимости от того или иного признака представлена ниже.

Пищевые продукты (материалы) существенно отличаются от других тем, что они являются материалами растительного и животного происхождения. Кроме того, они не могут в течение продолжительного времени сохраняться в том виде, в каком были первоначально. Особенно это касается мяса и мясопродуктов. Изучением таких материалов занимается инженерная физико-химическая механика пищевых производств.

Пищевые продукты (материалы), как и другие, обладают комплексом различных свойств, среди которых группа физических свойств дает наиболее полное представление о структуре продукта. Структура продукта, ее изменение определяются структурно-механическими свойствами, которые принято выражать такими характеристиками (показателями) как упругость, вязкость, пластичность, липкость и др. Если предположить, что материал обладает только одним из этих свойств, например упругостью, вязкостью или пластичностью, то изучением таких материалов занимаются теоретическая механика, сопротивление материалов, гидравлика. Поведение таких материалов при воздействии внешних сил описываются уравнениями Ньютона, Гука, Сен-Венана и имеют линейную зависимость.

На основании проведенных исследований установлено, что большинство пищевых материалов при воздействии внешних нагрузок имеют несколько иной характер поведения. Причем характер изменения упругости, вязкости и пластичности имеет не линейную зависимость. При этом пищевые материалы одновременно могут обладать упругостью, вязкостью и пластичностью. Изучением такого типа материалов занимается инженерная реология, поэтому пищевые продукты (материалы) являются предметом изучения инженерной реологии.

Тема №2: Научные основы инженерной реологии. Общие положения. Понятия и определения. Виды дисперсий. Типы структур и их классификация

Предметом изучения инженерной реологии являются пищевые материалы, которые рассматриваются как реальные тела и занимает конкретное место в разделах технической механике сплошной среды.

Согласно классификации, пищевые продукты могут быть представлены в различных сочетаниях основных так называемых «первичных» тел – упругого (тело Гука), идеально-вязкого (тело Ньютона) и идеально-пластичного (тело Сен-Венана) тела, комбинируя которые можно моделировать деформационные характеристики множества реальных пищевых продуктов. При этом поведение реологических тел описываются не простыми, а более сложными – нелинейными и эмпирическими уравнениями, чаще всего степенными, связывающими деформации и скорости деформаций.

С помощью основных «первичных» тел можно в различных сочетаниях и комбинациях моделировать деформационные характеристики любых реальных пищевых продуктов.

Виды дисперсий. В инженерной физико-химической механике, на которую опирается инженерная реология, классическими объектами изучения являются *дисперсные системы*.

Дисперсная система – система, состоящая из двух и более фаз, в которой условно принято называть: непрерывную (сплошную) фазу – дисперсионной средой, а другую, раздробленную, состоящую из частиц, не контактирующих друг с другом – *дисперсной фазой*. С этой точки зрения, пищевые продукты в большинстве случаев, состоящие из двух и более компонентов, представляют собой дисперс-

ные системы. Отличием дисперсной системы от гомогенной является то, что в первой – частички дисперсной фазы состоят не из отдельных молекул, а из конгломератов, которые обладают термодинамическими свойствами фазы. Основным условием существования дисперсных систем является нерастворимость или малая растворимость вещества дисперсной фазы в дисперсионной среде.

В зависимости от размера частиц дисперсной фазы, системы подразделяются: на грубодисперсные и высокодисперсные.

Типы структур и их классификация. Для представления материала как такового, а также для проведения схожести или разделения с другими материалами, вводится понятие структура.

Структура – внутреннее строение продукта (материала) и характер взаимодействия между отдельными ее элементами (частицами), которую определяют: химический состав, биохимические показатели, температура, дисперсность, агрегатное состояние и ряд технологических факторов.

Академик П.А. Ребиндер, применяя к дисперсным системам феноменологический подход, условно разделил все материалы (массы) на два вида, на золи – вещества, ведущие себя как жидкости и гели – вещества, обладающие свойствами твердых тел.

Согласно классификации, предложенной академиком П.А. Ребиндером, структуры пищевых продуктов разделяют: на коагуляционные и конденсационно-кристаллизационные.

Коагуляционные структуры образуются в дисперсионных системах взаимодействием между частицами и молекулами через прослойки дисперсной среды за счет Ван-дер-Ваальсовых сил сцепления. В таких структурах частицы связаны между собой молекулярными силами сцепления, образуя сплошную сетку или каркас. Прочность кар-

каса зависит от наличия сольватного (гидратного) слоя на поверхности частиц. Отличительными признаками таких структур являются: сравнительно небольшая прочность связи между частицами; способностью к самопроизвольному восстановлению структуры после разрушения т.е. тиксотропией; обладают упругостью, пластичностью, вязкостью и др. свойствами. При обезвоживании прочность их повышается, и после определенного предела они перестают быть обратимотиксотропными. Типичными представителями систем с коагуляционной структурой являются сырые мясные и ливерные фарши колбас и др.

Конденсационно-кристаллизационные структуры. Они присущи натуральным продуктам (мясо и мясопродукты с сохраняющимся клеточным строением и др.), но могут образоваться из коагуляционных при удалении дисперсионной среды или срастании частиц дисперсной фазы при термообработке (коагуляции или денатурации белков), а также при охлаждении расплавов или увеличении концентрации растворов. Отличительными признаками такого типа структур являются: большая прочность по сравнению с коагуляционными; отсутствие тиксотропии и необратимый характер разрушения; высокая хрупкость и упругость из-за жесткости скелета структуры; наличие внутренних напряжений, возникающих в процессе образования фазовых контактов и влекущих в последующем перекристаллизацию и самопроизвольное понижение прочности вплоть до нарушения сплошности, например растрескивание при сушке.

Основные термины и определения реологии: аксиомы реологии, деформация, упругость, вязкость, пластичность, адгезия

Инженерная реология, как любая другая наука, опирается на ряд аксиом, допущений, предположений и другие ограничения, которые вызваны необходимостью абсолютироваться от второстепенных вопросов.

Первая аксиома. Под действием всестороннего (изотропного) давления все материалы ведут себя одинаково – как идеально упругие тела.

Это означает, что всесторонне равномерное давление будет оказывать одинаковое действие на шар, изготовленный из стали, или на шар из мясного фарша (теста). Плотность обоих шаров будет увеличиваться без искажения формы. Изменение диаметров произойдет за счет упругой деформации, т.е. при снятии давления диаметр и плотность этих тел примут первоначальные значения. Различия в реологических свойствах проявляются только при деформации, изменяющей форму тела – деформации формоизменения.

Вторая аксиома. Каждый материал обладает всеми реологическими свойствами, хотя и в различной степени. К основным реологическим свойствам относятся упругость, пластичность, вязкость и прочность.

Это означает, что у одного и того же материала в зависимости от его состояния и условий нагружения могут проявляться в большей или меньшей мере различные реологические свойства. Например, такой вязко-пластичный материал, как макаронное тесто, при мгновенном воздействии нагрузки в основном ведет себя, как упругое тело, а пластическая деформация и вязкое течение почти отсутствуют. При других условиях нагружения большее значение имеют пластические и вязкие свойства. Поэтому, в первую очередь, необходимо выяснить, какие свойства исследуемого материала при заданных условиях являются основными, определяющими.

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

Виды деформаций. При приложении к материалу внешней нагрузки он подвергается воздействию, которое выражается в изменении его размеров и формы. Эти изменения материала принято называть деформацией. В зависимости

от приложения нагрузки деформации принципиально разделяются на два вида: первые – деформации объемного (линейного) растяжения-сжатия и вторые – деформации сдвига. При первой изменяется только объем (линейный размер) материала, а его форма не претерпевает заметных изменений. При деформации сдвига изменяется форма материала, а объем его остается прежним. Между этими видами деформаций существует тесная взаимосвязь, определяемая коэффициентом Пуансона. Способность деформироваться под действием внешних сил - основное свойство материалов всех реальных тел.

Деформация – это изменение формы или линейных размеров тела под действием внешних сил, при изменении влажности, температуры и пр., при котором частицы или молекулы смещаются одна относительно другой без нарушения сплошности тела.

В зависимости от вида деформации тела они разделяются на объемные, линейные (нормальные) и сдвиговые. Изменения линейных размеров тела принято выражать в относительных единицах деформации.

Относительная деформация тела при нормальном растяжении-сжатии, обозначают ε , представляет отношение абсолютной деформации $\Delta l = l - l_1$ к первоначальным размерам l тела, определяют по формуле

$$\varepsilon = (l - l_1) / l = \Delta l / l. \quad (2.1)$$

Объемная относительная деформация тела ε_V , определяется по формуле

$$\varepsilon_V = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z, \quad (2.2)$$

где $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ – относительные деформации тела по осям x, y, z .

Относительная деформация при сдвиге γ , представляет отношение абсолютной величины сдвигового смещения слоя Δl под действием касательных сил к его толщине h , определяют по формуле

$$\gamma = \Delta l / h. \quad (2.3)$$

Деформации разделяются на упругие, т.е. исчезающие после снятия нагрузки, и на остаточные, необратимые, не исчезающие после удаления нагрузки. Остаточные деформации, не сопровождающиеся разрушением материала, называются пластическими, а сами материалы – пластическими.

Скорость деформации $\dot{\varepsilon}$, $\dot{\gamma}$, s^{-1} , это изменение деформации во времени, определяют по формуле

при растяжении-сжатии: $\dot{\varepsilon} = d\varepsilon / d\tau$;

при сдвиге: $\dot{\gamma} = d\gamma / d\tau$. (2.4)

Напряжение σ , θ , Па, – это мера внутренних сил P , H , возникающих в теле под влиянием внешних воздействий на единицу площади F , m , нормальной к вектору приложения силы, определяют по формуле

нормальное напряжение $\sigma = P / F$;

касательное напряжение (сдвига) $\theta = P / F$. (2.5)

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

Величины напряжений и деформаций связаны законом Гука и имеют вид уравнений

нормальное напряжение $\sigma = \varepsilon E$

$$\text{касательное напряжение (сдвига)} \quad \theta = \gamma G. \quad (2.6)$$

Адгезия p_0 , Па, это слипание разнородных твердых или жидких тел, соприкасающихся своими поверхностями. Прочность слипания тел определяют путем отрыва, вводя показатель как липкость p_l , Па, которая рассчитывается по формуле:

$$p_l = P_l / F_l, \quad (2.7)$$

где P_l – сила отрыва, Н;

F_l – геометрическая площадь пластины, m^2 .

Отрыв материалов одного от другого может быть трех видов (рис. 2.1): адгезионный, отрыв происходит по границе контакта материалов; когезионный, отрыв происходит по слою одного из материалов; адгезионно-когезионный, смешанный.

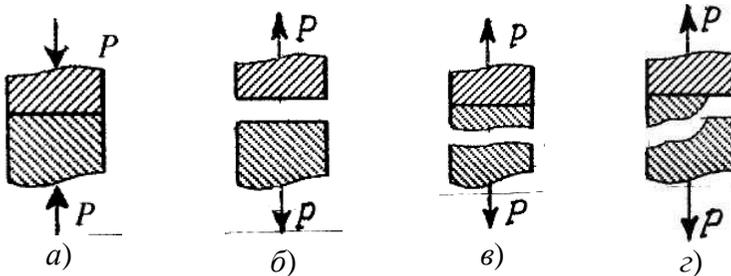


Рис. 2.1. Отрыв материалов: а – предварительный контакт, б – адгезионный, в – когезионный, г – адгезионно-когезионный.

Внешнее трение – взаимодействие между телами на границе их соприкосновения, препятствующее относительному их перемещению вдоль поверхности соприкосновения. Оно зависит от нормального усилия и липкости, и рассчитывается по формуле:

$$P_{mp} = f(P_{\kappa} + p_o F_o), \quad (2.8)$$

где P_{mp} – внешнее трение, H ;
 f – истинный коэффициент внешнего трения;
 P_{κ} – сила нормальная поверхности сдвига (усилие контакта), H .

Коэффициент внешнего трения f . Для пищевых материалов в зависимости от реологических свойств, состояния фрикционных поверхностей и скорости скольжения коэффициент внешнего трения f определяется различными способами. 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, прикладываемая для смещения (трения) одного тела относительно другого, измеряется тензометрическими, динамометрическими или какими-либо другими датчиками.

Вязкость η , Па·с, – это способность тела оказывать сопротивление относительноному смещению его слоев. Вязкое течение реализуется в истинно-вязких, ньютоновских жидкостях при любых, сколь угодно малых напряжениях сдвига, и описывается уравнением Ньютона

$$\theta = \eta \dot{\gamma}. \quad (2.9)$$

При течении неньютоновских (аномально-вязких) жидкостей вязкость не остается величиной постоянной, она зависит от напряжения сдвига и градиента скорости. В этом случае пользуются понятием «эффективная вязкость» $\eta_{эф}$, Па·с, которая рассчитывается по формуле

$$\eta_{эф} = \theta / \dot{\gamma} \quad (2.10)$$

Пластичность $p_{пл}$, Па, это способность тела под действием внешних сил необратимо деформироваться без нарушения сплошности. Пластическое течение начинается при величине напряжения, равной пределу текучести.

Реологические модели простых «идеальных» тел. Основные уравнения напряжений и деформаций «идеальных» тел

Для моделирования поведения сложного реологического тела в зависимости от свойств его компонентов в инженерной реологии используются комбинации в различных сочетаниях рассмотренных выше простых идеальных тел, каждое из которых обладает только одним физико-механическим свойством.

Модели простых идеальных тел можно комбинировать, располагая их параллельно, последовательно, смешанно (параллельно и последовательно). В комбинациях число простых элементов может быть разное – два, три, четыре и более, достигая 10-20. Однако практика показывает, что применение в моделях свыше трех, четырех элементов значительно усложняет возможности визуального наблюдения за поведением тел при одновременном изменении такого количества его свойств. Поэтому, чаще всего применяются сложные модели, в которых количество элементов составляет не более трех, четырех.

Для параллельного соединения элементов принимается, что деформация упругого элемента равна деформации вязкого элемента, а суммарное напряжение равно сумме напряжений упругого и вязкого элементов.

Механическая модель «идеально» упругого тела. Такой моделью представляется упругое тело Гука и изображается в виде пружины (рис. 2.2).

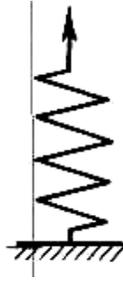


Рис. 2.2. Механическая модель тела Гука

Данная модель характеризуется тем, что при приложении мгновенной нагрузки пружина сжимается, а после снятия возвращается в исходное положение. При этом понимается, что деформации возникают непосредственно после приложения нагрузки и скорость ее распространения практически мгновенна.

Ее поведение описывается законом Гука, основным уравнением которого являются выражения вида:

$$\begin{aligned} \text{при растяжении-сжатии:} & \quad \sigma = \varepsilon E; \\ \text{при сдвиге:} & \quad \theta = \gamma G. \end{aligned} \quad (2.11)$$

Зависимость напряжения от деформации ($\sigma \rightarrow \varepsilon$ или $\theta \rightarrow \gamma$) принято показывать в виде реограммы т.е. в виде графика.

Механическая модель «идеально» вязкого тела. Такой моделью представляется вязкое тело Ньютона и изображается в виде цилиндра с жидкостью и поршня с отверстиями (демпфера), через отверстия которого может протекать жидкость (рис. 2.3). При перемещении поршня жидкость через отверстия протекает из одной части цилиндра в другую. При этом перемещение поршня не свободно, а зависит от сопротивления жидкости, т.е. ее вязкости. Поведение модели характеризуется тем, что при приложении мгновенной нагрузки она ведет себя, как абсолютно твердое те-

ло, так как жидкость не способна мгновенно перетечь через отверстия поршня. Если к модели приложить нагрузку и выдерживать под ней или нагрузку прикладывать постепенно, то поршень будет перемещаться в цилиндре в результате протекания жидкости через отверстия. При этом скорость его перемещения зависит от вязкости жидкости, которой он наполнен.

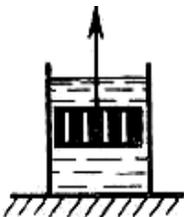


Рис. 2.3. Механическая модель тела Ньютона

Ее поведение описывается законом Ньютона. Основным уравнением, описывающим поведение модели является уравнение вида:

$$\begin{aligned} \text{при продольном смещении: } & \sigma = \eta \cdot \dot{\epsilon}, \\ \text{при сдвиге: } & \theta = \eta \dot{\gamma}. \end{aligned} \quad (2.12)$$



Рис. 2.4. Механическая модель тела Сен-Венана

Механическая модель «идеально» пластичного тела. Такой моделью представлено пластичное тело Сен-Венана и изображается в виде пары трения скольжения (рис. 2.4). Модель характеризуется тем, что при приложении нагрузки менее критической величины, она остается неподвижной, т.е. никаким изменениям не подвергается. И в случае достижения нагрузки некоторой критической величины происходит смещение одного элемента относительно другого, при этом элемент может перемещаться с любой скоростью.

Ее поведение описывается основным уравнением вида:

$$\theta = \theta_T, \quad (2.13)$$

где θ_T – предел текучести материала, т.е. критическая величина напряжения при котором материал начинает течь необратимо, Па.

На практике механические модели «идеальных» тел и их основные уравнения используются для описания поведения, свойств реальных пищевых материалов, жидкостей, которые достаточно близки по свойствам к ним. Однако, в большинстве это невозможно по причине того, что пищевые материалы представляют собой достаточно сложные композиции, которые одновременно могут обладать двумя, тремя и более свойствами.

Реологические модели сложных реальных тел. Основные уравнения сложных реологических тел

Основными сложными моделями широко используемыми для моделирования реальных пищевых продуктов, в том числе мясных, являются: модель упруго-вязкого тела (тело Максвелла), модель упруго-вязкого тела (тело Фойгта-Кельвина), модель упруго-пластичного тела, модель вязко-пластичного тела (Шведова-Бингама) и др.

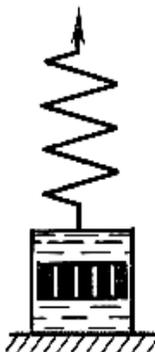


Рис. 2.5. Механическая модель тела Максвелла

Механическая модель вязко-упругого тела с релаксацией деформаций (тела Максвелла). Механическая модель вязко-упругого релаксирующего тела Максвелла представляет последовательное соединение элементов Гука с модулем упругости G и Ньютона с вязкостью η . На оба элемента действует одинаковое напряжение θ . Для последовательного соединения элементов считается, что полная скорость деформации тела равна сумме скоростей ее элементов и каждый элемент передает полную нагрузку.

Поведение модели. Если к модели приложить мгновенную нагрузку и сразу снять, то успевает отреагировать только пружина, которая растянется и сожмется, а поршень не успевает сдвинуться. В этом случае модель ведет себя как упругое тело. Если после приложения нагрузки продолжать поддерживать растяжение пружины постоянным, то она релаксирует, т.е. сжимается, перемещая поршень, до тех пор, пока полностью не вернется к своему первоначальному состоянию. В этом случае модель ведет себя, почти как ньютоновская жидкость.

Для упругого элемента скорость деформации определяется из закона Гука $\dot{\gamma} = \theta / G$, а для вязкого из закона Ньютона $\dot{\gamma} = \theta / \eta$.

Складывая скорости упругой и вязкой деформаций и проведя математические действия, получаем основное реологическое уравнение для тела Максвелла вида:

$$\dot{\gamma} = \dot{\theta} / G + \theta / \eta \quad \text{или} \quad \eta \dot{\gamma} = \dot{\theta} / G + \theta. \quad (2.14)$$

Механическая модель вязко-упругого тела с релаксацией напряжений (тела Фойгта-Кельвина). Механическая модель вязко-упругого тела Фойгта-Кельвина представляет параллельное соединение элементов Гука с модулем упругости G и Ньютона с вязкостью η .

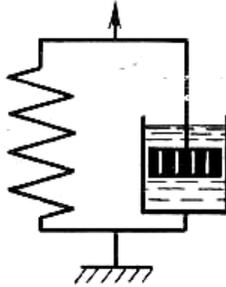


Рис. 2.6. Механическая модель тела Фойгта-Кельвина

Поведение модели. Если к модели приложить нагрузку мгновенно и снять, модель остается неподвижной, т.е. она ведет себя, как абсолютно твердое тело. Если к модели приложить нагрузку и ее удерживать постоянной, то под действием растягивающего усилия пружина удлиняется, и одновременно перемещается поршень в жидкости. При этом движение поршня связано с вязким сопротивлением жидкости, ввиду чего полное растяжение пружины наступает не сразу. После снятия нагрузки, пружина сжимается до первоначальной длины, но это требует времени вследствие вязкого сопротивления жидкости.

Поведение модели описывается основным уравнением Фойгта-Кельвина вида

$$\theta = G\gamma + \eta\dot{\gamma}. \quad (2.15)$$

Если предположить, что деформация постоянна, то $\dot{\gamma}=0$, при этом наблюдается процесс рассасывания, релаксации напряжений, причем при $\theta=0$ напряжение равно какому-то начальному значению $\theta=\theta_1$. При интегрировании уравнения в пределах от θ_1 до θ и времени от 0 до τ получают уравнение вида

$$\theta = \theta_1 e^{-G\tau/\eta}. \quad (2.16)$$

Если в этом уравнении выражение η/G обозначить через τ_p , то уравнение примет вид

$$\theta = \theta_1 e^{-\tau/\tau_p}, \quad (2.17)$$

где τ_p – период релаксации, сек.

Данное уравнение называют экспоненциальным уравнением релаксации напряжений.

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

Механическая модель вязко-пластичного тела Шведова-Бингама. Механическая модель представляет параллельное соединение элементов Ньютона с вязкостью G и Сен-Венана с пределом текучести θ_T .

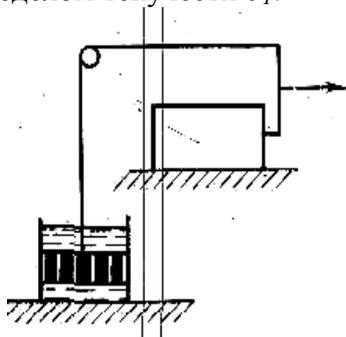


Рис. 2.7. Механическая модель вязко-пластичного тела Шведова-Бингама.

Поведение модели. Если при приложении нагрузки в модели возникают напряжения выражающиеся неравенством $\theta \leq \theta_T$, то тело ведет себя как абсолютно твердое недеформируемое. В противоположном случае, когда $\theta > \theta_T$,

механическая модель описывается основным реологическим уравнением вида:

$$\dot{\gamma} = (\theta - \theta_T) / \eta \quad \text{или} \quad \theta = \theta_T + \eta \dot{\gamma}. \quad (2.18)$$

Механическая модель упруго-пластичного тела. Механическая модель упруго-пластичного тела (рис. 2.8) представляет последовательное соединение упругого элемента Гука с модулем упругости G и пластического элемента Сен-Венана с пределом текучести θ_T .



Рис. 2.8. Механическая модель упруго-пластичного тела

Поведение модели. При приложении нагрузки меньше критической величины происходит только растяжение пружины, а пара трения скольжения остается неподвижной, т.е. модель ведет себя, как упругое тело. В случае превышения нагрузки выше критической, происходит перемещение одного элемента пластичного тела относительно другого, при этом пружина остается в том же растянутом состоянии, в котором находилась в момент достижения нагрузки критической величины, т.е. модель ведет себя, как пластичное тело.

При $\theta < \theta_T$ механическая модель упруго-пластичного тела описывается основным реологическим уравнением Гука имеющего вид $\theta = G \cdot \gamma$.

При $\theta = \theta_T$, механическая модель описывается основным реологическим уравнением Сен-Венана имеющего вид $\theta = \theta_T$.

Тема № 3: Основные структурно-механические свойства пищевых продуктов. Структурно-механические характеристики пищевых продуктов как объективный показатель воздействия

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

Для проведения общей оценки качества продукта используется комплекс его свойств: химических, биологических, физических, электрофизических, оптических и др. Среди них комплекс физических свойств, так называемые структурно-механические, предопределяют поведение продуктов в самых разнообразных технологических процессах и энергетических полях. Они являются качественно внешним выражением внутренней сущности объектов, т.е. определяют агрегатное состояние, дисперсность, строение, структуру и вид взаимодействий внутри продукта. В количественном отношении структурно-механические свойства представляют в виде характеристик, т.е. значений, соответствующих физических величин в виде принятых для них единиц измерения. Числовые значения представляют как отношение значения физической величины к единице ее измерения, т.е. безразмерным числам.

Структурно-механические характеристики (СМХ) качественно и количественно определяют поведение продукта в условиях напряженного состояния и позволяют связать между собой напряжения, деформации или скорости деформаций в процессе приложения усилий. Они не являются «чистыми» константами материала и зависят от формы и размеров тела, скорости нагружения, состояния поверхности, воздействия окружающей среды, температуры, струк-

туры и множества других факторов. При известных величинах характеристик можно вычислить значения напряжений и деформаций и в итоге получить необходимые параметры процесса или аппарата, выполнить прочностные и технологические расчеты. То есть, структурно-механические характеристики пищевых материалов выступают как объективный показатель какого-либо воздействия. Кроме того, свойство продукта как объективная реальность позволяет охарактеризовать его качество.

Основные структурно-механические свойства пищевых материалов. Структурно-механические свойства по виду приложения силы (нагрузки, напряжения) к продукту, разделяют на три связанные между собой группы: сдвиговые, компрессионные и поверхностные.

К основным сдвиговым реологическим свойствам материалов относятся – предельное напряжение сдвига θ_0 , Па·с, эффективная вязкость $\eta_{эф}$, Па·с, пластическая вязкость η , Па·с, период релаксации τ_p , с.

Они представляют группу свойств, которые наиболее полно отражают внутреннюю сущность материала (объекта) и поэтому их принято считать основными. С их помощью рассчитывают течение материалов в технологических трубопроводах, рабочих органах машин и аппаратов, определяют необходимые усилия для перемещения продукта. Кроме того, они позволяют судить о качестве продукта и степени его обработки, т.е. дают возможность обосновать оптимальные технологические и механические условия процесса, а приборное оснащение позволяет их контролировать и регулировать, обеспечивая постоянное и стабильное качество.

К основным компрессионным (объемным) свойствам материалов относятся: модуль упругости первого рода E , Па; модуль упругости второго рода G , Па, равновесный модуль E_R , Па; период релаксации деформации при постоянном напряжении τ_σ , с, относительная деформация ε ; объемная относительная деформация ε_V ; плотность ρ , кг/м³.

Эти характеристики используются для расчета процессов шприцевания, формования, дозирования, транспортирования по трубопроводам и др., а также для оценки качества продуктов.

К основным поверхностным свойствам относятся – адгезия p_0 Па, липкость p_l , Па, коэффициент внешнего трения f .

Они характеризуют усилие при взаимодействии материалов между поверхностями контакта (адгезию) при нормальном отрыве или сдвиге, которое определяют методом отрыва. При этом, отрыв пищевых материалов друг от друга может быть адгезионным, когезионным и адгезионно-когезионным (смешанным).

Сдвиговые свойства пищевых материалов

Сдвиговые свойства представляют особую группу структурно-механических свойств. Их величины можно использовать для самых различных целей, начиная от оценки дисперсности систем и качества продуктов до расчета машин и аппаратов.

Для описания течения дисперсных систем широкое распространение получило уравнение Гершеля-Балкли, связывающее напряжение сдвига с тремя константами продукта:

$$\theta = \theta_0 + B_1 \cdot \dot{\gamma}^n, \quad (3.1)$$

- где θ_0 – предельное напряжение сдвига, Па;
- B_1 – коэффициент, пропорциональный вязкости, Па·с;
- $\dot{\gamma}$ – градиент скорости (du/dr) или скорость деформации сдвига (dy/dr), с⁻¹;
- n – индекс течения;
- u – скорость движения элементарного слоя, м/с;
- r – линейный размер по нормали к вектору скорости, м;
- y – относительная деформация;
- τ – время, с.

П.А. Ребиндер и Н.В. Михайлов делят реологические

тела на жидко- и твердообразные системы в зависимости от характера кривой $\eta_{эф}(\theta)$ и периода релаксации τ_r .

Сдвиговые характеристики жидкообразных мясных продуктов. К жидкообразным продуктам (телам) относятся ньютоновские жидкости и структурированные системы, не имеющие статического предельного напряжения сдвига.

Характеристики этих систем описываются вязкостью или эффективной вязкостью и не имеют статического предельного напряжения сдвига. Жидкообразные системы обладают слабой структурной сеткой, которая разрушается при течении в рабочих органах машин с высокими значениями градиентов скорости при изменении температуры. К жидкообразным продуктам относятся: кровь, животные жиры, мясокостный бульон, клеевые и желатиновые бульоны и др.

Вязкость крови. Вязкость крови измеряют с помощью вискозиметра Гепплера и реовискозиметра Ротовиско.

Сдвиговые характеристики твердообразных мясных продуктов. В отличие от жидкообразных, твердообразные и твердые системы имеют сравнительно прочную структуру, которая до начала разрушения характеризуется определенной прочностью (предельным напряжением сдвига, пределом прочности, модулями упругостей, релаксацией и т.д.), а после разрушения – соответствующими сдвиговыми и другими характеристиками. Они определяются выбранной математической моделью тела и ее адекватностью реальным условиям деформирования.

Сдвиговые характеристики продуктов в области практически неразрушенных структур определяют по кинетическим кривым деформации с помощью коаксиально-цилиндрического вискозиметра, сдвиговых приборов с двумя параллельными пластинами, а также различными инденторами (конус, сфера, пластина и т.д.).

Сдвиговые характеристики продуктов в области лавинного разрушения структуры определяют с помощью при-

боров, допускающих сколь угодно большие скорости деформаций, например, ротационные вискозиметры и др. Значения сдвиговых характеристик используют для расчета перемешивания продуктов в рабочих машинах, аппаратах и т.д. Эти характеристики являются наиболее существенными, по сравнению с другими, и более глубоко характеризуют внутреннюю сущность объекта, т.е. его качественные показатели.

Компрессионные свойства пищевых материалов

Объемное или осевое сжатие, а также осевое растяжение являются основными типами механической деформации продуктов, которым они подвергаются в ряде машин шприцах, волчках, прессах, дозаторах и др. При этом продукты находятся при повышенных давлениях, что изменяет их первоначальный объем и плотность. На выходе из машины объем, и плотность также могут отличаться. Эти изменения определяют, основываясь на компрессионных характеристиках.

Компрессионные характеристики фарша при объемном сжатии. Для определения деформационного изменения фарша от давления предложено общее уравнение для объемных деформаций вида:

$$\varepsilon = A_\varepsilon \cdot 10^{-4} \cdot p^{0,32} \cdot (1 + B_\varepsilon \lg \tau), \quad (3.2)$$

где A_ε , B_ε – коэффициенты, зависящие от механического, физико-химического состояния мясного фарша, его состава и особенностей исходного сырья;

p – давление, Па;

τ – длительность, с.

Компрессионные характеристики фарша при осевом

сжатии между двумя пластинами. Предлагается величину относительной деформации сжатия ε фарша вычислять по зависимости вида:

$$\varepsilon = [h(\tau) - \Delta] / H_0, \quad (3.3)$$

где $h(\tau) = \omega \cdot \tau$ – абсолютная деформация слоя продукта за время τ , с, при скорости сжатия ω , м/с;

Δ – величина прогиба тензобалки прибора в момент измерения, м;

H_0 – начальная высота слоя продукта, м.

Плотность мяса и мясопродуктов. Плотность, как одно из фундаментальных свойств, является существенной характеристикой при расчете машин и аппаратов и оценке качества продукта. Среднюю плотность продукта ρ , кг/м³, для сравнительно небольшого объема определяют по формуле

$$\rho = m/V, \quad (3.4)$$

где m – масса продукта, кг;

V – объем продукта, м³.

Плотность смеси из нескольких компонентов, когда они не вступают во взаимодействие, при котором меняется состав или объем смеси, вычисляют по формуле

$$\rho = \sum_i c_i \rho_i, \quad (3.5)$$

где c_i – содержание одного из компонентов смеси, кг на 1 кг смеси;

ρ_i – плотность компонента, кг/м³;

i – количество компонентов.

Плотность жидкообразных систем при изменении температуры вычисляют по формуле

$$\rho_t = \rho_c / [1 + \beta_t(t - t_c)], \quad (3.6)$$

где ρ_c – плотность при температуре t_c , $\text{кг}/\text{м}^3$;
 β_t – коэффициент температурного расширения, $1/\text{K}$;
 ρ_t – плотность при более высокой температуре t , $\text{кг}/\text{м}^3$.

Плотность жидкообразных белковых систем (мясной бульон, кровь и др.), содержащих большое количество воды, вычисляют по зависимости

$$\rho_c = \rho_{0t} + ac, \quad (3.7)$$

где ρ_c – плотность при фиксированной температуре t и концентрации c , кг сухого вещества на 1 кг продукта;

ρ_{0t} – плотность при концентрации, равной нулю, и той же температуре, $\text{кг}/\text{м}^3$, (обычно ρ_{0t} равна плотности воды);
 a – эмпирический коэффициент, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Для вязко-пластичных (мясной фарш и др.), кусковых, сыпучих и порошкообразных продуктов плотность зависит от давления, иногда даже в большей мере, чем от температуры. Для конкретного продукта определяется по расчетным зависимостям.

Плотность жидких водно-белковых систем. Ее определяют с помощью пикнометра или ареометра.

Плотность вязко-пластичных и твердообразных продуктов. Для тонкоизмельченных видов колбасного фарша (например, фарш докторской колбасы и сосисок русских) плотность рекомендуется рассчитывать по уравнению вида

$$\rho = 1037 - (290\varphi + 10,5U) + 221g p, \quad (3.8)$$

где φ – жирность, кг жира на 1 кг фарша;

U – влагосодержание, кг влаги на 1 кг сухого вещества фарша.

Влияние технологических факторов на структурно-механические свойства пищевых материалов: температуры, влагосодержания, давления, степени измельчения, продолжительности измельчения

Структурно-механические свойства продуктов не являются постоянными «константами» и в процессах обработки могут существенно изменяться в зависимости от различных технологических факторов, например, температуры, влагосодержания, давления, степени измельчения, продолжительности измельчения и др. Рассмотрим возможность изменения структурно-механических свойств от различных технологических факторов на примере процесса приготовления фарша с последующим наполнением в колбасные оболочки, состоящего из посола, тонкого измельчения, перемешивания и шприцевания.

Особо следует отметить, что в изучение влияния технологических факторов на процесс фаршеобразования существенный вклад внес В.М. Косой, результаты экспериментальных исследований которого представлены в монографии «Совершенствование процесса производства вареных колбас».

Влияние рН фарша. Изучение проводилось в интервале значений pH фарша от 3 до 10. Исследованиями установлено, что при значении pH фарша, равном около 5,0, он имеет наибольшую текучесть, т. е. вязкость и предельное напряжение сдвига имеют наименьшие значения. При изменении pH на единицу в сторону увеличения или уменьшения от данного значения, соответствующего минимуму вязкости, ее величины могут увеличиться до 4-5 раз.

Влияние температуры. Исследования проводились в

диапазоне температур от 2 до 35°C с помощью прибора РВ-8. В качестве объекта исследования выбрали фарши русских сосисок и докторской колбасы. Исследованиями установлено, что повышение температуры фарша от 2 до 35°C ведет к снижению значений всех реологических характеристик, а именно: предельного напряжения сдвига, вязкости и эффективной вязкости при единичной скорости, за исключением темпа разрушения структуры.

Влияние влажности. Исследования проводили на фаршах при изменении относительной влажности W от 0,55 до 0,8 кг на 1 кг общей массы сырого фарша. До необходимой влажности фарш доводили путем добавления воды при куттеровании, либо разбавлением его после куттерования при тщательном перемешивании. Исследованиями установлено, что повышение влажности фарша ведет к значительному снижению структурно-механических свойств - предельного напряжения сдвига, вязкости и эффективной вязкости при единичной скорости.

Влияние продолжительности выдержки. С целью восстановления структуры, после механических воздействий колбасные изделия подвергают осадке, т. е. выдержке в течение определенного времени. Для определения влияния продолжительности осадки на структурно-механические свойства, предварительно нашприцованные колбасные батоны подвергали выдержке от 0 до 125 час.

В первые 2-3 час выдержки фарша величины его сдвиговых характеристик практически неизменны. При выдержке 4-10 час (второй период) сдвиговые характеристики увеличиваются до максимума, Таким образом, время выдержки 4-6 час является критическим, когда заканчивается процесс самопроизвольного восстановления структуры. Дальнейшая выдержка вызывает уменьшение значений всех характеристик, т.е. ведет к ослаблению структуры фарша.

Влияние степени измельчения. Исследования проводили

на говядине высшего сорта, путем многократного пропускания мяса (до 25 раз) через мясорубку с решеткой диаметром отверстий 3 мм.

Исследованиями установлено, что с увеличением степени (кратности) измельчения сырья предельное напряжение сдвига θ_0 существенно изменяется. При кратности измельчения n , равного 7-8, предельное напряжение сдвига уменьшаясь, достигает минимального значения, а при дальнейшем увеличении кратности измельчения ее величина постепенно увеличивается и к концу достигает величины, превышающей ее первоначальное значение.

Влияние продолжительности измельчения. Одной из основных технологических операций при приготовлении колбасного фарша является его механическая обработка, т.е. продолжительность измельчения мяса. Продолжительность измельчения мяса определяет глубину технологической обработки и влияет на форму связи влаги, изменяя структурно-механические свойства.

Изучение влияния продолжительности измельчения на структурно-механические характеристики проводили путем непрерывного измельчения сырья на куттере в течение 25 мин.

Влияние давления. В колбасном производстве большое значение имеют технологические процессы, связанные со шприцеванием, дозированием, формованием, транспортировкой по трубам и т.д. Продукт подвергается действию давления, которое достигает $1 \cdot 10^6$ Па. Поэтому необходимо учитывать влияние давления на структурно-механические свойства продукта.

Объектом исследований являлся фарш русских сосисок, который подвергали в первой серии опытов однократному воздействию давления, а во второй – на одной закладке фарша определяли структурно-механические свойства при последовательном возрастании давления от 0,1 до 1 МПа.

Тема 4: Методы и приборы для измерения структурно-механических свойств пищевых продуктов. Классификация методов и приборов для измерения структурно-механических свойств пищевых продуктов

Для измерения величин структурно-механических характеристик материалов используются различные методы измерения и приборная техника, правильность выбора которых в целом определяют точность и ценность полученных результатов. Поэтому, приступая к исследованиям (испытаниям), необходимо руководствоваться методологией проведения исследований.

Методология исследований базируется на основе общих концепций научного мышления, а именно: диалектико-материалистическом понимании природы самого знания; основных законов научного мышления; способов описания и теоретического выражения законов. Применительно к инженерной реологии методология исследований будет включать следующие этапы:

1. Изучение теории вопроса.
2. Критический анализ существующих исследований в данной области.
3. Проведение предварительных экспериментов с целью проверки прибора, его градуировки. Кроме того, они позволяют уточнить или выбрать математическую модель деформирования и сопоставить полученные данные с результатами других.
4. Разработка теории прибора на основе полученной математической модели деформирования, т.е. интегрирование дифференциальной модели для конкретных начальных и конечных условий, присущих выбранному прибору. Особо следует отметить, что реологические характеристики не являются «чистыми» константами и зависят от формы, размеров, скорости нагружения и др. факторов.

5. Проведение основных экспериментов (испытаний). Их проводят с учетом предыдущих. Особое внимание должно быть уделено отбору проб образцов, который должен проводиться строго в соответствии с общепринятой методикой измерения.

6. Обработка результатов экспериментов (испытаний). При этом следует помнить, что точность вычислений, особенно касается представления конечных данных, должна быть соизмерима с ошибкой экспериментов. Обычно считают, что для малоструктурированных систем и ньютоновских жидкостей ошибка не должны превышать $\pm 3\%$, а для пластично-вязких продуктов $\pm 10\%$.

7. Проверка. Ее выполняют путем расчета характеристик по полученным формулам.

8. Направления по использованию (применению) результатов исследований на практике.

В отдельных случаях перечень может быть изменен в большую или меньшую сторону в зависимости от поставленной задачи.

Для измерения структурно-механических свойств пищевых продуктов применяются следующие методы измерения:

1. Метод постоянной нагрузки. Он основан на измерении характеристик материала при приложении к нему постоянной нагрузки.

2. Метод постоянной скорости сдвига. Он основан на измерении характеристик материала при приложении к нему постоянной скорости сдвига.

3. Метод постоянной силы нагружения. Он основан на измерении величин во время воздействия подвижной частью прибора с неизменной массой.

4. Метод энергии деформирования. Он основан на расчете площади, расположенной под кривой деформирования.

Показания измеряемых величин, в зависимости от конструкции прибора, может проводиться на применении инте-

грального или дифференциального методов. Первый метод измерения позволяет определить значения характеристик в любой момент времени. Второй выражает значения величин, давая только конечный, суммарный эффект измерения.

Приборы, применяемые для измерения структурно-механических свойств пищевых продуктов (материалов), классифицируют по следующим признакам.

По назначению. Приборы разделяют на четыре группы: промышленные, лабораторные, приборы для углубленных исследований в лабораторных условиях и приборы для научных целей. Приборы первой группы устанавливаются непосредственно на технологических машинах и регистрируют свойства материалов в потоке. Приборы второй группы, в производственных лабораториях предприятий предназначены для проведения ускоренного контроля за технологическими процессами. Приборы третьей группы, предназначены для углубленных испытаний и устанавливаются в лабораториях головных предприятий. Приборы четвертой группы, применяются в научно-исследовательских центрах и используются для испытаний материалов в различных условиях. Они отличаются высокой точностью измерения и достаточно значительной продолжительностью проведения испытаний.

По выражению результата измерения. Приборы делятся на абсолютные, относительные и условные. Приборы первой группы показывают численные значения свойств в абсолютной системе единиц, основываясь на геометрических размерах рабочего органа и условиях проведения опыта. Приборы второй группы требуют предварительной тарировки на эталонном материале, в результате получают безразмерные, относительные показатели, которые затем с помощью тарировочных графиков пересчитывают в абсолютные значения величин. Приборы обеих групп теоретически обоснованы. На приборах третьей группы значения измеря-

емых величин выражаются в условно принятых единицах либо баллах, полученные значения непригодны для расчетов и используются, главным образом, для сравнения каких-либо качественных показателей в узком диапазоне.

В зависимости от показа результата измерения приборы условно разделяют на интегральные и дифференциальные.

По функциональному признаку. Классификация приборов по данному признаку предложена Б.М. Азаровым и В.А. Аретом, согласно которой они разделены на 40 видов.

Описанные выше классификации методов и приборов могут в дальнейшем дополняться, а также видоизменяться.

Современные производства мясной, рыбной, молочной и других отраслей пищевой промышленности, включающих в себя проведение множества различных технологических процессов, требуют применения приборов для измерения свойств сырья на этапах его поступления и переработки с целью контроля, регулирования и управления показателями сырья и готовой продукции.

Приборы для измерения сдвиговых свойств продуктов

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

Для измерения сдвиговых свойств пищевых материалов применяются приборы, позволяющие определить силу сопротивления внутри материала при относительном смещении его слоев. Приборы для измерения сдвиговых свойств пищевых материалов по принципу действия делятся на следующие группы: капиллярные, ротационные, пенетрометры, приборы с плоскопараллельным смещением пластин и др.

Капиллярные вискозиметры. Они применяются для измерения вязкости ньютоновских и неньютоновских жидкообразных систем, не имеющих статического предельного напряжения сдвига, т.е. обладающие текучестью при любых напряжениях сдвига.

Теория капиллярных вискозиметров теоретически обоснована и основывается на гипотезе сплошности и непрерывности жидкости; использует следующие допущения и ограничения: скорость жидкости на стенке принимается равной нулю; продукт считается не сжимаемым; реологические характеристики неизменны по длине и не зависят от времени, т.е. на течение не оказывают влияния на процессы тиксотропии, реопексии и релаксации.

Главным требованием, предъявляемым к капиллярным вискозиметрам, является отсутствие турбулизации потока, т.е. режим движения должен быть ламинарным или структурным. Режим движения характеризуется критерием Рейнольдса Re , который не должен превышать 150, а длительность истечения жидкости через капилляр не должна быть меньше 100 с. В теории капиллярной вискозиметрии рассматривается только равномерное (силы инерции равны нулю) прямолинейное (центробежные силы равны нулю) движение жидкости в горизонтальной трубке (силы тяжести проектируются на ось, совпадающую с направлением движения и равны нулю).

Наиболее известны и широко применяются: капиллярные вискозиметры Уббелодде и Освальда, вискозиметр А.В. Горбатова и др., вискозиметр ВК-4, автоматические вискозиметры АКВ-3 и АКВ-5, шариковый вискозиметр Гепплера и др.

Вискозиметры Уббелодде и Освальда (рис. 4.1 а, б) представляют собой U-образные стеклянные трубки (1), в одно колено которых впаян капилляр (2) и двух шариков: шарика (3) для начального накопления исследуемой жидкости и шарика (4) для сбора протекшей через капилляр жидкости. Диаметр капилляра может быть от десятых долей до 2-3 мм. Длину капилляра выбирают такой, чтобы перетекание жидкости из одного шарика в другой происходило за время не меньше 100 с.

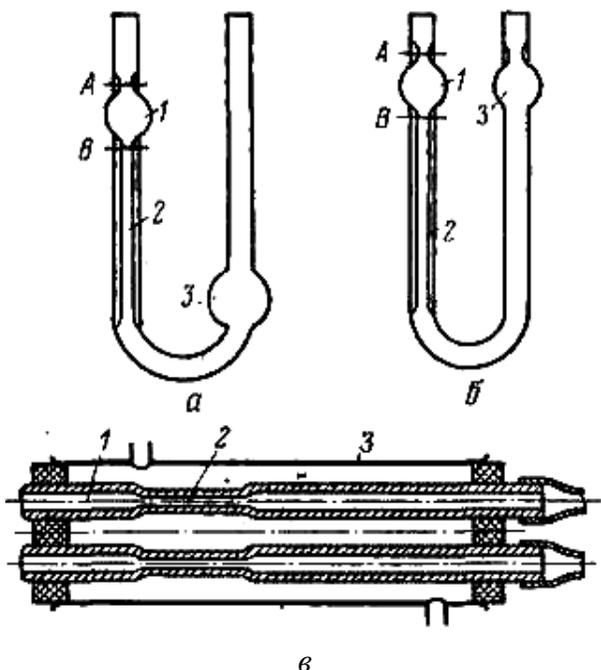


Рис. 4.1. Капиллярные вискозиметры: а) вискозиметр Уббелоде; б) вискозиметр Освальда; в) вискозиметр ВК-4

Перед измерением исследуемая жидкость заливается в шарик (1) до уровня между метками А и В. Затем прибор в вертикальном положении погружают в жидкостной термостат до уровня выше шарика (1) и выдерживают 20-30 мин при заданной температуре. После этого, освобождая края трубки от закрытия, дают жидкости свободно перетекать из шарика (1) в шарик (3), одновременно с помощью секундомера фиксируя время ее перетекания. Перетекание исследуемой жидкости из одного шарика в другой происходит в вискозиметре Уббелоде (рис. 4.1 а) за счет гидростатического давления, а Освальда (рис. 4.1 б), за счет создания давления или вакуума на одном конце трубки. Вязкость на приборах Уббелоде и Освальда обычно определя-

ют по отношению к известной вязкости стандартной жидкости (вода, касторовое масло, глицерин).

Вязкость η , Па·с, исследуемой жидкости рассчитывают по формуле

$$\eta = \eta_0 [\rho\tau / (\rho_0\tau_0)], \text{ или } \eta = K\rho\tau, \quad (4.1)$$

где η_0 – вязкость воды, Па·с;

ρ , ρ_0 – плотности исследуемой жидкости и воды соответственно, кг/м³;

K – константа прибора, дается в паспорте прибора.

Горизонтальный вискозиметр ВК-4 (рис. 4.1 в) предназначен для измерения вязкости крови и имеет две калиброванные трубки (1). Каждая трубка состоит из двух капилляров с миллиметровой шкалой, которые служат резервуаром для жидкости. Между ними помещен узкий измерительный капилляр (2). Для термостатирования исследуемой жидкости обе трубки помещены в широкую стеклянную трубу (3), закрытую с торцов пробками, через которые выходят трубки. В трубу подается термостатирующая жидкость с конкретным значением температуры. Его конструкция позволяет исключить поправки на гидростатическое давление столба жидкости.

Вискозиметры ВПЖ-1, ВПЖ-2, ВПЖ-4 предназначены для определения вязкости желатина. Они схожи по конструкции с вискозиметрами Уббелюде, но отличаются формой и количеством колен трубок.

Для получения правильных результатов измерения на капиллярных вискозиметрах необходимо соблюдать: во-первых, движение жидкостей по капиллярам должно быть ламинарным и не превышать число Рейнольдса 150, и во-вторых, условия проведения эксперимента должны быть для всех испытаний одинаковыми, особенно температурные.

Шариковый вискозиметр Гепплера (рис. 4.2), предназначен для определения динамической вязкости ньютоновских и слабоструктурированных жидкостей. Он состоит из прецизионной стеклянной трубки (1), шарика (2), цилиндра (3) для термостатирования жидкости, термометра (4), ватерпаса (5), оси (6) для поворота термостата на 180° и подставки (7).

В вискозиметре, используется метод измерения вязкости с помощью свободно падающего шарика в трубе заполненной исследуемой жидкостью.

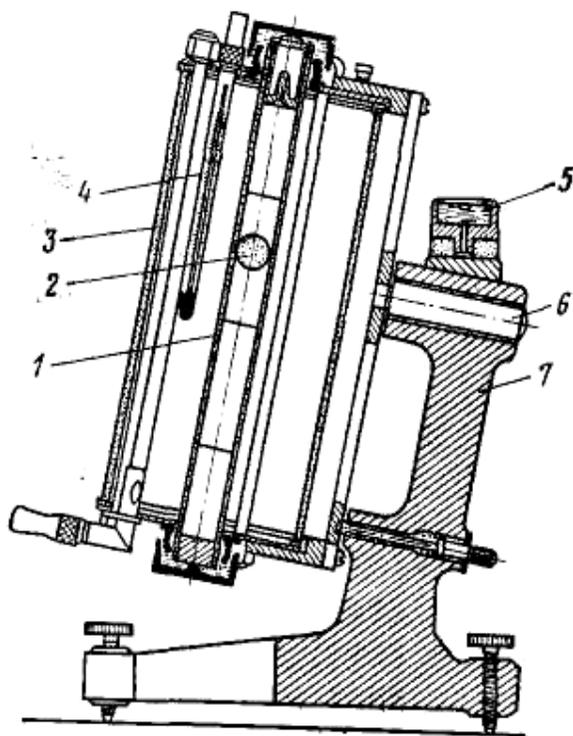


Рис. 4.2 Шариковый вискозиметр Гепплера

В начале измерений, в прецизионную трубку заливается 30 см^3 исследуемой жидкости. В нее опускается один из

шариков, которыми укомплектован прибор, предварительно выбранный с учетом вязкости жидкости. Выбор шарика проводится с учетом следующего требования, что расстояние между крайними отметками шарик должен проходить в интервале 30-300 с. Затем, исследуемая жидкость повергается темперированию в течение 10 мин. Во время перемещения шарика сверху вниз через исследуемую жидкость отмечают время, за которое он пройдет расстояние между верхней и нижней метками. Для повторного измерения термостатирующий цилиндр поворачивают на 180°.

Динамическую вязкость η , Па·с, рассчитывают по формуле

$$\eta = K(\rho_{ш} - \rho_{ж})\tau, \quad (4.2)$$

где $\rho_{ш}$, ρ – плотность материала шарика и исследуемой жидкости соответственно, кг/м³;

τ – время перемещения шарика на участке между метками, с;

K – константа прибора (дается в паспорте прибора).

В качестве стандартной жидкости могут использоваться вода, касторовое масло, глицерин.

Прибор не пригоден для измерения вязкости структурированных систем и систем, которые имеют предельное напряжение сдвига. Его трудно использовать для мутных, непрозрачных и содержащих твердые частицы систем.

Ротационные вискозиметры. Они предназначены для измерения сдвиговых характеристик высоковязких, вязкопластичных и т.п. систем. Широко применяются в производственных лабораториях пищевых предприятий, в учебных заведениях, в научно-исследовательских институтах, центрах. Вискозиметры используют для контроля качества сырья, полуфабрикатов и готовой продукции, а также для

контроля технологических процессов. Ротационные вискозиметры обладают большей универсальностью по сравнению с капиллярными, так наряду с вязкостью и предельным напряжением сдвига позволяют измерять другие реологические характеристики.

Теория ротационной вискозиметрии опирается на те же допущения и ограничения, которые были рассмотрены в теории капиллярной вискозиметрии, а именно: гипотезы сплошности и непрерывности; скорость жидкости на стенке неподвижного цилиндра равна нулю; 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.

Ротационные вискозиметры по методу проведения испытаний разделяют на две группы: первая - для испытания материалов с постоянной скоростью деформации; вторая - для испытания материалов с постоянным напряжением сдвига. Для приборов первой группы крутящий момент определяется по углу закручивания упругой нити, на которой подвешен внутренний вращающийся цилиндр. У приборов второй группы ротор установлен в шарикоподшипниках и его вращение обеспечивается падающими грузами. При расчете крутящего момента из общей силы, создаваемой массой падающих грузов, вычитается сила трения. Конструкция и эксплуатация вискозиметров второй группы проще, поэтому они получили более широкое применение для измерения структурно-механических характеристик вязко-пластичных материалов.

Основным измерительным органом ротационных вискозиметров является рабочая пара, состоящая из неподвижного элемента, чаще всего называемого стаканом или цилиндром, и подвижного, вращающегося элемента называемого ротором. При этом ротор находится внутри стакана и

между их коаксиальными поверхностями имеется зазор. Во время испытаний исследуемый материал укладывается в зазор между стаканом и ротором. Практически у большинства ротационных вискозиметров рабочие поверхности измерительных органов выполнены коаксиальными, т.е. строго параллельными.

Ротационные вискозиметры отличаются формой измерительных органов (рис. 4.3), которая может быть различной: коаксиально-цилиндрической (а, б); сферической (в); полусферической (г); конусной (д); плоско-параллельными пластинами (е); плоскими кольцами (ж); коническими кольцами (з); комбинированной: цилиндр-диск (и), цилиндр-полусфера (к), конус-диск (л), цилиндр-конус (м), цилиндр-конус-диск (н) и другими.

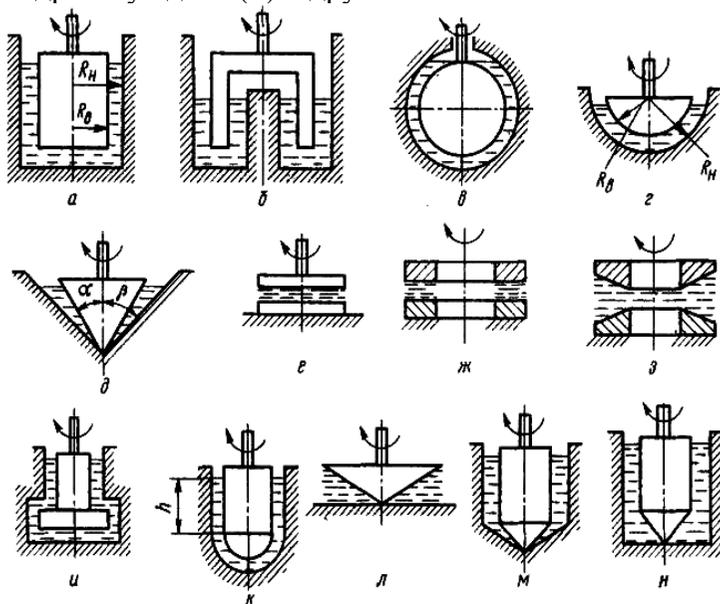


Рис. 4.3. Формы измерительных органов ротационных вискозиметров

Вискозиметр Воларовича РВ-8 (рис. 4.4). Он предназначен для испытания вязких, вязко-пластичных материалов и

используется для определения вязкости и предельного напряжения сдвига широкого круга пищевых материалов: мясных и рыбных фаршей, мучного теста, кондитерских масс и т.д.

Прибор состоит из шкива (1), вертикального вала (2), двух перекидных блоков (3) закрепленных на штангах, электронагревательных элементов (4), вращающего ротора (5) коаксиально-цилиндрической формы с полусферическим дном, наружного неподвижного стакана (6), термостатирующего сосуда (7) с теплоизоляцией (8), фиксатора (9), неподвижной шкалы (10) и стрелки (11).

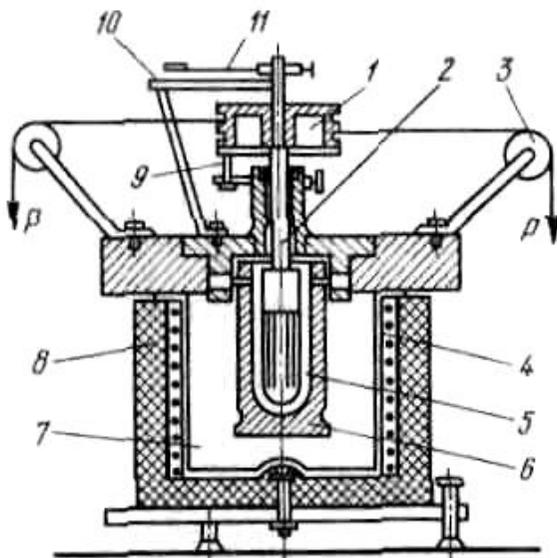


Рис. 4.4. Ротационный вискозиметр РВ-8

Принцип работы прибора. Вначале исследуемый продукт (мясной фарш) помещают в стакан в количестве равном $2/3$ объема образующего зазора между ротором и стаканом. Затем стакан с продуктом подводят под ротор, постепенно поднимают вверх и фиксируют в специальной обойме. После измерительные органы прибора и сам мате-

риал погружаются в термостатирующий сосуд, где подвергаются выдержке в течение 10-20 мин.

Перед началом проведения измерений нити с закрепленными чашечками должны быть намотаны на шкив, сам шкив зафиксирован стопорным устройством, а стрелка установлена на начало шкалы отсчета.

Для определения предельного напряжения сдвига материала на чашечках, закрепленных на концах нитей, с помощью гирек разновесов устанавливают определенный вес и отводят стопорное устройство, освобождая шкив от фиксации. Если стрелка прибора не начала перемещаться, то к весу, который находится в чашечках, добавляют еще. Так продолжают делать до тех пор, пока стрелка не начнет перемещаться. В случае начала перемещения стрелки производят фиксирование массы грузов, одновременно находящихся в обеих чашечках. По результатам измерения рассчитывают предельное напряжение сдвига.

Для определения вязкости материала в чашечки кладется груз, массой несколько больше, чем при котором только началось перемещение стрелки, убирают стопорное устройство, и с помощью секундомера измеряют время, за которое шкив (т.е. ротор) совершит пять полных оборотов. Затем к данной массе добавляют еще груз и вновь повторяют измерение. Так делают до тех пор, пока время, за которое шкив совершит пять оборотов, не станет равным 1,5-2 с. После все повторяют, но только в обратном направлении в сторону уменьшения массы грузов. По результатам измерений рассчитывают вязкость материала.

Для получения правильных значений измеряемых величин необходимо помнить, что степень измельчения сырья должна быть такой, чтобы в зазор между ротором и стаканом входило минимум две частицы исследуемого продукта. В противном случае сдвига как такого между слоями продукта не будет.

Предельное напряжение сдвига θ_0 , Па, на приборе РВ-8 рассчитывают по формуле

$$\theta_0 = K_0 \cdot m_0, \quad (4.3)$$

где K_0 – константа прибора, для случая сдвига;
 m_0 – масса грузов, при которой начинается сдвиг, кг.

Эффективную вязкость $\eta_{эф}$, Па·с, рассчитывают по формуле

$$\eta_{эф} = K \cdot m / N, \quad (4.4)$$

где K – константа прибора, для случая определения вязкости;

m – масса грузов вращающих ротор, за вычетом массы трения, кг;

N – частота вращения ротора, об/с.

Константы прибора K_0 и K рассчитывают по формулам, которые приведены в лабораторном практикуме.

Ротационный вискозиметр МТИММПа (МАПБ). Прибор (рис. 4.5) создан на базе вискозиметра РВ-4 и предназначен для измерения реологических характеристик вязкопластичных материалов при повышенном давлении.

Прибор смонтирован на подставке (1). Состоит из двух перекидных блоков (2) для нитей, шкива (3), хвостовика (4), вращающего рифленого ротора (5), тензометрических датчиков (6), неподвижного рабочего цилиндра (7), краника (8) для удаления излишков продукта, поршня (9), манометра (10) и мембраны (11) для измерения давления.

Работа прибора. Вначале фаршем заполняют пространство между ротором и стенками цилиндра. Затем перемещающая поршень с помощью гайки, создают внутри объема с

продуктом требуемое давление. Далее устанавливают грузики на чашечки и производят замер времени по количеству оборотов шкива. Диаметр ротора равен 32 мм, внутренний диаметр рабочего цилиндра – 38 мм.

Используя те же самые формулы, что и для прибора РВ-8, рассчитывают предельное напряжение сдвига и вязкость продуктов.

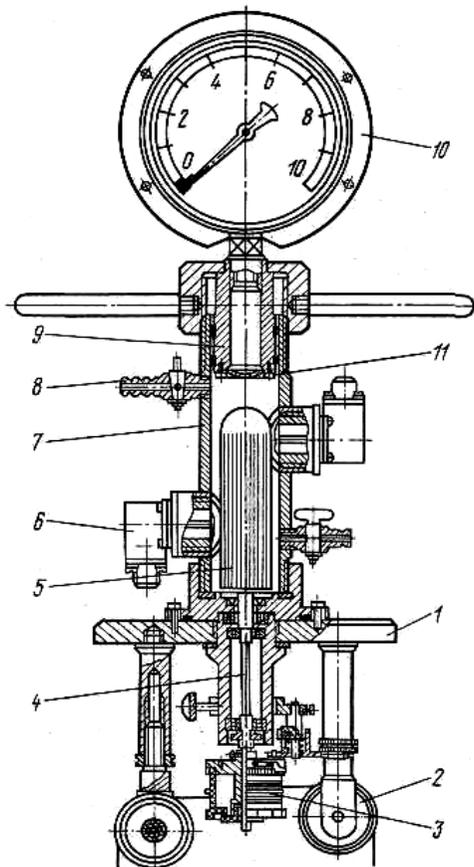


Рис. 4.5 Ротационный вискозиметр МТИММПа (МАПБ)

Данный вискозиметр при незначительных конструктивных изменениях в приборе может использоваться и для

определения реологических характеристик пищевых материалов под вакуумом. Для создания вакуума в приборе требуется дополнительно вакуум-насос.

Среди приборов зарубежных фирм представляют интерес ротационные вискозиметры «Реотест RV», «Реотест RN» производства Германии и др.

Ротационные вискозиметры «Реотест» предназначены для определения сдвиговых свойств пищевых продуктов в широком диапазоне, в частности для измерения вязкости и предельного напряжения сдвига для средне- и высоковязких продуктов.

Ротационный вискозиметр «Реотест-RV». Прибор (рис. 4.6) смонтирован на станине (1), внутри которой установлен синхронный электродвигатель, соединенный с 12-ступенчатой коробкой передач, которая позволяет изменять частоту вращения внутреннего цилиндра 16 от 0 до 1500 с^{-1} . Крутящий момент от коробки передач передается ведущему валу (9) и далее через спиральную пружину (10) ведомому валу (12), соединенному с внутренним цилиндром (16) муфтой (14). Наружный цилиндр (15), крепится к корпусу прибора специальным зажимом (5). Прибор имеет термостатирующий сосуд (17), который снабжен термометром (13) и крепится к корпусу с помощью зажима (2). Величина крутящего момента отсчитывается по шкале прибора (6), скорость вращения устанавливается рычагом (3) и контролируется по указателю (4).

В приборе установлен измеритель моментов торсионного типа с омическими датчиками и работает по принципу превращения механических усилий в электрические импульсы. Показания прибора (6) прямо пропорциональны крутящему моменту, а также напряжению сдвига и вязкости исследуемого материала. Частота вращения синхронного электродвигателя и, следовательно, внутреннего цилиндра (16), зависит от напряжения тока в сети. Отклонения от номинальной частоты 50 Гц фиксируется прибором (7).

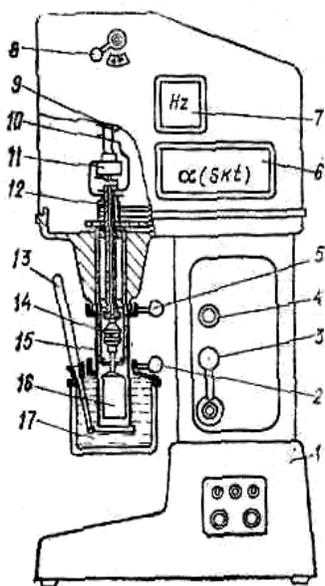


Рис. 4.6 Ротационный вискозиметр «Реотест-RV»

Ротационный вискозиметр типа RN. Прибор (рис. 4.7) выпускается фирмой «Прюфгеретевеке» (Германия) и 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, на которой цифрам 1, 2, 4 и 10 соответствуют следующие частоты вращения ротора (в мин^{-1}): 160, 80, 40 и 16. Изменение скорости вращения ротора может производиться как при остановке, так и во время работы прибора.

Температура в термостате контролируется термометром (7). Ротор (3) соединяется с валом прибора с помощью муфты (6) и фиксируются гайкой (5). Наружный неподвижный цилиндр (18) расположен соосно с ротором (3) и

крепится зажимным рычагом (16). Для очистки прибора от продукта днище неподвижного цилиндра (18) выполнено съемным, в виде крышки (1) с прокладкой и запорной гайкой (2). Термостатирующий сосуд (17) соединен с цилиндром (18) байонетным запором и фиксируется прижимным рычагом (4). Нижнее положение прибора на штативе (11) ограничивается упором (14).

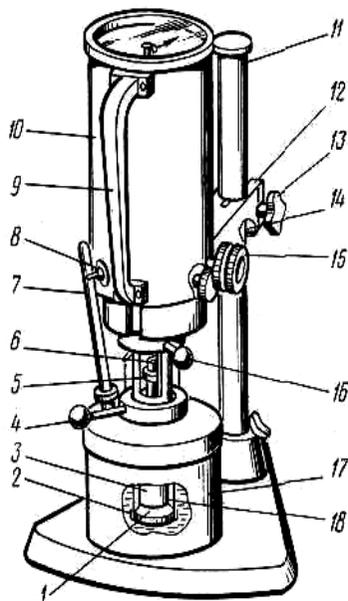


Рис. 4.7. Ротационный вискозиметр типа RN (Германия)

Для расширения диапазона измерения вязкости вискозиметры RN поставляются с тремя съемными измерительными системами, состоящими из цилиндров разного диаметра и длины.

Приборы с плоскопараллельным зазором. Они служат для измерения сдвиговых характеристик материалов в области практически неразрушенных структур при малых деформациях: предельного напряжения сдвига, вязкости,

упругости, периода релаксации и др. Приборы такого типа впервые были разработаны П.А. Ребиндером, Д.М. Толстым, Б.А. Николаевым. В приборах плоскопараллельный зазор может быть расположен вертикально, горизонтально или наклонно.

Прибор С.Я. Вейлера и П.А. Ребиндера с вертикальным зазором. Прибор (рис. 4.8 а) состоит из пластины (1), кюветы (2), микрошкалы (4), груза (5) и снабжен микроскопом (3).

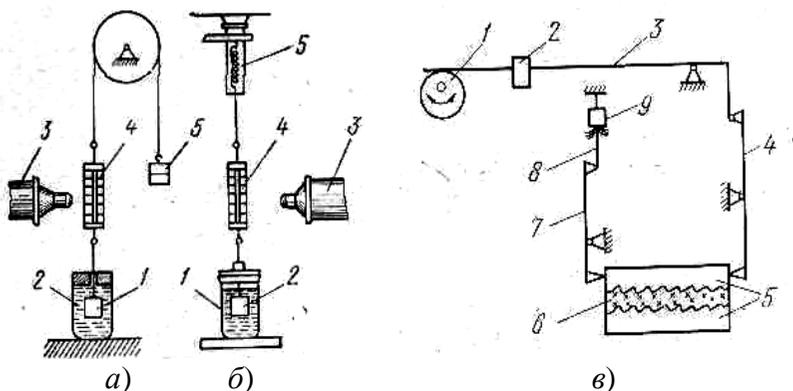


Рис. 4.8. Приборы с плоскопараллельным зазором: а) прибор С.Я. Вейлера и П.А. Ребиндера; б) его модификация; в) прибор Д.М. Толстого

Испытания проводятся следующим образом. Кювета с плоскопараллельным зазором заполняется исследуемым продуктом. В нее посередине вставляют пластину, соединенную с грузом через блок нитью, на которой закреплена микрошкала, отградуированная в десятых или сотых долях миллиметра. Напротив нее устанавливают микроскоп для наблюдения за деформацией сдвига. Груз состоит из двух частей, одна из которых уравнивает пластину, вторая - рабочая. В момент испытаний наблюдатель включает секундомер. Груз перемещает пластину, а величину смещения, соответствующую деформации сдвига, наблюдают через микроскоп и измеряют по микрошкале. После некото-

рой выдержки и испытания продукта под напряжением, в результате действия которого развиваются упругие и пластические деформации в продукте, рабочую часть груза снимают. Пластина и груз уравниваются, вследствие чего развиваются деформации упругого последствия, их регистрируют до момента остановки указателя на шкале измерений.

Его модификацией является прибор (рис. 4.8 б), в котором пластину в кювете сдвигают, путем опускания столика с закрепленной на нем кюветой. Испытываемое продуктом напряжение определяют по величине растяжения пружины.

Напряжение сдвига θ , Па, определяют по деформации пружины и рассчитывают по формуле

$$\theta = P/(2F), \quad (4.5)$$

где P – нагрузка, соответствующая деформации, Н;
 F – площадь боковой поверхности пластины, м².

Предельное напряжение сдвига θ_0 , Па, определяют по наибольшей нагрузке P_{max} :

$$\theta_0 = P_{max}/(2F). \quad (4.6)$$

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 $\dot{\gamma}(\theta)$ при различных скоростях деформации. Приборы обладают большой чувствительностью и применимы для исследования свойств материалов в большом диапазоне – от слабоструктурированных зелей и суспензий до твердообразных систем с высокопрочной структурой.

Прибор Д.М. Толстого (рис. 4.8 в). Он служит для

нахождения констант упруго-пластично-вязких свойств материалов с практически неразрушенными структурами. Основными элементами прибора являются две пластины (5), между которыми помещается образец продукта (6). Размеры пластин $0,05 \times 0,02 \times 0,006$ м. Плоскости пластин, примыкающие к продукту, имеют рифление, направленное в сторону, противоположную направлению усилий, деформирующих продукт. Деформацию образцов продукта измеряют при помощи упругой балочки (8), с наклеенными на нее тензорезисторами (9). Сдвигающее усилие на образец создают поворотом эксцентрика (1), гирями (2), которые устанавливают на неравноплечем рычаге (3) прибора. От него усилие на продукт передается через равноплечий рычаг (4) и верхнюю пластину (5). Перемещение верхней пластины (5) через рычаг (7) упругой балочке (8). Во время испытаний необходимо учитывать, чтобы толщина слоя позволяла одновременно находиться минимум двум частицам материала.

На приборе определяют модуль быстрой эластичной деформации сдвига G_1 , Па, модуль медленной эластичной деформации G_2 , Па, наибольшую пластическую вязкость η'_0 , Па·с и условный статический предел текучести θ_{T1} , Па, которые рассчитывают по формулам:

$$G_1 = \theta \cdot h / \Delta h_0; G_2 = \theta \cdot h / (\Delta h_m - \Delta h_0); \eta'_0 = (\theta - \theta_T) / \dot{\gamma}, \quad (4.7)$$

где θ – напряжение сдвига, Па;

θ_T – условный статический предел текучести, Па;

h – толщина слоя продукта, м;

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

Δh_m – эластичная деформация, м;

$\dot{\gamma}$ – скорость сдвига, c^{-1} .

Пластометры, пенетрометры, консистометры. Эта

группа приборов служит для измерения сдвиговых характеристик в области практически не разрушенных структур при малых деформациях, которые в дальнейшем используются для оценки прочности, нежности, консистенции материалов. В приборах в качестве рабочего органа (тела), внедряемого в продукт, является индентор, который может быть различной формы: конус, сфера, игла, цилиндр и пр.

Пенетрацией называется метод исследования структурно-механических свойств полутвердых и твердых продуктов путем определения сопротивления продуктов проникновению в них инденторов со строго определенными размерами, массой и материалом при точно определенной температуре и за определенное время. Испытания могут проводиться: с постоянным усилием пенетрации (при этом определяется глубина погружения); с постоянной глубиной погружения (измеряется усилие); с постоянной скоростью погружения (регистрируется усилие в зависимости от глубины погружения).

Приборы, использующие метод пенетрации для измерения структурно-механических свойств продуктов, принято называть пластометрами, пенетрометрами и консистометрами.

Предельное напряжение сдвига, как одна из важных реологических характеристик материала, служащих для оценки прочности его структуры, определяется при помощи конического пластометра.

Метод погружения конуса для измерения структурно-механических свойств вязко-пластичных тел предложен П.А. Ребиндером и Н.А. Семененко.

Согласно теории конических пластометров, разработанной акад. П.А. Ребиндером, процесс погружения конуса в продукт представляет следующее. За начальное граничное условие принята точка касания вершины конуса с поверхностью продукта. При этом его движение во время

испытаний должно быть строго вертикальным. Кинетика погружения конуса характеризуется кривой и представлена на рис. 4.9. В момент начала погружения конуса в продукт напряжение бесконечно велико (площадь касания равна нулю), его скорость равна нулю, а ускорение ($a=d^2h/dt^2$) соответствует ускорению силы тяжести. Поскольку сила, действующая на конус (равна массе подвижных частей системы), за все время погружения остается постоянной, а площадь соприкосновения конуса с продуктом увеличивается, то напряжение сдвига в системе конус-продукт уменьшается.

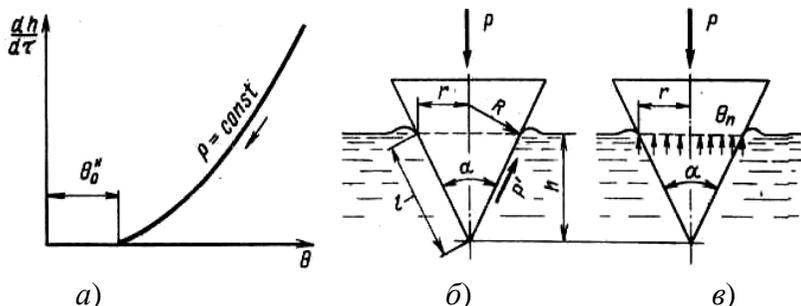


Рис. 4.9 Реограмма и схемы для расчета: а) зависимость скорости движения конуса от напряжения сдвига; б) схема для расчета предельного напряжения сдвига, в) схема для расчета предельного давления.

При остановке конуса ($dh/dt=0$) погружение будет предельным, и внешняя сила уравнивается пластической прочностью структуры. Для этого случая отсчитывается предельное напряжение сдвига (отношение силы у «смоченной» части боковой поверхности конуса, рис. 4.9 б) или предельное давление (отношение силы к горизонтальной площади сечения конуса, которое проходит по поверхности продукта, рис. 4.9 в). Выталкивающей силой продукта (Архимедова сила) пренебрегают вследствие ее малости. Если снять полную кривую течения (рис. 4.9 а), то можно

вычислить изменения эффективной вязкости. Однако прибор для этих целей обычно не используют.

При определении предельного напряжения сдвига предполагается, что продукт течет вдоль образующей поверхности конуса (рис. 4.9 б). Условия равновесия сил на поверхности конуса получим, проектируя на образующую конуса l движущую силу P и приравнявая ее силе сопротивления P' :

$$P' = P \cos(\alpha/2). \quad (4.8)$$

Предельное напряжение сдвига θ_0^H , Па, представляет собой отношение силы сопротивления P' вдоль боковой поверхности конуса к площади F этой поверхности:

$$\theta_0^H = P' / F = P \cdot \cos(\alpha/2) / \pi \cdot r \cdot l = K_\alpha \cdot m \cdot g / h^2, \quad (4.9)$$

где K_α – константа конуса;

α – угол при вершине конуса, град;

m – масса конуса, кг;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

h – глубина погружения конуса в продукт, м.

Константу конуса принимают по данным Н.Н. Аграната:

α , град	30	40	45	60	89,33	90
K_α	0,958	0,530	0,417	0,214	0,0836	0,00683

Продолжительность испытания составляет 180 с.

Конический пластометр КП-3. Прибор разработан М.П. Воларовичем и предназначен для определения предельного напряжения сдвига различных материалов, в том числе мясных фаршей и готовых мясных изделий.

Значительный вклад в развитие конических пластомет-

ров внесли ученые В.Д. Косой, А.В. Горбатов и др. (МАПБ), которыми разработан целый ряд пластометров типа ПП-1, ПП-2, ПП-3, ПП-3М для исследования структурно-механических свойств вязко-пластичных материалов, в которых используется конический индентор. Приборы обладают достаточно высокой точностью измерений, компактны, надежны в работе и просты в обслуживании, имеют небольшую массу.

Полуавтоматический пластометр ПП-3М (рис. 4.10). Прибор состоит из корпуса с расположенным внутри него штоком (14) с индентором (18) в нижней части и демпфирующим элементом, представляющим собой цилиндр (13) с поршнем (12) – верхней части. Индентор (18) устанавливается в верхнем положении с помощью ручки (16) и фиксатора (17). Механизм регистрации перемещений индентора состоит из двух цилиндрических барабанов (6), (20), установленных на оси (5) с возможностью вращения. Первый цилиндрический барабан (6) соединен со штоком (14) посредством рычага (8), имеющего противовес (7), для балансировки механизма регистрации во время измерения. Первый цилиндрический барабан (6) снабжен контактной пластиной (3) из упругого магнитного материала, а второй цилиндрический барабан (20) – стрелкой (9) для регистрации величины перемещений индентора по шкале отсчета (10) и электромагнитом (4), установленным с возможностью воздействия на контактную пластину (3) при замыкании электрической цепи во время контакта индентора (18) исследуемым продуктом. Одновременно электромагнит (4) обеспечивает разбалансировку первого цилиндрического барабана (20), необходимую для возврата стрелки (9) в исходное положение при подъеме индентора (18). Тумблеры включения и выключения питания, ручки и контрольные лампочки расположены на передней панели прибора (21).

Во время испытания исследуемый продукт, например

мясной фарш, помещают в емкость (19) и устанавливают под индентором (18), обеспечивая ее контакт через реле (2) с пластиной (1), и затем освобождают фиксатор (17). Индентор под действием силы тяжести вместе со штоком (14) перемещается вниз. В момент соприкосновения индентора с исследуемым продуктом замыкается электрическая цепь. Электромагнит (4) притягивает к себе пластину (3) и тем самым обеспечивает одновременное вращение двух барабанов (6), (20). По мере погружения индентора в исследуемый продукт стрелка перемещается по шкале отсчета (10), с которой считывают показания по окончании измерений.

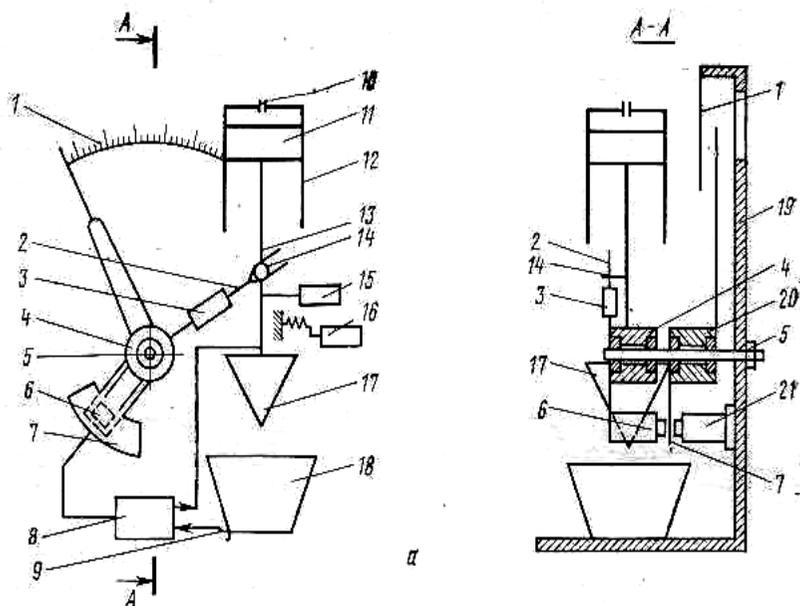
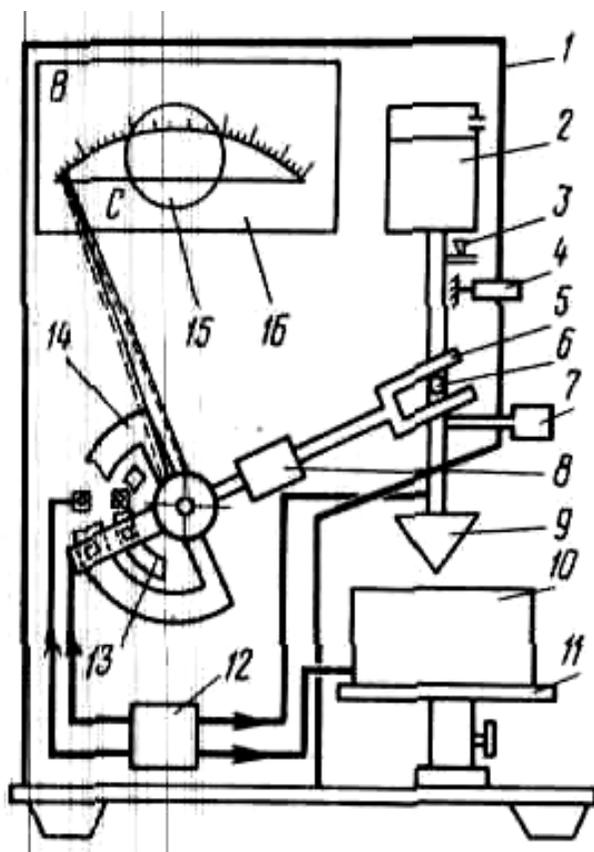


Рис. 4.10. Принципиальная схема полуавтоматического пластометра ПП-3М

Полуавтоматический прибор ПП-4 позволяет определить характеристики продукта с преобладающими проводниковыми и диэлектрическими свойствами и предназначен для работы в трех режимах: в первом - в режиме определе-

ния предельного напряжения сдвига продукта с преобладающими свойствами проводника; во втором – в режиме определения предельного напряжения сдвига продукта с преобладающими свойствами диэлектрика; в третьем – в режиме измерения пенетрации.

Полуавтоматический пенетрометр ПП-5 (рис. 4.11). Прибор ПП-5 является новой и перспективной моделью, разработан на базе прибора ПП-4 и позволяет за один опыт одновременно определять предельное напряжение сдвига и степень пенетрации как вязко-пластичных, так и упруго-пластичных продуктов.



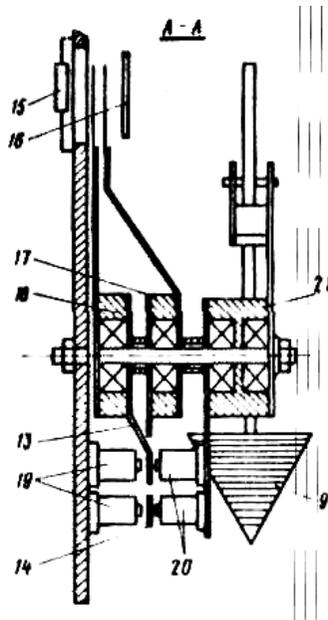


Рис. 4.11. Принципиальная схема пенетрометра ПП-5

Полуавтоматический пенетрометр ПП-5 состоит из корпуса (1), демпферного устройства (2), микровыключателя (3), фиксатора (4), рычага (5), пальца (6), ручки подъема индентора (7), противовеса (8), индентора (9) (конуса) со штоком, емкости (10) для продукта, подъемного столика (11), блока управления (12), пластин (13), (14) соответственно для фиксации степени пенетрации или максимально глубины погружения индентора, подвижной увеличивающей линзы (15), измерительной шкалы (16), барабанов (17), (18) с измерительными стрелками для отсчета максимальной величины погружения индентора и степени пенетрации, магнитов (19) для фиксации стрелок по окончании замера, магнитов (20) для фиксации момента соприкосновения индентора с продуктом и барабана (21) с пластиной и магнитами.

Прибор работает следующим образом. Исследуемый продукт помещают в емкость и устанавливают на столике

под индентором. С помощью реле задают время измерения степени пенетрации в секундах (3-10 *с*) и предельного напряжения сдвига в минутах (2-5 *мин*). Высвобождают фиксатор, и шток с индентором перемещается вниз под действием собственного веса. В момент соприкосновения индентора с продуктом замыкается электрическая цепь управления электромагнитами, притягивающими к себе пластины. Три барабана объединяются и, совместно вращаясь, перемещают стрелки по шкале отсчета. По истечении заданного (в секундах) времени первый электромагнит отпускает работающую с ним в паре пластину, которая одновременно притягивается к жесткофиксированному на передней панели электромагниту. Таким образом, по шкале снимают показания для определения степени пенетрации. Шток с индентором продолжает погружение, и вторая стрелка перемещается по шкале до тех пор, пока не истечет заданное (в минутах) время, после чего аналогичным образом неподвижно фиксируется вторая стрелка. Показания ее служат для расчета предельного напряжения сдвига.

Пенетрация – условно принятая величина, которая используется в качестве сравнительной оценки прочности, нежности, консистенции структуры между двумя, тремя и т.д. материалами и измеряется в относительных единицах. За единицу пенетрации принят 1 *мм*.

Учитывая то, что замер измерения пенетрации длится всего 3-10 *с*, прибор ППП-5 можно использовать для экспресс-контроля и регулирования технологических параметров процесса.

Прибор дополнительно комплектуется набором игольчатых инденторов, содержащих либо одну иглу, либо несколько игл, запрессованных на диске по окружности (3-5 штук). В случае применения игольчатых инденторов, приборы можно использовать для определения консистенции готовых продуктов (например колбасных изделий) или для оценки нежности, прочности сырья (например мяса).

Прибор может работать в двух режимах: в первом - в режиме одновременного определения предельного напряжения сдвига и степени пенетрации материалов с преимущественно проводниковыми свойствами; во втором – в режиме одновременного определения предельного напряжения сдвига и степени пенетрации материалов с преимущественно диэлектрическими свойствами.

В.Д. Косой и др., на основании проведенных исследований установили, что значения величин предельного напряжения и степени пенетрации хорошо коррелируют между собой, на основании чего ими предложена зависимость между этими показателями:

$$\theta_0^H = K_{II} / h_{II}^2, \quad (4.10)$$

где K_{II} – коэффициент пропорциональности между степенью пенетрации и предельным напряжением сдвига;
 h_{II} – величина пенетрации.

Характеристика прибора: предельное напряжение сдвига – $10 \cdot 10^4$ Па; степень пенетрации – до $4,5 \cdot 10^{-2}$ м; напряжение – 220 В; габаритные размеры – $0,27 \times 0,14 \times 0,34$ м; масса – 5 кг.

Приборы для измерения компрессионных свойств продуктов

Наряду со сдвигом, объемное или осевое сжатие, а также осевое растяжение являются основными типами механической деформации продуктов. В ряде машин, как-то волчках, шприцах, дозировочно-формующих, прессах, дозаторах и др., продукты находятся при повышенных давлениях, что изменяет их первоначальный объем и плотность. На выходе из машины объем и плотность также могут отличаться от первоначальных. Эти изменения в продукте определяют, основываясь на компрессионных характеристиках.

Основными методами измерения (рис. 4.12) компрессионных характеристик продуктов являются: осевое сжатие

(а), осевое растяжение (б), одностороннее объемное сжатие (в) и двухстороннее объемное сжатие.

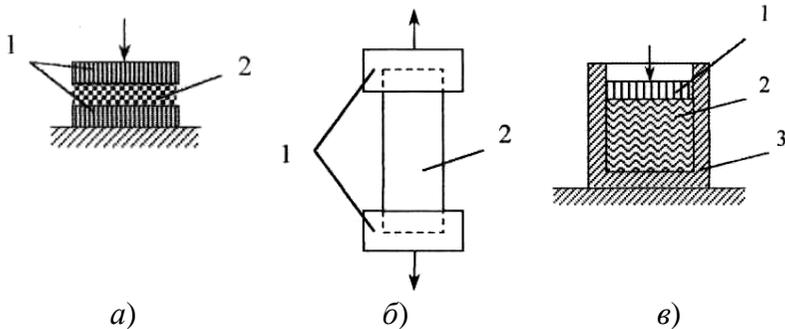


Рис. 4.12 Методы измерения компрессионных свойств продуктов

Прибор для измерения компрессионных характеристик продуктов (рис. 4.13). Прибор предназначен для определения деформационных свойств продуктов при осевом сжатии.

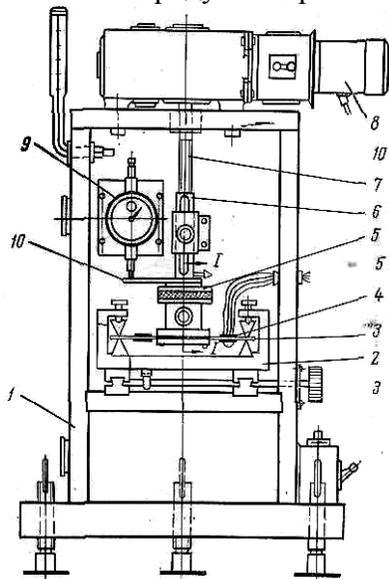


Рис. 4.13. Прибор для измерения компрессионных характеристик продуктов

Прибор состоит из корпуса (1), состоящего из нижней и верхней частей. Внутри верхней части установлен выдвижной столик (2), на котором расположена в фиксированном положении на призмах тензометрическая балка (3), с закрепленными на ней тензодатчиками (4). На тензометрической балке в средней ее части жестко закреплена бо-бышка для установки и крепления нижней пластины (5). Верхняя и нижняя пластины (5) могут быть выполнены из одного или разного материала. Подвижная штанга-гайка (6) получает возвратно-поступательное равномерное движение от винта (7), жестко соединенного с электродвигателем (9) через редуктор и ступенчатый вариатор, позволяющий создавать различные скорости движения штанги-гайки. В нижней части штанги-гайки крепится пластина-поперечина (10), служащая опорой для ножки индикатора, и верхняя рабочая пластина (5). На корпусе прибора установлены включатель и переключатель реверса. Прибор снабжен комплектом круглых пластин разного диаметра площадью 5, 7, 10, 15 см².

Перед началом испытаний прибор тарируют с помощью стандартных грузов. Для этого выдвигают столик и на нижнюю пластину поочередно устанавливают стандартные грузы. С помощью тензодатчиков на шлейфовом осциллографе отмечают значения прогиба тензобалки конкретному значению груза.

После тарировки передвижной столик вкатывают назад. Затем между пластинами помещают образец продукта, верхнюю пластину подводят к образцу без нагрузки и устанавливают «зайчик» осциллографа на нуль при помощи скользящего реохорда моста. Во время испытания при включенном приводе механизма опускания-подъема пластины записывают напряжение-время. После этого привод выключают и записывают нисходящую ветвь кривой релаксации напряжений. По окончании испытаний «зайчик» осциллографа вновь устанавливают на нуль, если произо-

шло его смещение. Испытания повторяют при различной скорости деформации образцов. Образцы продукта подготавливают вырезанием, либо формовкой в цилиндре. Погрешность прибора составляет $\pm 3\%$. Прибор также может использоваться для определения липкости продуктов.

Универсальный прибор ВНИИМПа (рис. 4.14). Прибор предназначен для измерения компрессионных характеристик при осевом сжатии продуктов.

Прибор имеет основание, к которому жестко присоединены реверсивный электродвигатель с редуктором и коробка скоростей (4). На выходном валу коробки скоростей имеется подвижный шток с держателем (1) образца продукта (2). С помощью переключателя скоростей устанавливают одну из трех скоростей для перемещения подвижного штока.

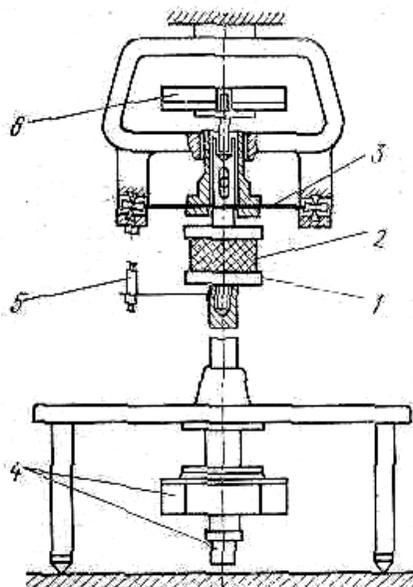


Рис. 4.14. Универсальный прибор ВНИИМПа

На основании смонтирована стойка с кронштейном и тензометрической балкой (3). В центре тензобалки уста-

новлен полый патрон со сквозным отверстием, в которое вставляется одно из измерительных приспособлений. В центре кронштейна имеется отверстие, через которое входит хвостовик держателя грузов (6). На кронштейне и основании прибора установлены концевые выключатели, а на подвижном штоке – механический или электрический датчик (5) деформации продукта. В комплект прибора входит набор сменных измерительных приспособлений и держателей рабочего органа.

Методика проведения испытания образцов продукта такая же, как и для прибора описанного выше. Отличие заключается в том, что перемещается нижняя пластина, а не верхняя. По полученным данным строят деформационные кривые исследуемого продукта.

Данный прибор также применяется для определения адгезионных характеристик продуктов.

Консистомер Гепплера (рис. 4.15). Прибор предназначен для определения компрессионных свойств вязкопластичных материалов, в частности для измерения относительных деформаций и построения кинетических зависимостей деформационных изменений материала под действием объемного сжатия.

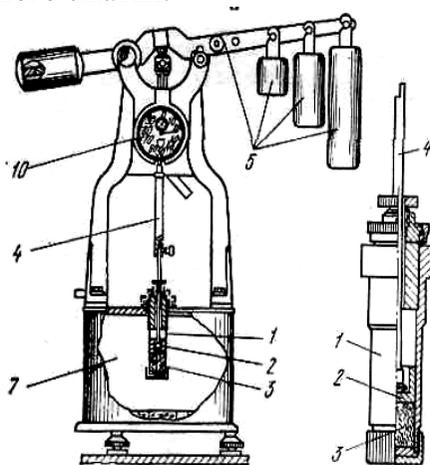


Рис. 4.15. Консистомер Гепплера

Прибор состоит из измерительного цилиндра (1), внутри которого находится исследуемый продукт (3), поршня (2), штока (4), передающего усилие давления, устройства (5), создающего давление, включающее грузы, поворотного рычага и установленного на нем балансира, термостата (7), индикатора часового типа (10) для измерения перемещения поршня и установочных винтов.

Испытания проводятся следующим образом. Образец продукта, взвешенный с заданной точностью (например, от $\pm 0,05$ до $0,1$ %), укладывают в цилиндр, в него вводят поршень и подвергают термостатированию. Для удаления воздуха продукт подпрессовывается или вакуумируется. Начальную высоту продукта в цилиндре измеряют после подпрессовки. Затем на рычаг навешивают контрольный груз и с помощью индикатора производят замер перемещения поршня. Замер величин абсолютных деформаций продукта производят через 20 с или непрерывно. Рабочие пределы изменения давления у консистометра Гепшляра от $1,56 \cdot 10^5$ Па до $15,6 \cdot 10^5$ Па. Максимальное время, необходимое для достижения равновесного состояния равно 180 с, что примерно соответствует периоду релаксации для многих пищевых продуктов. Затем нагрузку снимают и исследуют кинетику восстановления образца. По результатам измерений вычисляют относительные деформации, строят кинетические зависимости. Поскольку масса продукта в цилиндре известна, то по результатам замеров можно рассчитать плотность продукта для конкретного значения давления.

Компрессионный акалориметр МТИММПа (МАПБ). Прибор (рис. 4.16) позволяет определять компрессионные и теплофизические свойства вязко-пластичных материалов при различных давлениях.

Прибор состоит из корпуса, подвешенного на пружинах измерительного цилиндра (1), для размещения навески исследуемого продукта (3), с водяной рубашкой (7). В цилиндре с противоположных сторон установлены поршни (2), между которыми закладывают навеску исследуемого

дуемого продукта. Поверхность соприкосновения поршней и исследуемым продуктом термоизолирована эбонитовыми прокладками. Верхний поршень закреплен неподвижно на корпусе, а нижний – на подвижном штоке (4), который посредством грузов (5), навешиваемых на рычаги, осуществляет поступательное движение, обеспечивая первоначальную подпрессовку исследуемого продукта. Шток и поршень в нерабочем состоянии уравновешены с учетом массы продукта. Со штоком неподвижно соединен плунжер (9) индукционной катушки с помощью опорного рычага, на другой конец которого опирается конец стержня индикатора часового типа (10). Для измерения температуры продукта в различных точках и греющей среды установлены термомпары (8) игольчатого типа. Запись показаний термомпар производится потенциометром КСП-4.

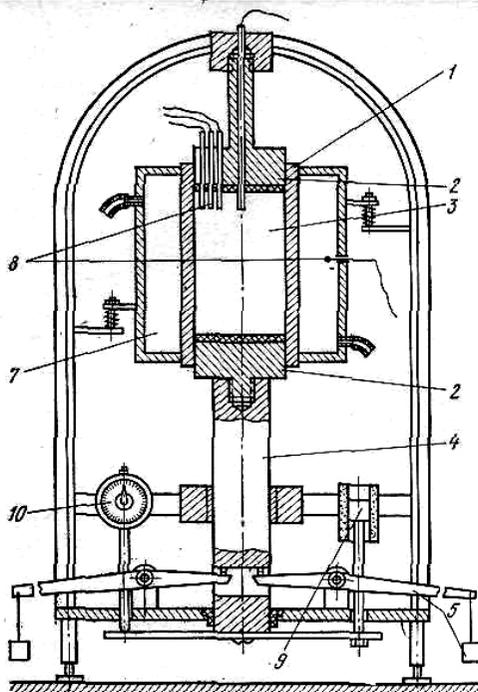


Рис.4.16. Компрессионный акалориметр МТИММПа

Во время испытаний исследуемый продукт, заключенный в цилиндр, в результате перемещения нижнего поршня, подвергается объемному сжатию, изменяя при этом свой первоначальный объем. Деформационные изменения объема продукта одновременно фиксируются визуально по индикатору часового типа и записываются на диаграммную ленту потенциометра. Далее по полученным данным рассчитывают компрессионные характеристики продукта.

Прибор также позволяет проводить испытания продуктов при повышенных или пониженных значениях температуры, для чего рубашку прибора заполняют жидкостью с заданной температурой.

Приборы среза. Наряду с пластометрами, пенетрометрами и пр. структурно-механические свойства и прочность продуктов можно исследовать, определяя силу среза. Она используется для объективной оценки их консистенции.

Прибор для испытания на срез ПМ-3 (МТИММПа). Прибор (рис. 4.17) предназначен для определения усилий среза колбасных изделий, мяса, мясо продуктов и др.

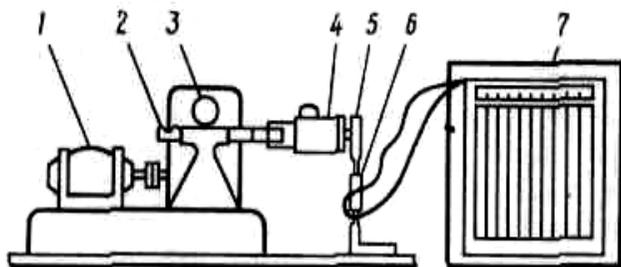


Рис. 4.17. Принципиальная схема прибора ПМ-3

Прибор состоит из основания, электродвигателя (1) с реверсом, червячного редуктора (3), зубчатой рейки (2), на которой закреплен рабочий орган (4), упругой балки (5), на которой закреплены тензодатчики (6) и потенциометра (7). Рабочий орган прибора представляет собой устройство, со-

стоящее из двух колодок, имеющих отверстие, закрываемое крышками, между колодками находится пластина с отверстием, которая одним концом прикреплена к зубчатой рейке. Перемещение пластины осуществляется от электродвигателя через муфту, червячный редуктор и передачу зубчатое колесо-рейка. Отверстия в колодках и пластине могут быть круглой, квадратной или треугольной формы.

Во время испытаний предварительно вырезанный образец цилиндрической формы диаметром 10 мм из сырого или вареного мяса вкладывают в отверстие, образованное колодками и пластиной при совмещении их отверстий, и прикрывают с обеих сторон крышками. Нажатием кнопки «пуск» включают электродвигатель и приводят в движение зубчатую рейку, которая смещает пластину. Пластина, смещаясь, давит на образец и срезает его. Усилие, необходимое для среза образца, передается на тензобалку. Изгиб балки от тензодатчиков, в виде электрического сигнала, передается на потенциометр, где фиксируется в форме пика на диаграммной ленте. По кривой, записанной на диаграммной ленте, рассчитывают максимальное значение усилия среза и работу, затраченную на срез образца.

Приборы для измерения поверхностных свойств продуктов

Приборы и методы измерения адгезии основаны на разрушении адгезионного соединения путем приложения внешнего усилия. Определение адгезионных свойств продуктов, в зависимости от способа приложения усилия, производят: методом отрыва и методом сдвига. Для указанных методов могут применяться различные способы их проведения, которые схематично представлены на рис. 4.18, где пищевой продукт (адгезив) показан темным, а материал, с которым он контактирует (субстрат) – светлым.

Разделение (отрыв) контактирующих тел в зависимости

от их природы и технологических условий может быть по границе контакта (адгезионный отрыв), по слою продукта (когезионный отрыв) или смешанным (адгезионно-когезионный отрыв).

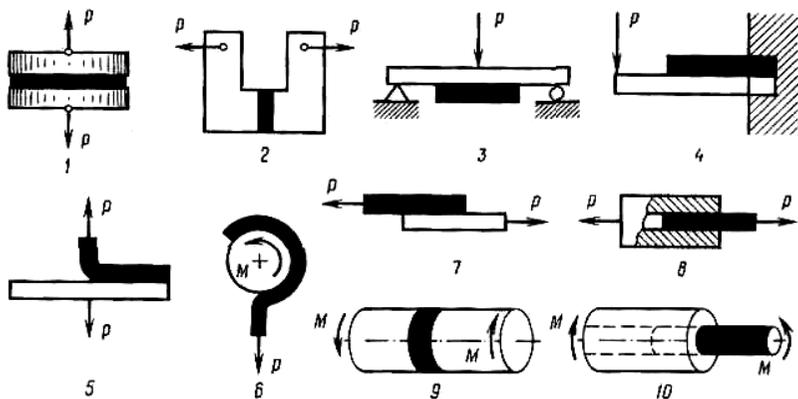


Рис. 4.18. Способы измерения адгезии: 1 – отрыв нормальной силой при растяжении; 2 – отрыв при внецентренном растяжении (сжатии); 3, 4 – отслаивание материалов при изгибе; 5, 6 – отслаивание при отрыве; 7, 8 – разрушение соединения при сдвиге; 9, 10 – сдвиговое разрушение при кручении.

Учитывая эти обстоятельства, перед испытаниями необходимо тщательно подготавливать образцы исследуемого продукта (адгезива) и материала (субстрата) с которым он будет контактировать. При адгезионном отрыве нарушаются внешние связи между материалом 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 материала (субстрата), часто без конкретизации его вида.

На величину адгезии влияют: технологические свойства самого продукта (температура, влажность, состав и др.); марка конструкционного материала; шероховатость поверхности материала; условия измерения (геометрические, кинематические и динамические параметры прибора).

Требования, предъявляемые к адгезиомерам:

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

- перед измерением продукт должен прижиматься к субстрату для установления контакта и удаления из него воздушных пузырьков;

- нанесение продукта заданной толщины на пластины прибора должно проводиться с помощью шаблона, чтобы исключить влияние толщины на его адгезионные свойства;

- в приборах должна быть предусмотрена возможность замены пластин с целью определения влияния марки материала пластин и степени его обработки (шероховатости) на прочность молекулярных контактов;

- приборы должны допускать возможность варьирования, скорости приложения силы отрыва или сдвига в широком диапазоне, для установления влияния силы отрыва на распределение деформаций и усилий между пластинами и продуктом.

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

Приборы для определения адгезионных характеристик

по способу приложения нагрузки делят: на адгезиометры с постоянным отрывом, адгезиометры с мгновенным отрывом, а также на 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 вязко-пластичных материалов используются приборы, основанные на способе нормального отрыва.

Адгезиометр Б.А. Николаева (рис. 4.19). Прибор прост: сконструирован по принципу рычажных весов и предназначен для исследования адгезии вязких пищевых продуктов. Он состоит из измерительной пластины (субстрата) (1), выполненной в виде диска, двухплечевого рычага (2), к которому с одной стороны подвешен субстрат, а с другой – груз (3) и основания прибора (5). Между диском и основанием нанесен адгезив (4). Во время испытания, постепенно увеличивая массу груза (3), добиваются отрыва диска (1) от адгезива (4). По результатам измерения рассчитывают липкость материала.

Адгезиометр Ю.В. Клаповского (рис. 4.19 б). Прибор предназначен для определения адгезионных свойств вязких пищевых материалов, в частности конфетных масс. Он прост по конструкции и надежен в эксплуатации.

Прибор состоит из рычага (7), к нему шарнирно закреплен вертикальный шток (8), расположенный в направляющих, к которому через упругое измерительное кольцо (9) крепится пластина (10). Для создания предварительного контакта имеются распорный винт (5) и упор (4). Усилие отрыва измеряют при помощи тензорезисторов (6) наклеенных на упругое измерительное кольцо (9). Перемещение пластины (10) измеряют при помощи фотодиода (3), при

этом шторка (2) перекрывает часть светового пучка осветителя (1), изменяя освещенность фотодиода. Исследуемый продукт укладывают в специальную емкость (11), которая имеет крышку с отверстием, в которое с малым зазором входит пластина-субстрат. Во время испытаний показания тензорезисторов и фотодиода после усиления записываются на шлейфовом осциллографе, позволяя фиксировать изменение во времени усилия отрыва и перемещение субстрата относительно адгезива.

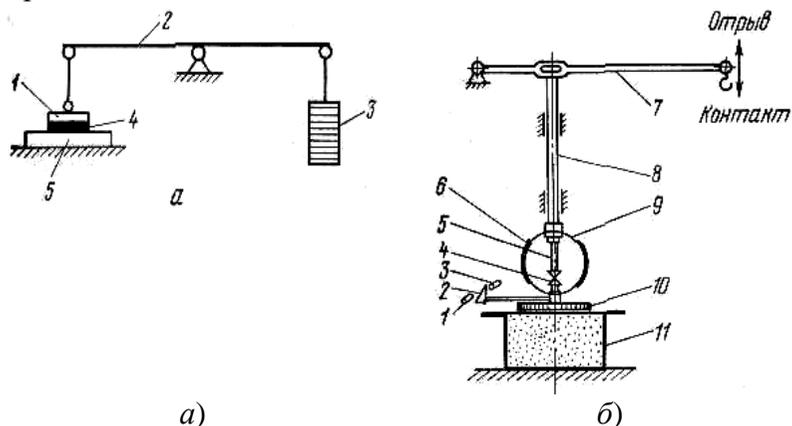


Рис. 4.19 Адгезиометры: а) адгезиометр Б.А. Николаева; б) Адгезиометр Ю.В. Клаповского.

Универсальный адгезиометр МТИММПа (МАПБ). Прибор (рис. 4.20) предназначен для измерения адгезионных свойств продуктов и позволяет менять в широком диапазоне геометрические, кинематические и динамические и другие параметры измерения.

Прибор имеет корпус (1), подъемный столик (2) с микрометрическим винтом для крепления нижней пластины (субстрата) (3) и устройство для нагружения продукта и отрыва верхней пластины. Верхняя пластина фиксируется держателем, который смонтирован на тензобалке (4), и имеет хвостовик для обеспечения соосности подвижной

части системы. В верхней части прибора на поперечной балке корпуса закреплена втулка (8), в которую вставлена поперечина (7) с хвостовиком, на концах которой закреплены серьги (6). На верху корпуса установлен приводной вал с набором шкивов (10) разных диаметров. Вертикально вверх тензобалка перемещается серьгами, которые оканчиваются призмами и шарнирно укреплены на поперечине с хвостовиком. Последняя перемещается во втулке посредством нити (9) и набора шкивов, которые приводятся во вращение от электродвигателя через редуктор (на рисунке не показаны). Для создания предварительного контакта на тензобалку устанавливаются грузы (5). В каждой серии опытов тензобалку тарируют, получая зависимость: величина нагрузки – отклонение «зайчика» на осциллограмме.

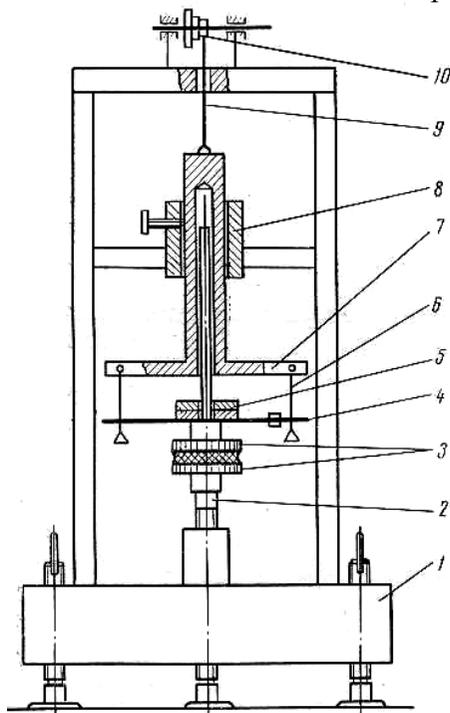


Рис. 4.20 Универсальный адгезиометр МТИММПа

Адгезиометр АМ-1. На приборе определение адгезионных свойств продуктов основано на методе сдвига и предназначен для исследования вязко-пластиных материалов, в частности для теста.

Прибор состоит из станины (1), фиксатора (2), штока (3), втулки (4), упругого элемента (5) с закрепленными на нем тензорезисторами, груза (6), матрицы (7) с заготовкой и платформы (8).

Во время испытания, матрица с выпеченной тестовой заготовкой крепится к вертикальному штоку, затем заготовка обжимается двумя полуконическими колодками. При повороте платформы вокруг вертикальной оси происходит сдвиг заготовки относительно неподвижной матрицы. Подъем матрицы при помощи груза позволяет определить усилие отрыва.

Приборы для определения коэффициентов трения. Приборы, применяемые для определения коэффициентов трения, пищевых продуктов называют трибометрами.

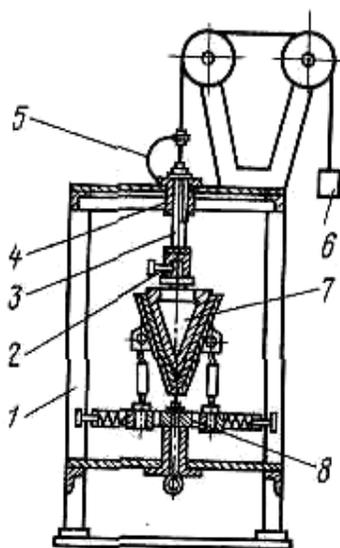


Рис. 4.21. Адгезиометр АМ-1

Коэффициент внешнего трения пищевых материалов в зависимости от реологических свойств, состояния фрикционных поверхностей и скорости скольжения определяется различными способами. 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, прикладываемая для смещения (трения) одного тела относительно другого, измеряется тензометрическими, динамометрическими или какими-либо другими датчиками.

И. В. Крагельский, положив в основу геометрический и кинематический принципы, предложил известные методы определения коэффициента трения разделить на четыре группы, которые в виде схем показаны на рис. 4.22.

Первая группа – методы, в которых одна плоскость поступательно перемещается относительно другой плоскости (рис. 4.22 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 твердых образных материалов: мяса, рыбы, хлеба 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 продуктов, как сыр, рыба, кондитерские изделия и др.

По схеме *в*, продукт скользит по наклонной поверхности. Коэффициент трения определяется по минимальному углу наклона α поверхности испытуемого конструкционного материала, по которому скользит пищевой продукт. Такой метод позволяет определить статический коэффициент

трения для сыра, сухарей, сыпучих продуктов. Метод считается недостаточно точным и широкого применения не получил.

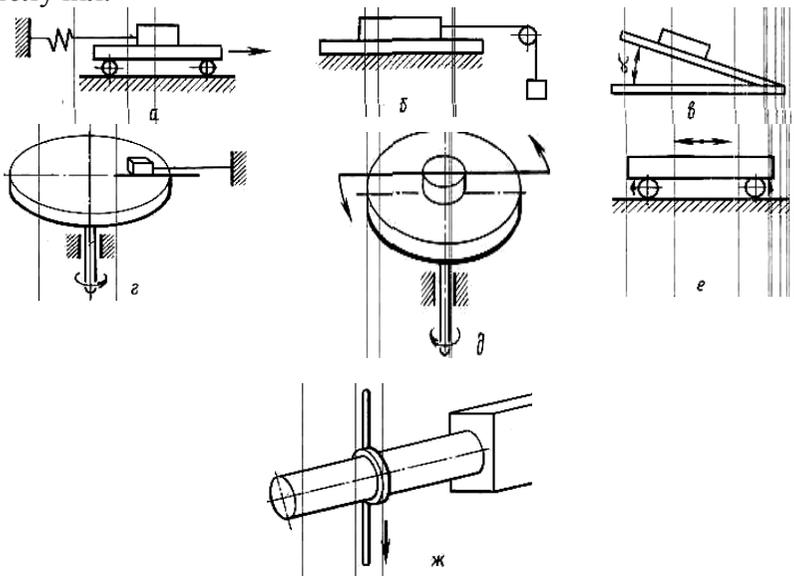


Рис. 4.22. Методы измерения силы трения скольжения: а), б), в) при поступательном перемещении плоскостей; г), д) при вращательном движении одной из фрикционных пар; е) при соприкосновении образующей цилиндра с плоскостью; ж) при перемещении цилиндрической поверхности по цилиндрической поверхности

Вторая группа – методы, при которых одна из фрикционных пар совершает вращательное движение. По схеме *г* продукт, закрепленный на упругой балочке, скользит по вращающейся поверхности из исследуемого материала. Этим методом определяют коэффициент трения мяса, рыбы и т.п. По схеме *д* продукт лежит на вращающемся диске, исследуемый конструкционный материал скользит по вращающемуся продукту. Сила трения определяется по крутящему моменту, передаваемому от диска образцу.

Третья группа – методы, в которых образующая цилиндра соприкасается с плоскостью. По схеме *e* балка, совершающая колебательные движения на двух вращающихся навстречу друг другу роликах.

Четвертая группа – методы, в которых одна цилиндрическая или плоская гибкая поверхность перемещается по цилиндрической поверхности (рис. 4.22 ж).

Трибометр с тележкой (рис. 4.23 а). Прибор позволяет определить силу трения и вычислить истинный и эффективный коэффициенты внешнего трения. Он состоит из устройства (1) для измерения силы трения (тензобалка), устройства (2) для создания давления контакта, рамки с исследуемым продуктом (3), тележки с закрепленной на ней пластиной (4) и электропривода (5) со шкивом.

Во время испытаний исследуемый продукт помещают в рамку, устанавливают на плоскую поверхность пластины тележки и включают электродвигатель. Нить, наматываясь на шкив, начинает перемещать тележку, и вместе с ней продукт, заключенный в рамку, от которой через нить передается тензобалке, которая под действием усилия отгибается от своего первоначального положения. При дальнейшем перемещении тележки, усилия между рамкой с продуктом и тензобалкой увеличиваются и, достигнув критической величины, начинается скольжение рамки с продуктом по поверхности пластины тележки. При этом прогиб тензобалки будет оставаться на том же уровне постоянным. Сила трения, возникающая между продуктом и пластиной, фиксируется отклонением тензобалки, величина которого с помощью тензодатчиков, прикрепленных к ней, передается на ленту осциллографа. Для изменения скорости тележки имеется четырехступенчатый шкив, на который наматывается нить. Прибор позволяет менять геометрические (размер площади поверхности контакта, чистоту обработки поверхности и др.), кинематические

(скорость смещения тележки, время предварительного контакта и пр.) и динамические (давление предвари тельного контакта, скорость нарастания силы и пр.) факторы. Прибор снабжен комплектом сменных пластин изготовленных из разного материала.

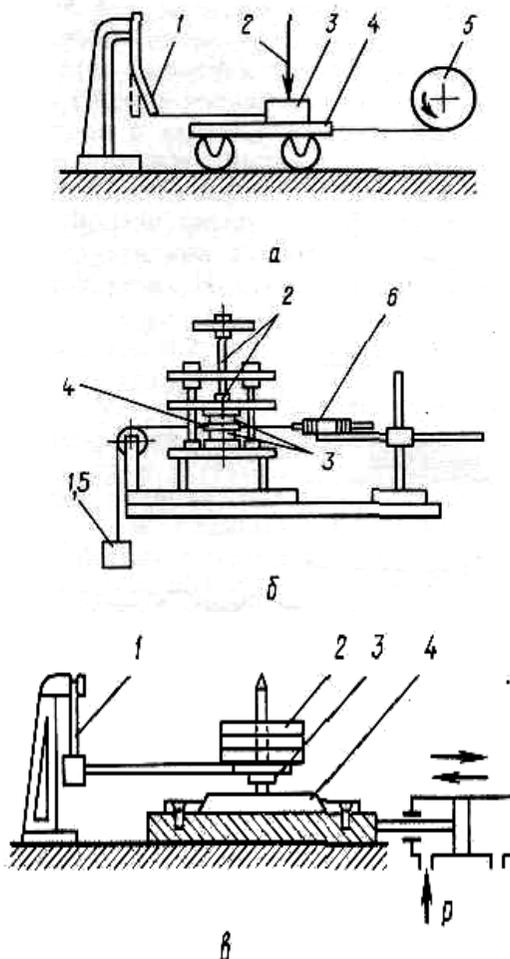


Рис. 4.23 Трибометры: а) трибометр с тележкой; б) трибометр с параллельным смещением пластин; в) трибометр с приводной подвижной частью от гидроцилиндров.

Трибометр с параллельным смещением пластин (рис. 4.23 б). Прибор предназначен для определения адгезионных характеристик твердых продуктов, например сыра. Он состоит из грузового устройства (1) для измерения силы трения, устройства (2) для создания давления контакта, пластины (4), снизу и сверху которой, расположен слой исследуемого продукта (3), грузового привода (5) и устройства для измерения перемещения в виде индикатора часового типа (6). 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 гидропривода (рис. 4.23 в). Прибор предназначен для определения силы трения при малой площади контакта и больших нормальных усилиях. Он состоит из тензобалки (1), устройства (2) для создания предварительного контакта, пластины (4) и гидропривода. При измерении больших усилий трения система гидропривода имеет преимущество по сравнению с электроприводом, кроме того, гидропривод обеспечивает бесступенчатое регулирование скорости.

В настоящее время для достаточно многих мясных продуктов, природа адгезии не выяснена, хотя этому вопросу посвящено большое количество исследований и предложено несколько гипотез для объяснения физико-механической сущности адгезионных явлений.

Тема 5. Реодинамические расчеты трубопроводов и транспортных средств для вязко-пластичных сред

Одним из важных направлений технического развития мясной промышленности, в том числе и пищевой, является совершенствование существующих и создание новых механизированных и поточно-автоматизированных линий по переработке пищевого сырья и производству полуфабрикатов и готовой продукции на основе использования новейших достижений науки и техники. Внедрение линий на предприятиях мясной промышленности обеспечит значительный рост производительности труда, улучшение санитарно-гигиенических условий производства и повышение качества готовой продукции.

Создание поточно-механизированных, особенно автоматизированных линий невозможно без использования средств межоперационного транспорта и транспортных систем по перемещению сырья и мясопродуктов. Наиболее перспективным и рациональным межоперационным видом транспорта, включая различные транспортеры, элеваторы, норрии, спуски и т.д., является трубопроводный транспорт.

Технологический трубопроводный транспорт представляет собой закрытую транспортную систему и предназначен для перемещения по трубам различных жидкостей, сырья и продуктов между отдельными технологическими операциями, отделениями и цехами предприятия.

Преимущества трубопроводного транспорта:

- позволяет создавать закрытые поточно-механизированные и автоматизированные линии, системы;
- обеспечивает возможность транспортирования сырья, продукции на малые и большие расстояния от 1 до 50 м и более без нарушения их структуры;
- исключает возможность распыления и окисления перемещаемой продукции;

- исключает загрязнения производственного воздуха неприятными запахами и другими веществами;
- повышает санитарно-гигиенические условия и культуру производства;
- возможность визуального наблюдения и контроля, за ходом движения продукции в случае изготовления трубопроводов из прозрачного материала, в частности из пищевого органического стекла и других;
- снижает стоимость транспортирования продукции в 4-5 раз по сравнению с напольным транспортом;
- исключает загромождение производственных цехов, так как технологические трубопроводы могут быть проложены (смонтированы) в любом удобном месте и на любом уровне;
- отличается простотой конструкции, легкостью разборки, сборки и монтажа.

Технологический трубопроводный транспорт (технологическая трубопроводная система) состоит из следующих основных элементов: накопительной емкости (резервуара), устройств для создания напора и вытеснения транспортируемой массы, комплекта труб, соединительных и фасонных частей, запорной, регулирующей, дросселирующей, предохранительной и контрольной арматуры, а отдельных случаях, приборов для измерения структурно-механических характеристик перемещаемой массы (среды) и приемной емкости (приемника) в конечной точке перемещения.

В отдельных случаях, трубопроводный транспорт (система) может отличаться тем или иным количеством элементов. Транспортирование продукции (массы) трубопроводным транспортом осуществляется следующими способами: путем создания давления в начальной точке магистрали; путем создания вакуума на конечной точке вытеснения или путем свободного перемещения массы за счет собственного веса.

Для создания давления вытеснения транспортирования

продукции (массы) применяются насосы или компрессионные установки, а для создания вакуума - вакуумные насосы.

Транспортирование продукции по трубам может осуществляться периодически или непрерывно.

Принудительное перемещение продукции (массы) по трубам возможно лишь в том случае, когда она представляет собой сплошную среду (массу), как-то жидкости или на подобии фаршеобразных материалов, или мелкоизмельченной в виде муки. При транспортировании, например, дробленой кости или кусковой продукции, необходимо добавлять воду, которая заполнив пустоты, позволит образовать сплошную монолитную массу, исключая свободный проход сжатого воздуха. В этой связи, различают следующие способы транспортирования продукции - без добавления воды и с добавлением воды.

Требования, предъявляемые к технологическому трубопроводному транспорту: возможность автоматического регулирования потока транспортируемой продукции; высокая надежность и безопасность в работе; прочность и герметичность, обеспечивающие длительный срок эксплуатации; способность сохранять исходные свойства продукции во время транспортировки, исключать нагрев, перетирание продукции; трубопроводы должны быть изготовлены из материалов, обладающих малой адгезионной способностью, а также физиологической индифферентностью и стойкостью к воздействию агрессивных сред; конструкция трубопровода должна легко разбираться для мойки и санитарной обработки и не иметь недоступных мест.

Перспективы развития трубопроводного транспорта для перемещения сырья и полуфабрикатов

Преимущества трубопроводного транспорта перед другими видами транспорта обуславливают его широкое использование в будущем. Сегодня в качестве основных направлений развития трубопроводного транспорта на перспективу являются следующие.

Применение новых, обладающих антиадгезионными, антикоррозионными и другими свойствами материалов, а также без инертными по отношению к пищевым продуктам для изготовления магистральных трубопроводов. Решение этого вопроса сделает трубопроводный транспорт самым экономичным, экологически чистым и исключаящим какое-либо воздействие на продукт во время транспортировки.

Создание трубопроводного транспорта (систем), совмещающего транспортирование с выполнением технологических операций. Это направление является наиболее перспективным и важным для предприятий мясной и др. отраслей пищевой промышленности. Например, транспортирование фарша по трубопроводу можно совместить с его термической обработкой вплоть до получения готового продукта. Положительный опыт в этом направлении накоплен при изготовлении сосисок с использованием СВЧ-энергии. Фарш нагревали при частоте микроволнового воздействия 2450 МГц с использованием преобразователя ПТ-ТП68 при мощности СВЧ-генератора 5 кВт на линии производительностью 250 кг/ч. Применение СВЧ-энергии при транспортировании пищевого сырья по трубопроводам позволяет не только нагревать сырье до заданной температуры, а также уменьшить бактериальную обсемененность продукта, так как электромагнитное поле СВЧ оказывает ингибирующее действие на бактериальную клетку и она гибнет.

Следует отметить, что при совмещении операции транспортирования с СВЧ-нагревом требуется использование специальных видов труб, проницаемых для СВЧ-волн, таких как фторопласт-4, или аналогичных.

В настоящее время СВЧ-нагрев колбасных изделий в трубопроводах пока не используется из-за ряда технических трудностей.

Другим принципиально новым направлением в разработке трубопроводов с совмещенными операциями пред-

ложено в МАПБе А.В. Гноевым и др. – это волновое и перистальтическое движение трубопроводов с различными видами сырья. Использование волновых и перистальтических принципов в мясной промышленности позволяет интенсифицировать ряд технологических процессов, таких как перемешивание, транспортирование, посол и др.

Авторами на основе результатов исследования разработана установка непрерывного действия для производства колбасных изделий с использованием перистальтического принципа совместно с вибрацией, в которой реализуется совмещение транспортирования с операциями созревания и перемешивания.

Применение перистальтических принципов в мясной промышленности в значительной степени уменьшает металлоемкость оборудования, снижает производственный шум, позволяет уменьшить производственные площади. Однако, с другой стороны, использование этих принципов требует внедрения нетрадиционных видов трубопроводов, таких как эластичные высокопрочные пленки.

Основы теории реодинамических расчетов трубопроводов.

Течение по трубам реологически сложных дисперсионных систем, к которым относятся мясопродукты, происходит при условии создания в продукте давлений, достаточных для преодоления внутренних и внешних сопротивлений.

Поэтому в основе реодинамических (гидравлических) расчетов трубопроводов лежит определение напряжений, оказывающих противодействие при движении продукта (потери давления) по прямым участкам труб и в местных сопротивлениях. В некоторых случаях расчет сводится к определению диаметра трубопровода или расхода.

Общее давление вытеснения $p_{общ}$, P_a , необходимое для перемещения транспортируемой продукции (массы) определяют по формуле:

$$P_{\text{общ}} = \pm \rho g h + p + p_m + p_{\text{ин}} + p_n + p_k + p_{\text{сж}}, \quad (5.1)$$

где ρ – плотность перекачиваемой массы, $\text{кг}/\text{м}^3$;

h – высота нагнетания продукта, м ;

$\rho g h$ – потери давления, при подъеме массы на заданную высоту, Па ;

p – потери давления по длине трубопровода, Па ;

p_m – потери давления в местных сопротивлениях, Па ;

$p_{\text{ин}}$ – инерционные потери давления, обусловлены неравномерностью движения, Па ;

p_n – потери давления на преодоление противодействия, Па ;

p_k – потери давления на создание кинетической энергии потока, Па ;

$p_{\text{сж}}$ – потери давления на сжатие продукта, Па .

В отдельных случаях количество членов в уравнениях может быть разное, в частности, при отсутствии сопротивления перемещаемой массы, на выходе из трубопроводной системы, значение $p_n = 0$, при отсутствии подъема массы на некоторую высоту $\rho g h = 0$ и при свободном течении массы по трубе $p_k = 0$.

При проведении расчета трубопроводов общими являются уравнения определения расхода (подачи), которые определяются из условий непрерывности:

- объемный расход: $V_c = V / \tau, \text{ м}^3/\text{с}$;
- массовый расход: $M_c = \rho V_c, \text{ кг}/\text{с}$;
- весовой расход: $G_c = \rho g V_c, \text{ Н}/\text{с}$.

$$(5.2)$$

где V – объем продукта, проходящего через трубопровод, м^3 ;

τ – время, с ;

ρ – плотность продукта, $кг/м^3$;
 g – ускорение свободного падения, $м/с^2$.

Объемный расход связан с геометрическими размерами трубопровода и кинематикой течения продукта в нем, и рассчитывается по формуле:

$$V_c = w \cdot F = w \cdot \pi d^2 / 4 = w \cdot \pi R^2 \quad (5.3)$$

где w – средняя скорость движения продукта, $м/с$;
 F – площадь живого сечения трубопровода, $м^2$ (F равна площади сечения продукта, которая нормальна вектору средней скорости);

d – внутренний диаметр трубопровода, $м$;

R – внутренний радиус трубопровода, $м$.

Продукт считают сплошной, неразрывной средой с непрерывным распределением физических свойств, деформаций и скоростей деформаций, что позволяет использовать аппарат математического анализа, приложенного к непрерывным функциям. При расчете трубопроводного транспорта определяющую роль играют три группы факторов: геометрические – площадь живого сечения (диаметр); кинематические – средняя скорость потока или объемный расход; динамические – давление в начале трубы или потери давления вдоль трубы. К динамическим факторам относятся также реологические характеристики и плотность, которые должны быть известны для каждого продукта.

В соответствии с этим на практике имеют место три случая расчета трубопроводов, когда определяют одну неизвестную величину, если две остальные известны: первый случай – давление в начале трубы (потери давления или напора вдоль трубы); второй – расход жидкости (подача) или средняя скорость продукта; третий – диаметр трубы

(площадь живого сечения). В первом и во втором случаях диаметр можно определить из условий оптимальности по стоимостным показателям. Условно можно выделить четвертый случай, когда при известных трех факторах определяют реологические характеристики.

В выборе метода расчета существенное значение имеет режим движения продукта по трубе, оцениваемый критерием Рейнольдса (Re). Он представляет собой безразмерное числовое значение, пропорциональное отношению кинетической энергии потока $mw^2/2$ к работе сил вязкого сопротивления Pl (где m – масса, w – среднеобъемная скорость, P – сила сопротивления):

$$\begin{aligned} Re &= (mw^2) / [\eta F(w/l)l] = \rho l^3 w^2 / (\eta l^2 w) = \rho l w / \eta = \\ &= \rho d w / \eta = 4V\rho / (\pi \eta d) \end{aligned} \quad (5.4)$$

где l – характерный линейный размер (для круглой трубы – диаметр d), m ;

ρ – плотность жидкости, $кг/м^3$;

η – динамический коэффициент вязкости, $Па \cdot с$.

Твердообразные, вязко-пластичные массы имеют структурный режим движения, при котором скорость движения в тонком слое около стенки (градиентный слой) резко возрастает, в следующем, промежуточном слое увеличивается незначительно, а центральная часть потока (ядро) движется, испытывая незначительные деформации за счет ползучести или пластичности продукта. Движение «степенных» жидкостей аналогично, но в ядре потока в зависимости от индекса течения в большей или меньшей мере, существует градиент скорости.

Жидкообразные продукты могут иметь ламинарный или турбулентный режим движения, что определяется величиной критерия Рейнольдса. При ламинарном режиме ($Re <$

2320) жидкость движется в виде слоев, не перемешивающихся друг с другом. Однако для структурированных мясосопродуктов (бульон, расплавленный жир и др.) ламинарный режим имеет место при $Re < 1400$. При турбулентном режиме происходит интенсивное внутреннее перемешивание жидкости. Однако у стенки сохраняется ламинарный слой, толщина которого с увеличением критерия Рейнольдса или скорости потока движения при прочих равных условиях уменьшается. Если толщина этого слоя больше высоты выступов шероховатости материала стенки, то трубы считаются гидравлически гладкими, в противном случае – шероховатыми.

Традиционная теория реодинамики исходит из гипотезы сплошности и непрерывности среды, и использует следующие допущения и ограничения:

- скорость движения жидкости на стенке принимается равной нулю, и продукт считается несжимаемым;
- реологические характеристики продукта неизменны по длине и не зависят от времени, т. е. на течение не влияют процессы тиксотропии, реопексии и релаксации.

Однако отмечены случаи проскальзывания продукта относительно стенки, т. е. скорость на стенке не равна нулю. Теория предусматривает, например, для степенных жидкостей при индексе течения, равном нулю, «стержневой» режим движения, при котором вся масса перемещается как твердый стержень и скорость движения на стенке равна среднеобъемной скорости потока, а градиент скорости на стенке стремится к бесконечности.

В последнее время в связи с требованиями практики и для получения более точных данных пытаются учитывать изменения реологических характеристик (вязкости, плотности и др.) по длине трубы и во времени, рассматривая отклонение их величин последовательно по отдельным участкам длины трубы. Особую роль при этом играет по-

стоянство градиента давления по длине трубы для некоторых, сжимаемых пластично-вязких продуктов.

Теория реодинамики для различных по своей текучести систем рассматривает равномерное (силы инерции равны нулю), прямолинейное (центробежные силы равны нулю) движение в горизонтальной трубе (силы тяжести проектируются на ось, совпадающую с направлением движения). В перемещаемой жидкости выделяется цилиндр радиусом r и длиной l , которой считается отвердевшим без изменения свойств. Условия такого движения цилиндра определяются исходя из равенства разности сил давления, приложенных к торцам, и силы вязкого сопротивления, возникающей на боковой поверхности цилиндра при его движении, т. е.

$$p\pi r^2 = 2\pi r l \theta, \quad (5.5)$$

где p – разность давлений на торцах цилиндра;
 θ – касательное напряжение, создаваемое в продукте силой вязкого сопротивления.

Решая уравнение (5.5) относительно θ , получают выражение вида

$$\theta = (p/2l)r. \quad (5.6)$$

Из уравнения (5.6) видно, что напряжение на оси трубы (при $r = 0$) равно нулю, а на ее стенке θ_c при радиусе $r=R$ или диаметре d - наибольшее:

$$\theta_c = (p/2l)R = (p/4l)d, \quad (5.7)$$

где R , d – соответственно радиус и диаметр трубы.

Сопоставляя выражения (5.6) и (5.7), получают уравнение для значения напряжения на любом расстоянии от оси трубы

$$\theta = (\theta_c / R)r . \quad (5.8)$$

Истинный градиент скорости $\frac{\partial u(r)}{\partial r}$ (где $u(r)$ – скорость слоя радиусом r) представляют в виде функции напряжения сдвига $\dot{\gamma}(\theta)$:

$$-\frac{\partial u(r)}{\partial r} = \dot{\gamma}(\theta) , \quad (5.9)$$

Знак «-» показывает, что скорость с увеличением радиуса уменьшается, поскольку начало отсчета производится от оси трубы. Интегрирование в пределах от r до R дает

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

Проскальзывание отсутствует, поэтому $u(R) = 0$. 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):

$$dV_c = 2\pi r u(r) dr$$

Для решения этого дифференциального уравнения 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:

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

Обозначим $x = u(r)$; $dy = 2\pi r dr$.

Тогда $dx = [du(r)/dr]dr = -\dot{\gamma}(\theta)dr$, $y = \pi r^2$.

Далее, применяя правило интегрирования по частям и подставляя значения $r = R$ и $r = 0$, получаем выражение вида

$$V_c = \pi \int_0^R r^2 \dot{\gamma}(\theta) dr. \quad (5.10)$$

Из формулы (5.6) получаем $r = (\theta/\theta_c)R$; $dr = (R/\theta_c)d\theta$.

Тогда выражение (10) можно представить в самом общем виде

$$\frac{4V_c}{\pi R^3} = \frac{4}{\theta_c^3} \int_0^{\theta_c} \theta^2 \dot{\gamma}(\theta) d\theta. \quad (5.11)$$

Полученное уравнение справедливо только в том случае, если закон изменения $\dot{\gamma}(\theta)$ выражается одной непрерывной функцией. Если функция не непрерывна, то для каждого 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 берут в пределах от 0 до θ_0 . В пристенном слое градиент не равен нулю, и второй интеграл имеет пределы от θ_0 до θ_c .

Ниже приведены результаты решения уравнения (5.11) относительно конкретных видов жидкостей и продуктов.

Для линейной ньютоновской жидкости. Уравнение течения жидкости имеет вид:

$$P = \pm \eta F \frac{\partial u(r)}{\partial r} \quad \text{или} \quad \theta = \frac{P}{F} = \eta \dot{\gamma}(\theta), \quad (5.12)$$

где P – сила вязкого сопротивления;

F – площадь боковой поверхности цилиндра радиусом r .

Из уравнения (5.12) $\dot{\gamma}(\theta) = \theta / \eta$.

Интегрируя уравнения (5.11), получают уравнение Пуазейля

$$V_c = \frac{\pi p d^4}{128 \eta l}, \quad \text{или} \quad \frac{4V_c}{\pi R^3} = \frac{\theta_c}{\eta}, \quad \text{или} \quad \theta_c = \eta \frac{4V_c}{\pi R^3} = \eta \frac{32V_c}{\pi d^3}, \quad (5.13)$$

представляющее собой основной теоретический закон ламинарного потока ньютоновской жидкости (используется и для неньютоновских систем, тогда под понятием «вязкость» условно подразумевается эффективная вязкость или какой-либо другой ее эквивалент).

Расход (подача) и среднеобъемная скорость связаны соотношением (5.3), в результате получают

$$\theta_c = \eta \frac{4w}{R} = \eta \frac{8w}{d} = \eta \frac{4V_c}{\pi d^3}. \quad (5.14)$$

В этих выражениях по аналогии с законом вязкого сопротивления Ньютона (5.12) находим консистентную переменную - «напряжение сдвига»

$$\theta_c = \frac{pR}{2l} = \frac{pd}{4l}, \quad (5.15)$$

и консистентную переменную - «градиент скорости»

$$\dot{\gamma} = \frac{32V_c}{\pi d^3} = \frac{8w}{d}. \quad (5.16)$$

Из уравнения Пуазейля (5.13) и с учетом (5.2) получают выражение определения вязкости жидкости

$$\eta = \frac{\pi d^4}{128Vl} \tau. \quad (5.17)$$

Для линейной системы Шведова-Бингама. Уравнение течения жидкости имеет вид:

$$\theta = \theta_0 + \eta_{nl} \dot{\gamma}(\theta) \quad \text{или} \quad \dot{\gamma}(\theta) = (\theta - \theta_0) / \eta_{nl}, \quad (5.18)$$

где θ_0 – предельное напряжение сдвига, Па;

η_{nl} – пластическая вязкость, Па·с.

Подставляя последнее выражение в общее уравнение (5.11) и интегрируя с учетом того, что, при $0 \leq r \leq R_0$ R_0 и $0 \leq \theta \leq \theta_0$ градиент скорости $\dot{\gamma}(\theta) = 0$, получаем уравнение Букингама, которому после замены и подстановки придается вид, подобный уравнению Пуазейля:

$$V_c = \frac{\pi d^4}{128\eta_{nl}l} \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{d_o}{d} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{d_o}{d} \right)^4 \right] = \frac{\pi d^4}{128\eta_{nl}l} f \left(\frac{d_o}{d} \right). \quad (5.19)$$

Запись этого уравнения в консистентных переменных имеет вид:

$$\frac{pd}{4l} = \eta_{nl} \frac{32V_c}{\pi d^3} \left[1 / f\left(\frac{d_o}{d}\right) \right], \quad (5.20)$$

где $f(d_o/d)$ – функция ядра потока.

Ее значение и обратное значение принимаются из графиков.

Для нелинейной модели Кэссона. Уравнение течения жидкости имеет вид:

$$\theta^{1/2} = \theta_o^{1/2} + [\eta_\kappa \dot{\gamma}(\theta)]^{1/2} \text{ или } \dot{\gamma}(\theta) = (\theta^{1/2} - \theta_o^{1/2})^2 / \eta_\kappa, \quad (5.21)$$

где η_κ – вязкость по Кэссону, Па·с.

Выполнив аналогичные действия описанные выше получают уравнение вида уравнения Пуазейля:

$$\begin{aligned} V_c &= \frac{\pi p d^4}{128 \eta_\kappa l} \left[1 - \frac{10}{7} \left(\frac{d_o}{d}\right)^{1/2} + \frac{4}{3} \left(\frac{d_o}{d}\right) - \frac{1}{21} \left(\frac{d_o}{d}\right)^4 \right] = \\ &= \frac{\pi p d^4}{128 \eta_\kappa l} f\left(\frac{d_o}{d}\right) \end{aligned} \quad (5.22)$$

В консистентных переменных его записывают в следующем виде:

$$\frac{pd}{4l} = \eta_\kappa \frac{32V_c}{\pi d^3} [1 / f(d_o/d)]. \quad (5.23)$$

Анализ уравнений (5.19) и (5.22) показывает, что: при $d_o=0$ (предельное напряжение сдвига отсутствует) жид-

кость 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 давления 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 жидкости имеет вид:

$$\theta = B_1^* [\dot{\gamma}(\theta)]^n, \quad (5.24)$$

Где

B_1^* – коэффициент, пропорциональный вязкости, Па·с;

n – индекс течения.

В результате проведения математических действий получают уравнение общего вида:

$$\frac{4V_c}{\pi R^3} = \frac{4n\dot{\gamma}_1}{3n+1} \left[\frac{R}{2B_0^*\dot{\gamma}_1} \left(\frac{\partial p}{\partial l} \right) \right]^{1/n}, \quad (5.25)$$

где B_0^* – коэффициент эффективной вязкости при единичном значении градиента скорости $\dot{\gamma}_1$, не зависящем от напряжения;

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

Данное уравнение в консистентных переменных имеет вид

$$\theta_c = B_0^* \dot{\gamma}_1 \left(\frac{3n+1}{4n} \right)^n \left(\frac{8w}{\dot{\gamma}_1 d} \right)^n, \quad (5.26)$$

$$\theta_c = A_1 \dot{\gamma}_*^n, \quad (5.27)$$

где A_1 – напряжение сдвига на стенке трубы при единичном значении относительного градиента скорости, Pa ;
 $\dot{\gamma}_*$ – относительный градиент скорости на стенке (консистентная переменная).

Расчеты трубопроводов и насадок для жидких, твердых и вязко-пластичных пищевых масс

Расчет трубопроводов и насадок для жидкообразных продуктов.

К жидкообразным технологическим средам относят ряд мясопродуктов (бульон, расплавленный жир, кровь, сывороотку крови и т. д.), а также жидкие среды, обеспечивающие технологический процесс (рассол, воду, моющие и стерилизующие растворы и др.). Некоторые из перечисленных текучих сред являются ньютоновскими жидкостями, другие могут в той или иной степени иметь аномалии вязкости. Поэтому значение общепринятого понятия «гидравлика» не будет соответствовать существу рассматриваемого вопроса. Его заменили термином «реодинамика», имеющим более универсальный смысл.

Основной задачей реодинамического расчета трубопровода является определение потерь давления или напора (энергии) в соответствующих сечениях трубы. Для большинства вышеперечисленных жидких сред общий энергетический баланс потока выражается уравнением Бернулли, которое для двух наиболее характерных сечений трубопровода имеет вид:

$$z_1 + p_1 / (\rho g) + w_1^2 / (2g) = z_2 + p_2 / (\rho g) + w_2^2 / (2g) + h_w, \quad (5.28)$$

где z_1, z_2 – геометрическая высота центров тяжести рас-

смаатриваемых сечений относительно горизонтальной плоскости сравнения, или удельная потенциальная энергия положения, m ;

$p_1/(\rho g)$, $p_2/(\rho g)$ – пьезометрическая высота в рассматриваемых сечениях, или удельная потенциальная энергия давления, m ;

p_1 , p_2 – давления в сечениях, $Па$;

ρ – плотность жидкости, $кг/м^3$;

$g=9,81 м/с^2$ – ускорение свободного падения;

$w_1^2/(2g)$, $w_2^2/(2g)$ – скоростной напор в рассматриваемых сечениях, или удельная кинетическая энергия потока, m ;

h_w – потери энергии (напора) между этими сечениями, m .

Потери давления адекватны удельным потерям энергии при течении жидкости, Они расходуются на преодоление сопротивлений движения по длине трубы и в местных сопротивлениях. Первые обусловлены внутренним и внешним трением в жидкости, вторые - изменением скорости по величине или направлению (краны, угольники, диафрагмы и пр.).

Потери давления и напора связаны соотношением:
 $p=\rho gh_w$.

Общие потери напора определяют по формуле:

$$h_w = h_{\text{дл}} + h_{\text{м}} = \left(\lambda l / d + \sum \zeta \right) w^2 / 2g , \quad (5.29)$$

где $h_{\text{дл}}$ – потери напора по длине, m ;

$h_{\text{мл}}$ – потери напора в местных сопротивлениях, m ;

λ – коэффициент сопротивления трения по длине трубы;

l – геометрическая длина трубопровода, m ;

ζ – коэффициент местного сопротивления.

На одном трубопроводе может быть несколько местных сопротивлений: вход и выход из трубы, коленья, запорная

арматура, поэтому величины коэффициентов суммируются.

Для определения потерь напора для прямых участков труб ($\sum \zeta = 0$) используют первую водопроводную формулу Дарси-Вейсбаха:

$$h_w = (\lambda l / d) \cdot (w^2 / 2g). \quad (5.30)$$

Для кольцевых, квадратных и тому подобных сечений вместо диаметра подставляют эквивалентный диаметр, определяемый по формуле:

$$d_э = 4F / \Pi, \quad (5.31)$$

где $d_э$ – эквивалентный диаметр, м;

F – площадь живого сечения потока, м²;

Π – длина смоченного периметра, м.

Для труб с местными сопротивлениями потери напора определяют по формуле:

$$h_w = (\lambda l_n / d) \cdot (w^2 / 2g), \quad l_э = d / \lambda \sum \zeta, \quad l_n = l + l_э; \quad (5.32)$$

где l_n – приведенная длина трубопровода, м;

$l_э$ – эквивалентная длина, м (потери напора по длине эквивалентны потерям напора в местных сопротивлениях реального трубопровода).

Наряду с формулами (5.30) и (5.32) потери напора определяют по видоизмененной первой водопроводной формуле:

$$h_w = 0,0827 \lambda l_n V_c / d^5. \quad (5.33)$$

Для ориентировочного расчета потерь напора в длинных трубопроводах (потери напора в местных сопротивлениях составляют менее 20 % потерь напора по длине) потери напора в местных сопротивлениях не рассчитывают, а увеличивают значение потерь напора по длине на 20-30 %.

Таким образом, решение задач по расчету потерь напора при транспортировании жидкообразных мясопродуктов (формулы 5.30, 5.32, 5.33) сводится к определению коэффициентов сопротивления. Расчеты по их определению рассмотрены ниже.

В общем случае коэффициент сопротивления трения по длине трубы λ зависит от критерия Рейнольдса и относительной шероховатости трубы:

$$\lambda = f(1/Re; \Delta/d), \quad (5.34)$$

где Δ/d – относительная шероховатость трубы;

Δ – абсолютная высота выступов шероховатости трубы, м.

Критерий Рейнольдса определяют по формуле:

$$Re = wd\rho/\eta, \quad (5.35)$$

где ρ – плотность жидкости, кг/м³;

η – вязкость жидкости, Па·с.

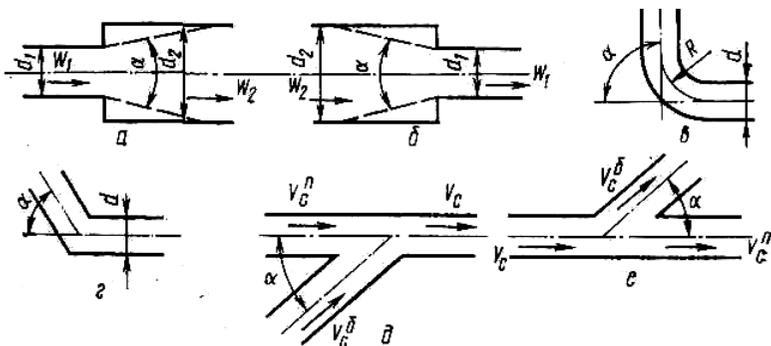


Рис. 5.2. Виды местных сопротивлений: а – внезапное расширение и конический диффузор; б – внезапное сжатие и конический диффузор; в – отвод, поворот; г – колено без закруглений; д – соединение потоков; е – разделение потоков

При транспортировании застывающих жидкостей существенное значение имеет температурный режим. Температура стенки трубы или самой жидкости должна быть на $10-20^\circ\text{C}$ выше точки плавления во избежание застывания жидкости или коркообразования на внутренней поверхности трубы. Температуру жидкости в конце трубы при естественном охлаждении определяют из теплового баланса по формуле:

$$K\pi dl[0,5(t_1 - t_2) - t_o] = c \frac{\pi d^2}{4} \rho w (t_1 - t_2);$$

$$S = 4K(l/d)/(c\rho w)$$

$$t_2 = St_o / (1 + 0,5S) + (1 - 0,5S) / [(1 + 0,5S)t_1]; \quad (5.36)$$

где $K=10-20 \text{ Bm}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$ – коэффициент теплопередачи;
 c – теплоемкость продукта, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$;
 ρ – плотность продукта, $\text{кг}/\text{м}^3$;
 t_1, t_2 – температура на входе и выходе из трубы, K ;
 t_o – температура окружающей среды, K ;

w – средняя скорость движения потока, м/с;

S – безразмерный комплекс, характеризующий геометрические, кинематические и энергетические параметры потока.

Расчет отверстий и насадок для жидкообразных продуктов

Основной задачей при расчете истечения через отверстия и насадки является определение расхода продукта. Истечение вязких жидкостей через отверстия и насадки рассчитывают по формуле:

$$V_c = \mu F_o \sqrt{2p / \rho}, \quad (5.37)$$

где μ – коэффициент расхода, принимается по таблице;

F_o – площадь входного сечения, м²;

p – давление перед входом в отверстие, Па.

$$p = p_o + \rho g H, \quad (5.38)$$

где p_o – давление перед входом в отверстие, Па;

H – высота слоя жидкости над отверстием, м.

Коэффициент расхода зависит от критерия Рейнольдса и длины насадка. Если $l=0$, то насадок превращается в отверстие.

Для маловязкой жидкости критерий Рейнольдса вычисляют по теоретической скорости истечения

$$Re_T = \rho d w_T \eta, \quad (5.39)$$

где η – вязкость жидкости, Па·с.

Теоретическую скорость находят из выражения

$$w_T = \sqrt{2p/\rho}. \quad (5.40)$$

Действительный критерий Рейнольдса $Re = 4V_c\rho/\pi d\eta$ связан с теоретическим соотношением

$$Re = \mu Re_T. \quad (5.41)$$

Приведенные значения коэффициентов расхода справедливы при

$$Fr = 2p/(\rho g d) > 10 \quad \text{и} \quad We = 2pd/\sigma > 250-2500,$$

где Fr , We – критерии Фруда и Вебера;
 σ – поверхностное натяжение жидкости, $H/м$.

Продолжительность истечения жидкости от уровня H_1 до уровня H_2 через малое отверстие в стенке вертикального цилиндрического или призматического сосуда определяют по уравнению

$$\tau = \frac{2F(\sqrt{H_1 + p_o/(\rho g)} - \sqrt{H_2 + p_o/(\rho g)})}{\mu F_o \sqrt{2g}}, \quad (5.42)$$

где F – площадь сечения сосуда, $м^2$;
 p_o – избыточное давление на свободную поверхность жидкости, $Па$;

F_o – площадь сечения отверстия, $м^2$.

Продолжительность истечения вязкой жидкости при $Re_T < 10$ при переменном уровне определяют по уравнению

$$\tau = \frac{29F\eta}{F_o d g \rho} \lg \left(\frac{H_1 + p_o' / (\rho g)}{H_2 + p_o' / (\rho g)} \right), \quad (5.43)$$

где d – диаметр отверстия, м.

При истечении из затопленного отверстия по уравнению

$$p_o = (p_o' + \rho g H_1) - (p_o'' + \rho g H_2), \quad (5.44)$$

где p_o' , p_o'' – давление на свободную поверхность слева и справа от перегородки, Па;

H_1 , H_2 – высота жидкости слева и справа от перегородки, м.

Расчет трубопроводов и насадок для твердообразных, пластично-вязких продуктов

Реодинамика твердообразных и пластично-вязких продуктов. Течение твердообразных и пластично-вязких мясо-продуктов (колбасные и мясные фарши, жиры при температуре, близкой к плавлению и др.) отличаются от течения жидкообразных тем, что кинетическая энергия потока (см. формулу) меньше по сравнению с аналогичным потоком жидкообразной системы, т.е. числа Рейнольдса, имеет небольшую величину. Это обусловлено высокой вязкостью и наличием предельного напряжения сдвига. Для описания энергетического баланса потока указанных продуктов уравнение Бернулли оказывается неприменимым.

Применительно к расчету трубопроводов и насадок с учетом структурно-механических характеристик продуктов (фарша) теоретические уравнения, описывающие их поведение, можно представить в следующем виде:

$$а) \quad p / (l / d) = A w_*^n,$$

$$\text{где } A = 4B_o^* \dot{\gamma}_1 \left[\frac{2(3n+1)}{\dot{\gamma}_1 d} w_1 \right]^n; \quad (5.45)$$

$$\text{б) } pd/(4l) = A_1 [8w/(\dot{\gamma}_1 d)]^n$$

$$\text{где } A_1 = B_o^* \dot{\gamma}_1 [(3n+1)/(4n)]^n; \quad n = 1 - m;$$

$$\text{в) } pd/(4l) = B_o^* \dot{\gamma}_1 \left[\frac{3n+1}{4n} \cdot \frac{8w}{\dot{\gamma}_1 d} \right]^n = B_o^* \dot{\gamma}_1 f_2(n, \dot{\gamma});$$

$$\dot{\gamma}_1 = 8w'/d; \quad w' = \dot{\gamma}_1 d/8;$$

где w_* – относительная среднеобъемная скорость, (отношение скорости к ее «единичному» значению), равно $w_* = w/w_1$;

$\dot{\gamma}_1$ – «единичный» градиент скорости, с^{-1} ;

w' – среднеобъемная скорость, соответствующая «единичному» градиенту, м/с ;

A, A_1 – коэффициенты, пропорциональные напряжению на стенке трубы;

B_o^* – эффективная вязкость при единичном значении градиента скорости, $\text{Па}\cdot\text{с}$;

w – скорость движения продукта, м/с ;

$w_1=1 \text{ м/с}$ – скорость, равная единице ее измерения;

p – потери давления по длине трубы, Па ;

l – длина трубы, м ;

d – диаметр трубы;

n – индекс течения продукта.

Для расчета фаршепроводов можно использовать также критериальное уравнение, учитывающее наряду с эффективной вязкостью предельное напряжение сдвига и относительную плотность.

Для определения потерь давления по длине фаршепровода А.В. Горбатовым предложено расчетное уравнение:

$$\begin{aligned}
 p &= 1800 d^{-0,8} \theta_o^{0,118} (\eta_{эф} \rho_{отн} w)^{0,882}, \\
 A &= 1800 d^{0,2} \theta_o^{0,118} (\rho_{отн} B w_1)^{0,882}, \\
 n &= 0,882(1 - m),
 \end{aligned}
 \tag{5.46}$$

где 1800 – опытно-расчетный коэффициент, $m^{-1,082}$;

$\rho_{отн}$ – относительная плотность продукта, $кг/м^3$;

B – эффективная вязкость при скорости, равной единице ее измерения, $Па \cdot с$;

m – темп разрушения структуры (определяют на основании вискозиметрических измерений).

Уравнение применимо при скорости движения продукта $0,01 < w < 1,60$ м/с и диаметре трубопровода $0,03 < d < 0,08$ м.

Данные для проведения расчетов принимаются из справочников а также из графических зависимостей полученных экспериментальным путем.

Расчет истечения твердообразных и пластично-вязких продуктов через отверстия и насадки

Наряду с гидравлическим расчетом трубопроводов могут иметь место расчеты потерь давления при истечении продуктов через отверстия и насадки. Общее давление перед входом в насадку p расходуется на преодоление сопротивлений p_m при внезапном сужении (вход), сопротивлений по длине насадка p_l , которые отнесены к входному диаметру и рассчитаны на цилиндрический насадок, и сопротивлений при расширении или сужении потока p_a за счет конусности (конусные насадки). Последние учитывают полный угол при вершине конуса α с соответствующим знаком. Общие потери определяют по формуле:

$$p = p_m + p_l + p_\alpha \cdot \quad (5.47)$$

Расчет общих потерь давления p при истечении фарша проводят по экспериментальной зависимости

$$p = 790B^{0,4}d^{-0,8}w^{0,56} + 2600ld\eta_{эф}w(1 + 0,08\alpha). \quad (5.48)$$

При $\alpha = 0$ формула превращается в расчетную для цилиндрических насадок, при $l = 0$ – для отверстий. При $\alpha \leq 12,5^\circ$ (расширяющийся насадок) происходит отрыв струи, и насадок работает как отверстие. Формула применима при $0,003 < d < 0,014$ м, угле конусности $\alpha = \pm 12,5^\circ$, $l/d = 0-75$, при скорости истечения $w = 0,01 - 6$ м/с.

В отличие от истечения фарша истечение крупнокускового мяса состоит из трех периодов: подпрессовки, сжатия до давления, соответствующего началу истечения (наибольшее давление), и само истечение.

Для определения давления истечения крупнокускового мяса рекомендуют зависимости вида:

$$p = a_1 \cdot 10^5 d^{-0,86} \quad \text{и} \quad p = a_2 10^5 w^{0,5}, \quad (5.49)$$

где a_1, a_2 – эмпирические коэффициенты (для говядины $a_1 = 2,3, a_2 = 130$; для свинины $a_1 = 0,9, a_2 = 45$);

d – диаметр насадок, м;

w – средняя скорость истечения, м/с.

Тема 6: Контроль процессов и качества продуктов по структурно-механическим характеристикам. Актуальность проведения контроля за технологическими процессами и качеством продукции

С каждым годом расширяется ассортимент, и увеличиваются объемы выпускаемой продукции предприятиями мясной промышленности. Технологические процессы производства продуктов связаны с большим количеством выполнения различных технологических операций, процессов, и применением большого количества различного технологического оборудования. При этом готовая продукция должна обязательно отвечать требованиям нормативно-технической документации, как-то ГОСТам, технологическим инструкциям (ТИ) или технологическим условиям (ТУ), в которых указываются показатели готовой продукции, которые в целом (совокупности) определяют само качество готовой продукции.

При этом вопрос о контроле технологических процессов и качества продукции стоит не просто как о каком-либо контроле, который выполняют рабочий, мастер, технолог, а о контроле объективном, проводимом с помощью приборной измерительной техники.

Сегодня на большинстве предприятий мясной промышленности, а также в других отраслях пищевой промышленности, при оценке такого показателя качества, как консистенция продукта, проводится только органолептически, т.е. путем надавливания, потирания, покусывания, разжевывания продукта и т. д. Органолептическая оценка консистенции продукта является субъективной оценкой и целиком зависит от чувственных личных восприятий дегустатора, эксперта. Она является только общей внешней оценкой и в случае получения «брака» не указывает на причины его возникновения.

Аналогичным образом проводится контролирование структуры сырья и при выполнении отдельных технологических операций, например, измельчение сырья на волчке (не учитывается нагрев сырья во время его прохождения через решетки и ножи, что может резко снизить пищевую ценность продукта, а также влагосвязывающую способность) или куттере, приготовление фарша на куттере (готовность фарша определяет рабочий путем размазывания, растирания на ладони, сжатия в комочек и т.д.) или в фаршемешалке, шприцевание фарша в оболочку, добавление активных различных добавок, тепловая обработка и т. д.

Обеспечить выпуск качественной продукции возможно лишь при постоянном контроле выполнения технологических процессов и качества сырья, полуфабрикатов и готовой продукции, на всех стадиях технологической обработки, используя различные методы контроля. В этой связи сегодня, как никогда ранее, вопрос о проведении контроля над технологическими процессами и качеством выпускаемой продукции является актуальным и особо значимым.

Автоматизированный контроль качества продуктов

В МТИММПе (МАПБ) для полной автоматизации процесса измельчения и перемешивания разработано специальное устройство (В. Д. Косой, Ю. А. Ивашкин, Ю.В. Самусенко и др.), снабженное (рис. 6.1) блоком управления дозаторами. Устройство содержит пусковое реле, реле времени, магнитный пускатель и сигнальные лампы (рис. 6.1 в). Преобразователь сил сцепления снабжен контактным механизмом, представляющим собой две сменные электрические пластины с установленными на корпусе электрическими контактами подачи компонентов и замыкатель этих контактов, расположенный на раме преобразователя. При этом контактный механизм электрической цепи связан с пусковым реле блока управления дозаторами.

Преобразователь сил сцепления с продуктом (рис. 6.1 а)

содержит неподвижно закрепленную раму и подвижно установленный относительно этой рамы корпус с рифленной поверхностью, соприкасающейся с продуктом. Контактный механизм преобразователя содержит две сменные диэлектрические пластины (регулирующую и контактирующую), жестко закрепленные на корпусе, и замыкатель контактов. Регулирующая диэлектрическая пластина состоит из контакта подачи компонента, повышающего структурно-механические характеристики продуктов, например белка, контакта оптимального предельного напряжения сдвига (ПНС), контакта подачи компонента, уменьшающего структурно-механические характеристики продуктов, например воды.

Контролирующая пластина имеет контакт степени измельчения. Контакты закреплены на сменной диэлектрической пластине и подключены к блоку управления дозатора. Кнопка «Пуск» КП и кнопка «Стоп» КС предназначены для пуска и остановки измельчителя при настройке и регулировке.

Устройство работает следующим образом. Реле времени настраивается так, чтобы определять структурно-механические характеристики недоизмельченного продукта через оптимальное время (например, $\tau=4$ мин). Нажатием кнопки «Пуск» КПА включается магнитный пускатель, производящий пуск двигателя измельчителя, и реле времени. Измельчаемый фарш взаимодействует с подвижным корпусом преобразователя, который перемещается вместе с регулирующей и контактирующей пластинами относительно замыкателя контактов. В зависимости от сил взаимодействия измельчаемого фарша и подвижного корпуса последний, перемещаясь вместе с контактами пластин, будет замыкать клеммы регулирующей или контактирующей пластины. Замыкание контактов обеих пластин происходит через время τ_1 или $\tau_1 + \tau_2$, заданное с помощью реле време-

ни, при условии, что ПНС обрабатываемого продукта соответствует показателю эталонной кривой (см. рис. 6.1б). Замыкание контактов подачи компонентов означает, что ПНС обрабатываемого продукта находится соответственно ниже (точка *в*) или выше (точка *г*) оптимального значения и для выведения ПНС на эталонную кривую требуется вводить компонент, соответственно повышающий (например, белок) или уменьшающий (например, вода) структурно-механические характеристики. Таким образом, контактный механизм – это программа, по которой обрабатывают пищевой продукт.

Оптимальная степень измельчения продуктов соответствует экстремуму (рис. 6.1 б) – точка *б*. Реле времени включает второе реле времени. Последнее настраивается на время τ_2 с таким расчетом, чтобы сумма $\tau_1 + \tau_2$ не превышала минимальное оптимальное время измельчения – 5 мин, например $\tau_2 = 50$ с, тогда $\tau_1 + \tau_2 = 4$ мин 50 с < 5 мин. При достижении продуктом оптимальной степени измельчения контакт оптимальной степени измельчения замыкается и отключает магнитный пускатель, останавливая электродвигатель измельчителя. Второе реле времени вводится в цепь управления с целью исключения возможности подачи компонента воды, уменьшающего структурно-механические характеристики продуктов в момент определения оптимальной степени измельчения продуктов. Экстремальное ПНС (точка *б*) находится в зоне между точками *д* и *а* (например, точка *е*) (см. 3-й случай). Нормально замкнутый контакт 2-2РВ реле времени 2РВ отключает пусковое реле 4РП через время $\tau_1 + \tau_2$, блокируя электромагнитный клапан. Аналогичным образом нормально замкнутый контакт 1-2РВ реле времени 2РВ отключением пускового реле 3РП блокирует электромагнитный клапан дозатора, исключая подачу компонента (белка), повышающего структурно-механические характеристики через время

$\tau_1 + \tau_2$. Кроме того, нормально разомкнутый контакт 3-2РВ реле времени 2РВ замыкается только в момент определения оптимальной степени измельчения через время $\tau_1 + \tau_2$.

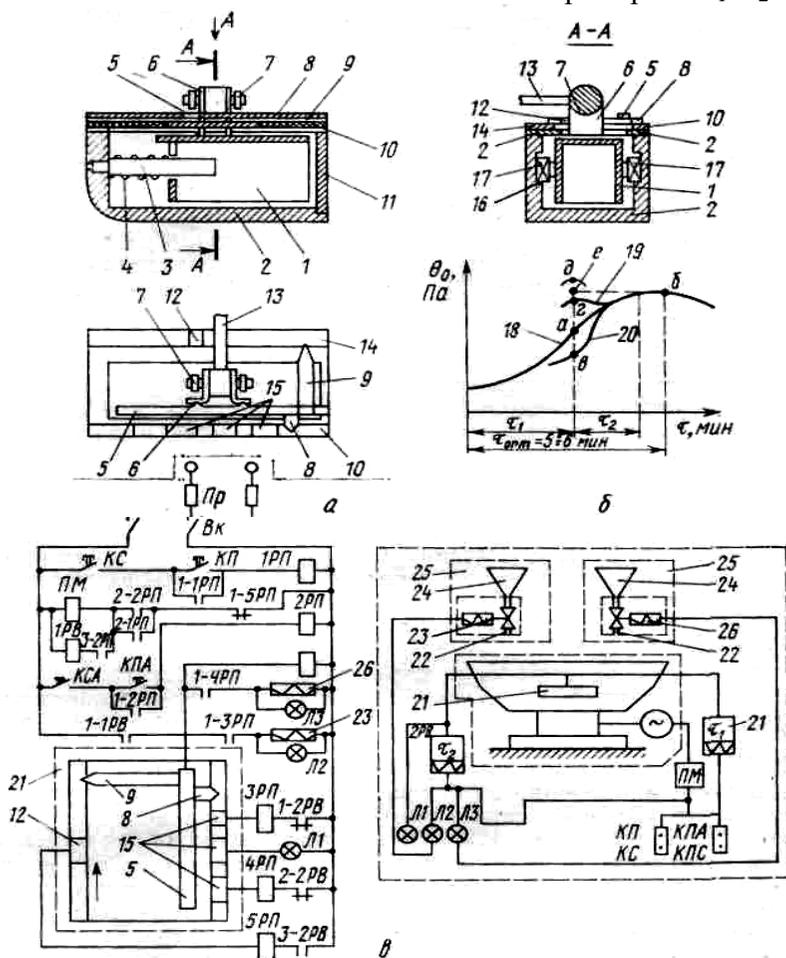


Рис. 6.1 Устройство для автоматического контроля процесса измельчения мясopодyктов по их структурно-механическим характеристикам: а – преобразователь сил сцепления; б – график изменения свойств при измельчении; в – принципиальная электрическая схема; 1 – непо-

движная рама; 2 – корпус с рифленным днищем; 3 – палец; 4 – пружина; 5 – планка замыкателя; 6 – кронштейн; 7 – шарнир; 8, 9 – замыкатели контактов соответственно регулирующей и контролирующей пластин; 10 – регулирующая пластина; 11 – крышка корпуса; 12 – контакт контролирующей пластины; 13 – рычаг; 14 – контролирующая пластина; 15 – контакты регулирующей пластины; 16 – направляющие; 17 – подшипники; 18, 19, 20 – кривые соответственно с эталонными, завышенными или заниженными свойствами; 21 – преобразователь; 22 – трубопроводы дозаторов; 23, 26 – электромагнитные клапаны дозаторов компонентов для повышения и понижения структурно-механических свойств фарша; 24 – бункер дозатора; 25 – дозаторы

В случае изменения ассортимента обрабатываемого продукта осуществляют замену диэлектрических пластин, которые соответствуют новой эталонной кривой. Таким образом, рассмотренное устройство позволяет автоматически контролировать процесс измельчения по заданной программе.

Связь между структурно-механическими свойствами продукта и сенсорной оценкой качества

Оценка качества пищевых продуктов может осуществляться двумя способами.

Первый способ – приборное измерение структурно-механических характеристик, выражаемых в определенных физических единицах.

Второй способ – сенсорная (органолептическая) оценка качества, т.е. субъективная чувственная оценка сопротивляемости, деформации и консистенции продукта.

Развитие квалиметрии и психореологии позволило обосновать показатели качества продуктов и разработать некоторые математические принципы построения обобщенных показателей качества.

Шерманом предложена классификация структурных характеристик продуктов, которая может быть использована для установления соотношения приборной оценки консистенции продукта с органолептической.

Согласно предложенной классификации характеристики разделены на три класса:

- первичные, связанные с аналитическими (содержание влаги, жира и других компонентов) и геометрическими (размер и форма частиц) свойствами;
- вторичные, связанные с основными реологическими свойствами (упругость, вязкость, адгезия);
- третичные, связанные с механическими процессами измельчения и жевания продукта.

Третичные характеристики имеют термины, наиболее часто используемые потребителями при оценке различных пищевых продуктов. Различают следующие разновидности третичных характеристик: для твердых продуктов – хрупкие, твердые, мягкие, нежные, рассыпчатые, порошкообразные, влажные, липкие, пористые, грубые (мясо, сыр, хлеб, печенье, шоколад, масло, овощи, фрукты); для полутвердых продуктов – фаршеобразные, тестообразные, крошащиеся, рассыпчатые, прилипающие, влажные, сухие, комковатые, нежные (фарш, пасты, плавленый сыр, джем); для жидких продуктов – жидкие, водянистые, густые, жирные, липкие (майонез, сливки, соусы, молоко, супы, растаившее мороженое, сиропы).

Исследованиями установлено, что сенсорная оценка вязкости продукта и напряжение сдвига, развиваемое при скорости сдвига около 50 с^{-1} , связаны между собой эмпирической зависимостью вида:

$$\psi = K_s \theta^{n_s}, \quad (6.1)$$

где ψ – сенсорная оценка вязкости продукта;

K_s, n_s – эмпирические коэффициенты.

В зависимости от вида продукта n_e находится в пределах от 0,5 до 2. Например, по данным Вуда, для супов-пюре $n_e=1,28$.

Следовательно, по вискозиметрическим данным можно определить реакцию человека при сенсорной оценке вязкости. Однако выводы, основанные на изучении соотношений приборной и сенсорной оценок, пока не могут быть использованы для широких обобщений. При этом должны быть учтены: значения коэффициентов корреляции; характеристики, измеряемые данным прибором, и условия опытов; однородность образцов продуктов, подвергнутых дегаустации; методы расшифровки сенсорных оценок.

Оптимизация технологических процессов на основе инженерной реологии

Качество готовых продуктов зависит от качества выполнения технологических операций и состава сырья. Под качеством выполнения технологических процессов понимается выполнение отдельных технологических способов обработки сырья при оптимальных режимных параметрах.

На качество готовой продукции существенное влияние оказывают режимные параметры технологической и машинной обработки сырья на стадиях производства. Определение оптимальных режимных параметров возможно путем использования универсальных реологических приборов при выполнении технологических операций.

Применение универсальных приборов для определения оптимальных режимов обработки рассмотрим на примере приготовления фарша, как одного из основных технологических процессов механической обработки – процессе измельчения мяса. Степень обработки фарша определяет глубину его технологической обработки и влияет на форму связей влаги, изменяя структурно-механические свойства.

В.Д. Косой и др. определили возможность применения приборов для определения оптимальных режимов куттеро-

вания. В качестве объекта изучения был выбран фарш для русских сосисок с использованием 50 % говядины первого сорта и 50 % жирной свинины с добавлением определенного количества воды и льда. Приготовление фарша проводили на куттере емкостью чаши 50 л. В процессе измельчения отбирали пробы фарша для определения реологических характеристик. Из каждой пробы с заданной продолжительностью измельчения по существующей технологии готовили сосиски, устанавливали потери массы в процессе термообработки, охлаждения и хранения с целью расчета выхода. Комплекс структурно-механических характеристик фарша и готовых колбасных изделий определяли соответственно на универсальных приборах: ротационном вискозиметре и ПМ-3 (конструкции А.С. Большакова) при различной продолжительности измельчения. Результаты исследований графически представлены на рис. 6.2.

Из рис. 6.2 видно, что при куттеровании фарша в подготовительном (начальном) периоде до $\tau = 5$ мин (начало формирования структуры фарша), когда частицы имеют размер, немного меньше начального, добавленная влага образует толстые прослойки, облегчающие деформацию: величины предельного напряжения сдвига (θ_0 , Па) и темпа (m) разрушения структуры (кривые 3, 4) уменьшаются, потери массы при термообработке этих проб фарша велики, готовый продукт получается сухим, жестким. При разрушении образца в рабочем органе прибора работа смятия ($A_{см}$, Дж/м²) и среза ($A_{ср}$, Дж/м²) возрастает (кривые 6, 7). При дальнейшем увеличении продолжительности куттерования (первый период) частицы интенсивно измельчаются, их общая поверхность увеличивается, влага из свободной переходит в поверхностно-связанную. В этот период фарш упрочняется, величины предельного напряжения сдвига и темпа разрушения структуры возрастают и достигают максимального значения, пластическая (η , Па·с) и эффектив-

ная ($B, Па \cdot с$) вязкость при скорости $1 м/с$ (кривые 1,2), а также потери массы при термообработке снижаются до минимальных значений. Образование первичной структуры фарша заканчивается при $\tau = 14 мин$, при этом предельное напряжение среза готового продукта ($\sigma, Па$) достигает наибольшего значения (кривая 5), что характеризует увеличение количества связанной влаги, а работа смятия и среза (кривые 6, 7) - минимального значения. Во второй период куттерования (перекуттерования) по прошествии $14 мин$ происходит некоторое «размолачивание» мышечных волокон мяса, температура продукта продолжает повышаться, увеличивается число мельчайших частиц, происходит аэрирование массы и эмульгирование жира, что ведет к вторичному структурообразованию. В этот период куттерования предельное напряжение сдвига и темп разрушения структуры снижаются, а пластическая и эффективная вязкости увеличиваются. При этом предельное напряжение среза готового продукта и сдвига фарша убывают, что свидетельствует об уменьшении количества связанной влаги. Продукт, изготовленный из перекуттерованного фарша, становится жестким и сухим, вследствие чего работы смятия и среза возрастают.

Из рис. 6.2 видно, что экстремальные значения структурно-механических характеристик фарша и готовых изделий соответствуют одному и тому же значению продолжительности измельчения – $14 мин$. Такая продолжительность куттерования является оптимальной. Несмотря на то, что структура фарша при нагревании из коагуляционной переходит в конденсационно-кристаллизационную, прочность ее, как видно из экспериментальных данных, обусловлена прочностью сырого фарша и способностью денатурированных белков удерживать воду (чем больше в продукте слабосвязанной влаги, тем более рыхлым оказывается готовый продукт).

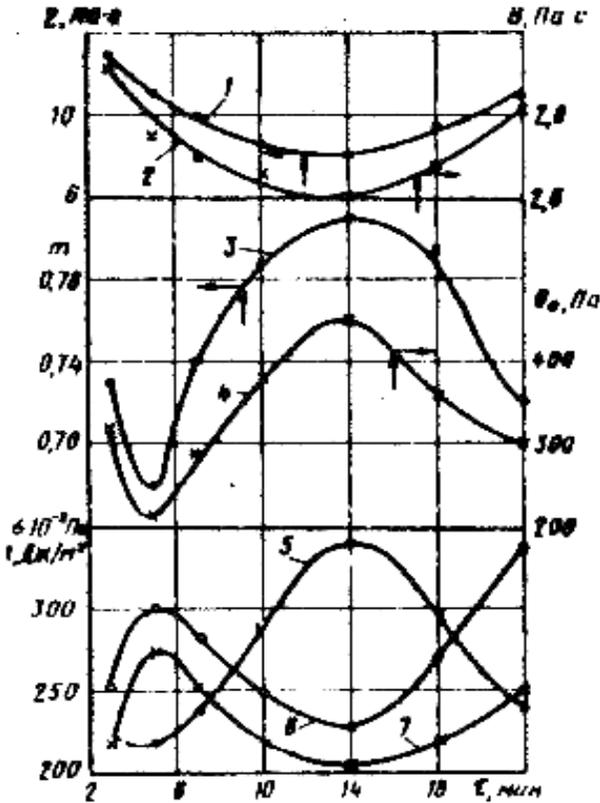


Рис. 6.2 Зависимость структурно-механических свойств колбасного фарша и готовых колбасных изделий из него от продолжительности измельчения: 1 – пластическая вязкость; 2 – эффективная вязкость; 3 – темп разрушения структуры; 4 – предельное напряжение сдвига; 5 – предельное напряжение срыва; 6, 7 – соответственно работа смятия и срыва

Поскольку цель куттерования – получение фарша с прочной структурой и наибольшей водосвязывающей способностью, основной характеристикой из всего комплекса сдвиговых свойств является предельное напряжение сдви-

га, а не пластическая или эффективная вязкость. Предельное напряжение среза характеризует прочность структуры готового продукта, которая зависит от качества измельчения мышечной, соединительной и жировой тканей, а также влагосодержания продукта. Предельное напряжение среза легко определять по диаграмме, и оно может служить объективной характеристикой качества готового продукта в производственных условиях. Работа смятия характеризует деформируемость и упругость продукта, по ней можно судить об интенсивности отделения влаги из продукта при сжатии. Работа среза позволяет судить о количестве слабосвязанной влаги в готовом продукте, качестве измельчения мяса и соединительной ткани.

Используя установленную взаимосвязь механических характеристик готовых колбасных изделий с продолжительностью измельчения, влагосодержанием сырого фарша и его структурно-механическими свойствами, можно изменять свойства фарша в соответствии с требованиями, предъявляемыми к готовым изделиям. В конечном счете, изменяя структурно-механические свойства фарша на основе объективных критериев их оценки, можно добиться получения продукта заданного качества.

Таким образом, универсальные приборы позволяют получить комплекс реологических характеристик, необходимых не только для создания научно обоснованных методик расчета машин и аппаратов с учетом особенностей обрабатываемого продукта, но и для определения и теоретического обоснования рациональных и оптимальных режимов технологической обработки, например, колбасных изделий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Горбатов А.В. Реология мясных и молочных продуктов. М.: Пищевая промышленность, 1979. 384 с.
2. Структурно-механические характеристики пищевых продуктов: справочник / под ред. А.В. Горбатого. М.: Легкая и пищевая промышленность, 1982. 296 с.
3. Рогов И.А., Горбатов А.В., Свинцов В.Я. Дисперсионные системы мясных и молочных продуктов. М.: Агропромиздат, 1990. 320 с.
4. Косой В.Д. Совершенствование процесса производства вареных колбас. М.: Легкая и пищевая промышленность, 1983. 272 с.
5. Реометрия пищевого сырья и продуктов: справочник / под ред. Ю.А. Мачихина. М.: Агропромиздат, 1990. 271 с.
6. Технологические трубопроводы мясокомбинатов / под ред. А.В. Горбатого. М.: Агропромиздат, 1989. 304 с.
7. Мачихин Ю.А., Мачихин С.А. Инженерная реология пищевых материалов. М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. 216 с.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
Тема № 1: Общие сведения о реологии	4
Тема №2: Научные основы инженерной реологии. Общие положения. Понятия и определения. Виды дисперсий. Типы структур и их классификация.....	9
Тема № 3: Основные структурно-механические свойства пищевых продуктов. Структурно-механические характеристики пищевых продуктов как объективный показатель воздействия	25
Тема 4: Методы и приборы для измерения структурно-механических свойств пищевых продуктов. Классификация методов и приборов для измерения структурно-механических свойств пищевых продуктов	35
Тема 5. Реодинамические расчеты трубопроводов и транспортных средств для вязко-пластичных сред.....	84
Тема 6: Контроль процессов и качества продуктов по структурно-механическим характеристикам. Актуальность проведения контроля за технологическими процессами и качеством продукции.....	111
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	123

Учебное издание

Никитин Виктор Васильевич

РЕОЛОГИЯ

МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ ДЛЯ СТУДЕНТОВ
ИНСТИТУТА ВЕТЕРИНАРНОЙ МЕДИЦИНЫ И BIOTEХНОЛОГИИ
НАПРАВЛЕНИЯ ПОДГОТОВКИ:

19.03.03 ПРОДУКТЫ ПИТАНИЯ ЖИВОТНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

Редактор Осипова Е.Н.

Компьютерный набор и верстка Никитина В.В.

Подписано в печать 14.03.2018 г. Формат 60 x 84 1/16.

Бумага печатная. Усл. п. л. 7,26. Тираж 100 экз. Изд. №5563.

Издательство Брянского государственного аграрного университета
243365, Брянская обл., Выгоничский р-н, с. Кокино.