

Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Локтионова Оксана Геннадьевна
Должность: проректор по учебной работе
Дата подписания: 30.10.2023 11:30:30
Уникальный программный ключ:
0b817ca911e6668abb13a5d426d39e5f1c11eabbf73e943df4a4851fda56d089

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Юго-Западный государственный университет»
(ЮЗГУ)

Кафедра товароведения, технологии и экспертизы товаров



РЕОЛОГИЯ СЫРЬЯ, ПОЛУФАБРИКАТОВ И ЗАГОТОВОК
ИЗДЕЛИЙ

Методические указания по выполнению практических работ для студентов направления 19.03.03 «Продукты питания животного происхождения»

УДК: 664

Составитель: А.Г. Беляев.

Рецензент

Кандидат сельскохозяйственных наук, доцент А.Г. Калужских

Реология сырья, полуфабрикатов и заготовок изделий:
методические указания по выполнению практических работ / Юго-
Зап. гос. ун-т; сост.: А.Г. Беляев. Курск, 2022. 257 с.: Библиогр.:
с.257

Приводится перечень практических работ, цель их выполнения, материальное обеспечение, вопросы для подготовки, краткие теоретические сведения, задания.

Предназначены для студентов направления подготовки 19.03.03 «Продукты питания животного происхождения» очной формы обучения.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать Формат 60x84 1/16.
Усл. печ. л. 14,93 Уч.-изд. л. 13,52 Тираж 50 экз. Заказ. Бесплатно.
Юго-Западный государственный университет.
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	
Практическое занятие №1. Основные понятия реологии	7
Практическое занятие №2. Реология сыпучих пищевых масс.	9
Практическое занятие №3. Реология структурированных пищевых масс.	10
Практическое занятие №4. Реология пищевых гелей.	13
Практическое занятие №5. Реометрия пищевого сырья, полуфабрикатов и готовой продукции. Реометрия сыпучих и структурированных пищевых масс.	16
Практическое занятие №6 Методы и приборы для определения структурно-механических свойств пищевых сред	19
Практическое занятие №7 Компрессионные свойства пищевых продуктов Приборы для измерения компрессионных характеристик	38
Практическое занятие №8 Сдвиговые свойства пищевых продуктов. Приборы для измерения сдвиговых характеристик	50
Практическое занятие №9 Поверхностные свойства пищевых продуктов. Приборы для измерения поверхностных характеристик	83
Практическое занятие №10 Реодинамические расчеты трубопроводов и транспортных устройств для вязко-пластичных сред	98
Практическое занятие №11 Измерение реологических свойств в процессе переработки и готовой продукции молочной промышленности. Расчет трубопроводного транспорта. Расчеты процессов дозирования.	126
Практическое занятие №12 Определение предельного напряжения сдвига пластично-вязких продуктов на коническом пластометре КП-3	136
Практическое занятие №13 Связь структурно-механических свойств и органолептической оценки показателей качества пищевых продуктов	144
Практическое занятие №14 Структурно – механические свойства животных тканей. Свойства твердообразных продуктов. Прочностные свойства замороженного связного сыра	160
Приложение 1 Задачи	169
Практическое занятие №15 Напряжение сдвига пищевых материалов. Расчет уравнений, описывающих кривые течения.	177

Практическое занятие №16 Поверхностные свойства пищевых продуктов. Оценка адгезии и внешнего трения сухих молочных продуктов.	194
Практическое занятие №17 Сдвиговые и компрессионные характеристики пищевых продуктов	208
Практическое занятие №18 Реологические модели реальных тел.	222
Практическое занятие №19 Оптимизация, совершенствование и автоматизация процесса созревания (посола) биотехнологического сырья	240
Практическое занятие №20 Оптимизация и автоматизация процесса перемешивания биотехнологических систем Мелкое измельчение сырья. Модернизация и усовершенствование конструкций волчков. Перемешивание сырья с солью.	254
Практическое занятие №21 Оптимизация и автоматизация процесса тонкого измельчения биотехнологического сырья	273
Практическое занятие №22 Теория гидродинамического (реодинамического) расчета трубопроводов	300
Практическое занятие №23 Техничко-экономические расчеты трубопроводного транспорта. Истечение пластично-вязких продуктов через отверстия и насадки.	326
Практическое занятие №24 Расчет трубопроводов для твердообразных продуктов	335
Практическое занятие №25 Реодинамические машины и транспортные устройства для вязко-пластичных сред.	352
Практическое занятие №26 Приборы и устройства для контроля и регулирования параметров движения среды. Манометры и приборы для измерения давления жидкостей и вязкопластичных продуктов. Манометры для измерения давления жидкообразных продуктов. Манометры, приборы и датчики для измерения давления вязко-пластичных продуктов	376
Практическое занятие №27 Приборы и устройства для контро-	399

ля и регулирования параметров движения среды. Расходомеры. Расходомеры переменного перепада давления. Расходомеры постоянного перепада давления. Турбинные расходомеры. Объемные и массовые расходомеры. Бесконтактные расходомеры.	
Список рекомендуемой литературы	428

ВВЕДЕНИЕ

Методические указания к выполнению практических работ предназначены для студентов направления для студентов направления подготовки 19.03.03 «Продукты питания животного происхождения» с целью закрепления и углубления ими знаний, полученных на лекциях и при самостоятельном изучении учебной литературы.

Методические указания разработаны в соответствии с требованиями Федерального государственного образовательного стандарта. Перечень практических работ, их объем соответствуют учебному плану и рабочей программе дисциплины. При подготовке к занятиям студенты должны изучить соответствующий теоретический материал по учебной литературе, конспекту лекций, выполнить задания для самостоятельной работы.

При выполнении практических работ основным методом обучения является самостоятельная работа студентов с высоким уровнем индивидуализации заданий под руководством преподавателя. Результаты выполненных каждым студентом заданий обсуждаются в конце занятий. Оценка преподавателем практических работы студента осуществляется комплексно: по результатам выполненного задания, устному сообщению и качеству оформления работы, что может быть учтено в рейтинговой оценке знаний студента.

Практическое занятие №1

«Основные понятия реологии» с использованием учебных и методических материалов.

Термины и определения

Реология — это наука о деформации и течении тел. Слово «реология» от греческого «рео», что означает течение.

Свободнодисперсные системы — системы, в которых частицы дисперсной фазы в состоянии свободно перемещаться по всему объему системы.

Связнодисперсные системы — системы, в которых частицы дисперсной фазы связаны между собой и не способны перемещаться относительно друг друга.

Тиксотропия — способность структурированных систем восстанавливаться после разрушения.

Адгезия — связь разнородных по форме тел (поверхность - частицы) при молекулярном контакте.

Аутогезия — связь однородных по форме тел (частицы - частицы) при их молекулярном контакте.

Трение — взаимодействие, которое возникает в местах контакта поверхностей и препятствует их относительному перемещению.

Течение — сдвиг слоя частиц относительно твердой поверхности или другого слоя частиц.

Задание1

Используя материал лекции ответит на вопросы

1. Понятие о реологии и деформации.
2. Виды связей между частицами.
3. Явление тиксотропии в какао тертом.
4. Силы сцепления при нагнетании макаронного теста в шнековой камере.

Задание2

Выбрать правильные ответы

1. Выберите, что относится к связнодисперсной системе:

А. сахарная пудра;

- Б. сахар-песок
- В. рис
- Г. пшено;
- Д. кофе молотый;
- Е. мука.

2. Тиксотропия - это..

- А. связь разнородных по форме тел при молекулярном контакте;
- Б. связь однородных по форме тел при молекулярном контакте;
- В. способность структурированных систем восстанавливаться после разрушения;
- Г. взаимодействие, которое возникает в местах контакта поверхностей и препятствует их относительному перемещению.

3. Сила взаимодействия двух частиц радиусом 1 мкм для конденсационно-кристаллизационных контактов составляет:

- А. 10^{-2} - 10^{-1} Н;
- Б. 10^{-3} Н;
- В. 10^{-6} - 10^{-5} Н;
- Г. 10^{-9} - 10^{-7} Н;

4. Связнодисперсные системы характеризуются:

- А. прочностью;
- Б. отсутствием прочности;
- В. течением подобно жидкостям;
- Г. отсутствием связи между частицами дисперсной фазы.

5. По реологическим свойствам все пищевые массы можно разделить на:

- А. свободнодисперсные;
- Б. связнодисперсные;
- В. сыпучие и упруго-вязко-пластические;
- Г. твердые.

6. К свободнодисперсным системам относятся:

- А. зерно;
- Б. мука;
- В. кофе в зернах;
- Г. кофе молотый;
- Д. сок с мякотью.

7. Пищевые массы с каким видом контактов между частицами обладают тиксотропными свойствами:

- А. коагуляционный;
- Б. конденсационно-кристаллизационный

Задание3

Решить задачи приложение 1 указанные преподавателем

Практическое занятие №2.

Выполнение заданий по теме «Реология сыпучих пищевых масс».

Решение задач

Сцепление — характеризует прочность сыпучего материала на сдвиг, которая обусловлена адгезией и аутогезией.

Пневмотранспорт — транспортирование сыпучих пищевых масс по материалопроводам под давлением.

Слеживание — нахождение сыпучих пищевых масс в неподвижном состоянии.

Активный способ борьбы со слеживанием — предотвращение слеживания в результате воздействия на сыпучую пищевую массу до начала слеживания.

Пассивный способ борьбы со слеживанием — возвращение слежавшемуся продукту исходной текучести или снижение отрицательного влияния слеживания.

Задание1

Используя материал лекции ответит на вопросы

1. Слеживание. Причины и следствие.
2. Способы интенсификации течения сыпучего материала.
3. Образование прилипшего слоя сыпучего материала и мероприятия по его предотвращению.

Задание2

Выбрать правильные ответы

1. Какой способ борьбы со слеживанием сыпучих пищевых масс является активным:

- А. вибрация и встряхивание;
- Б. применение скребков;
- В. аэрирование;
- Г. введение добавок (ПАВ).

2. Адгезионное сцепление равно произведению величины на силу адгезии слоя частиц.

3. При каких условиях возможно адгезионно-аутогезионное перемещение сыпучего материала:

- А. аутогезия и адгезия соизмеримы между собой;
- Б. адгезия больше аутогезии;
- В. аутогезия больше адгезии;
- Г. адгезия больше силы трения.

4. Трение препятствует перемещению частиц относительно.....

5. Согласно закону Амонтонна сила трения

- А. пропорциональна силе нормального давления;
- Б. величине внешнего давления;
- В. силе адгезии;
- Г. силе аутогезии;

Задание 3

Решить задачи приложение 1 указанные преподавателем

Практическое занятие №3.

Выполнение заданий по теме «Реология структурированных пищевых масс». Предоставление отчетов по заданиям предыдущей темы.
Решение задач

Деформация — изменение формы и размера тела под действием внешней силы.

Вязкость — свойство газов, жидкостей и структурированных тел оказывать сопротивление необратимому перемещению одной их части относительно другой при сдвиге, растяжении и других видах деформации.

Упругость — свойство тела восстанавливать форму и размеры после снятия нагрузки.

Пластичность — свойство тела сохранять форму и размеры после снятия деформирующей нагрузки.

Эластичность — способность тел через определенное время восстанавливать свою форму после деформации.

Ньютоновская жидкость — вязкая жидкость, подчиняющаяся в своём течении закону вязкого трения Ньютона, то есть касательное напряжение и градиент скорости линейно зависимы.

Неньютоновская жидкость — жидкость, обнаруживающая зависимость вязкости от скорости сдвига.

Ползучесть — перемещение, при котором структура пищевой массы не разрушается, а наблюдается смещение частиц относительно друг друга.

Релаксация — переход системы (пищевой массы) из неравновесного состояния, вызванного внешним воздействием, в состояние термодинамического равновесия.

Жесткость — произведение модуля упругости на площадь поперечного сечения пробы при ее сжатии или растяжении.

Кривая течения — график зависимости скорости деформации от напряжения.

Модуль упругости — коэффициент пропорциональности, связывающий напряжение и деформацию в уравнении закона Гука.

Напряжение — мера интенсивности внутренних сил, возникающих как сопротивление внешнему воздействию.

Реологическое тело — реальное тело, механическое поведение которого отличается от тел Гука и Ньютона.

Задание 1. Используя материал лекции ответит на вопросы

1. Внутренне напряжение сдвига при сушке макаронных изделий.
2. Реологические свойства кондитерского теста.
3. Идеально вязкое тело Ньютона.
4. Явление релаксации в макаронном тесте.
5. Течение шоколада и предел текучести.

Задание 2. Выбрать правильные ответы

1. Величина обратная вязкости:

- А. эластичность;
- Б. текучесть;
- В. пластичность;
- Г. модуль упругости.

2. При каких условиях идеальные жидкости способны течь (деформироваться):

- А. под действием самых малых внешних нагрузок;

Б. под действием самых больших внешних нагрузок;

В. под действием самой высокой температуры;

Г. под действием самой низкой температуры.

3. Согласно первой аксиоме реологии при равномерном изотропном сжатии все тела ведут себя одинаково, как..... тела.

4. В каком состоянии находится тело по модели Максвелла, если время релаксации значительно больше времени действия напряжения:

А. аморфном;

Б. жидком;

В. газообразном;

Г. твердом.

5. Текучесть -:

А. структура не разрушается, а наблюдается перемещение частиц относительно друг друга;

Б. структура разрушается и наблюдается перемещение частиц относительно друг друга;

В. структура не разрушается, и частицы находятся в неподвижном состоянии;

Г. вязкость системы наиболее максимальная.

6. Соответствие моделей реологическим свойствам:

Гука	пластичность
Ньютона	упругость
Сен-Венана-Кулона	вязкость

7. При каких условиях релаксация в системе происходит медленнее:

А. чем меньше

Б. $=0$

В. $=1$

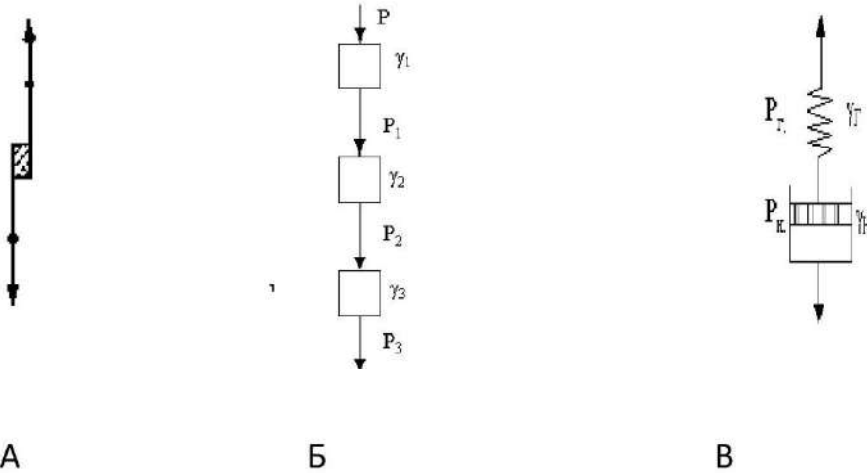
Г. чем больше

8. Соответствие структурированных тел реологическим моделям:

Упруго-вязко-пластическое тело	модель Максвелла
Вязко-упругое тело	модель Кельвина-Фойгта
Упруго-вязкое тело	модель Кельвина

9. Напряжение сдвига при течении тела вязкостью пропорционально скорости деформации.

10. Выберите определения, соответствующие рисункам:



А. последовательное соединение элементов реологических моделей;

Б. модель упруго-вязкого тела Максвелла в зависимости от его деформации;

В. модель идеально пластического тела Сен - Венана — Кулона.

Задание 3 Решить задачи приложение 1 указанные преподавателем

Практическое занятие №4.

Выполнение заданий по теме «Реология пищевых гелей». Предоставление отчетов по заданиям предыдущей темы.

Решение задач

Гели – дисперсные системы с жидкой дисперсионной средой, в которой частицы дисперсной фазы образуют пространственную структурную сетку.

Желатинирование – процесс образования гелей из коллоидных растворов.

Застудневание – процесс образования студней из растворов высокомолекулярных соединений.

Холодное отверждение – гелеобразование, вызываемое охлаждением.

Характерно для биополимерных гелей, которые встречаются в природе и формируют структуры в биологических системах.

Горячее отверждение – гелеобразование, происходящее при нагревании за счет денатурации биополимеров.

Гидрогели – гели, дисперсионной средой которых является вода.

Органогели – гели с углеводородной дисперсионной средой.

Ксерогель – пористое тело, частично сохраняющее трёхмерную структуру сети геля в сжатом или частично разрушенном виде (печенье, сухари);

Аэрогель – пористое тело, которое в основном сохраняет структуру сети (маленькая плотность, прозрачный).

Химические гели – гели, образованные ковалентными (полярные (ионные), неполярные – прочные, перманентные) связями.

Физические гели – гели, образованные водородными связями.

Энергия связей сравнима с энергией теплового движения молекул – лабильные, подвижные связи.

Задание 1. Используя материал лекции ответит на вопросы

1. Охарактеризовать процесс образования геля на примере желеино - фруктовых масс.
2. Описать свойства студней.
3. Привести значение солей - модификаторов при производстве желеино - фруктовых масс.
4. Дать характеристику студнеобразователюагару.

Задание2 Выбрать правильные ответы

1. Какой из перечисленных студнеобразователей не относится к полисахаридам морских растений:

А. агар;

Б. пектин;

В. агароид;

Г. фулцелларан.

2. Ксерогель – пористое тело, частично сохраняющее трёхмерную структуру сети геля в сжатом или частично.....

3. Расположите в правильной последовательности стадии производства формового мармелада на агаре:

А. формование и студнеобразование;

- Б. уваривание агаро-сахаро-паточного сиропа;
- В. высушивание и охлаждение мармелада;
- Г. замачивание агара;
- Д. приготовление мармеладной массы;
- Е. упаковывание и хранение;
- Ж. выборка из форм и обсыпка сахаром-песком.

4. Водные растворы студнеобразователей относятся к:

- А. лиофильным дисперсным системам;
- Б. пористым телам;
- В. аэрозолям;
- Г. эмульсиям.

5. Гели – дисперсные системы с жидкой дисперсионной средой, в которой частицы ... образуют пространственную структурную сетку.

6. При каких условиях получается прочный пектиновый студень:

- А. пектин, сахар, кислота;
- Б. пектин, соль-модификатор, сахар;
- В. пектин, вода;
- Г. пектин, сахар, вода.

7. До достижения точки гелеобразования связанность мономерных молекул незначительна, и обычно ... системы происходит довольно быстро.

8. При какой температуре уваривают желеино-фруктовые массы, которые при охлаждении переходят в структурированные системы:

- А. 80-900С;
- Б. 115-1200С;
- В. 90-950С;
- Г. 100-1100С.

9. Свойства гелей:

- А. предел текучести равен 0;
- Б. отсутствие текучести;
- В. предел текучести не равен 0;
- Г. отсутствие тиксотропии.

10. Источник получения желеобразователягеллановой камеди:

- А. бурые водоросли;
- Б. соединительная ткань крупного рогатого скота;

В. микроорганизмы *Sphingomonas elodia*;
Г. картофель.

Задание 3 Решить задачи приложение 1 указанные преподавателем

Практическое занятие №5.

Выполнение заданий по теме «Реометрия пищевого сырья, полуфабрикатов и готовой продукции. Реометрия сыпучих и структурированных пищевых масс». Предоставление отчетов по заданиям предыдущей темы.

Решение задач.

Реометрия – (экспериментальная реология) определение различных параметров реологических свойств веществ с помощью специальных приборов.

Пенетрометр – прибор, основанный на внедрении тела (чаще конуса) в структурированную систему.

Вискозиметрия – совокупность методов измерения вязкости жидкости, а также структурированных систем, к которым относятся пищевые массы.

Вискозиметр – прибор, используемый в вискозиметрии.

Сдвигометры и пластометры – приборы, основанные на тангенциальном смещении пластинки относительно структурированной системы (пищевой массы).

Нагружение – процесс изменения нагрузки во времени при исследовании структурно-механических свойств различных материалов.

Нагрузка – совокупность сосредоточенных или распределенных (по площади или объему) сил и моментов, приложенных к телу в процессе его переработки или при измерении его структурно-механических характеристик.

Фаринограф – прибор, предназначенный для контроля динамики реологического поведения пшеничного теста в процессе замеса по характеру изменения величины крутящего момента (фаринограмме) на приводе месильных органов тестомесильной емкости и определения параметров муки, теста и процесса его замеса: водопоглотительной способности муки, времени образования теста, ус-

тойчивости (стабильности) теста при замесе, сопротивляемости (стойкости) теста при замесе, эластичности, разжижения теста, комплексного показателя «силы» пшеничной муки.

Альвеограф - прибор, предназначенный для контроля динамики реологического поведения пшеничного теста при объемном растяжении определенной пробы его с помощью воздуха и определения: предельного давления воздуха, соответствующего упругой деформации теста; общей деформации теста; количества энергии, затрачиваемой на надувание шара до момента его разрыва; эластичности теста.

Амилограф – прибор, предназначенный для контроля кинетики реологического поведения клейстеризованной водно-мучной суспензии и определения: начальной температуры клейстеризации крахмала, максимальной вязкости крахмального геля и температуры клейстера. Контролируемые параметры позволяют определять автолитическую активность хлебопекарной муки и оценивать качество крахмалсодержащего сырья.

Экстенсограф – прибор, предназначенный для контроля динамики реологического поведения пшеничного теста при растяжении сформованного из него жгута и определения параметров: деформации растяжения, максимального усилия растяжения; количества энергии, затрачиваемой на растяжение жгута теста до его разрыва и др.

Структурометр – прибор, предназначенный для определения показателей качества рецептурных ингредиентов, полуфабрикатов и готовых изделий по их классическим и условным реологическим характеристикам.

Глютограф – прибор, предназначенный для контроля качества сырой (упругость, эластичность) и сухой клейковины.

Задание 1. Используя материал лекции ответит на вопросы

1. Определение реологических параметров сыпучих пищевых масс по времени истечения.
2. Определение аутогезии сыпучих пищевых масс по величине силы отрыва.
3. Описать устройство вискозиметра «Реотест».
4. Охарактеризовать принцип работы прибора «Амилограф».

5. Параметры упруго-вязко-пластических масс, определяемые на приборе «Фаринограф».

Задание 2. Выбрать правильные ответы

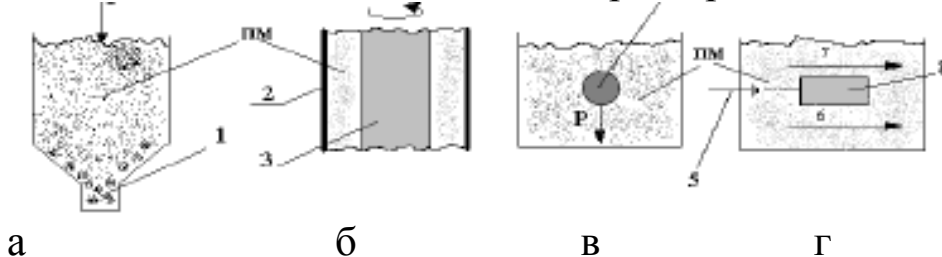
1. Основные реологические параметры, характеризующие сыпучие пищевые массы:

- А. коэффициент внутреннего и внешнего трения;
- Б. угол наклона поверхности;
- В. аутогезия и адгезия;
- Г. прочность на сдвиг и на разрыв.

2. Какой прибор основан на внедрении тела в структурированную систему:

- А. вискозиметр;
- Б. ареометр;
- В. пенетрометр;
- Г. структурометр.

3. Соответствие вискозиметров представленным схемам:



- А. ротационный;
- Б. вибрационный;
- В. капиллярный;
- Г. с падающим шариком.

4. Вискозиметрия – это совокупность методов измерения вязкости жидкости, а также....., к которым относятся пищевые массы.

5. Пластомер позволяет определить:

- А. растяжение образца;
- Б. эластическую и пластическую деформацию;
- В. модуль упругости;
- Г. вязкость, которая зависит от скорости движения пластины.

6. Предельное напряжение сдвига τ , характеризующее прочность структуры определяется по P_{max} ..

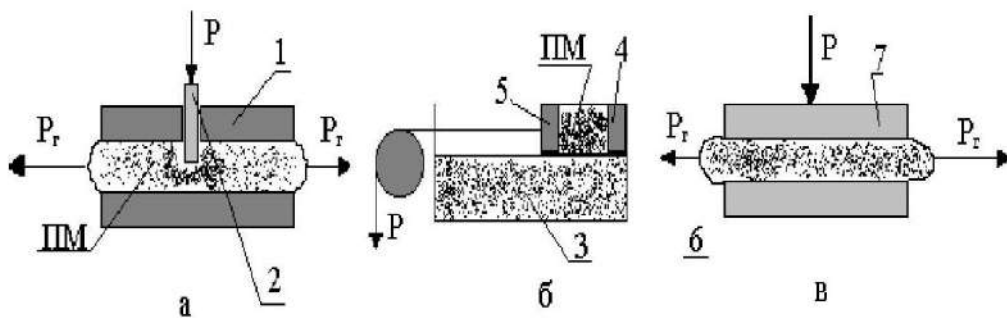
7. За счет какой силы происходит разрыв сыпучего материала по сечению:

- А. силы отрыва $F_{отр.}$;
- Б. силы адгезии $F_{ад.}$;
- В. силы аутогезии $F_{аут.}$;
- Г. силы трения $F_{тр.}$.

8. Сколько режимов работы имеет структурометр СТ-1М:

- А. 8;
- Б. 7;
- В. 6;
- Г. 9.

9. Какая схема работает по принципу растяжение-сжатие с использование раствора:



Задание 3. Решить задачи приложение 1 указанные преподавателем

Практическое занятие №6 Методы и приборы для определения структурно-механических свойств пищевых сред

План занятий

1. Теоретическая часть
2. Вопросы и задания для самоконтроля

1. Теоретическая часть

Методология. 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 интегрального или дифференциального методов. Первый метод измерения позволяет определить значения характеристик в любой момент времени. Вторым 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, при-

меняются 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 измеряемых 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 структурно-механических свойств в технологическом потоке.

Стабильное высокое качество готовой продукции возможно лишь в случае непрерывного контроля и регулирования заданных характеристик на всех этапах его изготовления. Наиболее чувстви-

тельны к изменениям технологических и механических параметров обработки являются сдвиговые свойства. На принципе измерения этих свойств основаны большинство контрольных и регулирующих реологических приборов.

Для измерения реологических характеристик колбасного фарша в потоке можно использовать устройство, разработанное С. И. Гончаровым и др. (рис.1), в котором ротор фиксируется с помощью замка. Привод ротора состоит из электродвигателя, связанного посредством муфты с двухскоростным редуктором. Редуктор через муфту соединен с валом, на котором закреплены упругий элемент и потенциометр. Подвижный контакт потенциометра кинематически соединен со скобой, жестко связанной одним концом с валом, другим — с упругим элементом. Исследуемый материал заключается в разъемочную форму, состоящую из двух полуцилиндров, консолью соединенных с параллельными вертикальными валами. Система разъема включает пневмо цилиндр, связанный через зубчатую шток-рейку с парой шестерен.

Устройство работает следующим образом. В рабочую полость пневмоцилиндра подается воздух. Зубчатая шток-рейка выдвигается и поворачивает шестерни на угол 90° до полного контакта полуцилиндров, которые в процессе поворота захватывают порцию исследуемого материала и заключают в зазоре между ротором и сомкнутыми полуцилиндрами. Затем включается привод ротора, и при двух скоростях вращения замеряется величина момента сопротивления материала вращению ротора, которая с потенциометра подается в регистратор. После замера в пневмоцилиндр подается воздух, зубчатая шток-рейка входит в пневмоцилиндр и, поворачивая шестерни на угол 90° , разводит полуцилиндры в стороны.

Через заданное время вновь срабатывает система разъема и в полуцилиндры захватывается новая порция исследуемого материала. Цикл повторяется. Смена материала в зазоре между цилиндрами обеспечивается выхватом в процессе смыкания полуцилиндрами новой порции и удалением прилипшего материала за счет вылавливания из зазора и с поверхности ротора. Поверхность ротора очищается также благодаря смыванию потоком материала, когда полуцилиндры разведены.

Автоматический регистрирующий вискозиметр, реализующий ротационный способ непрерывного измерения вязкости, при дос-

тижении заданного значения подает звуковой или световой сигнал. Вискозиметр содержит два сервомеханизма, электрически связанных между собой. Ось первого сервомеханизма соединена с синхронным микродвигателем. На оси второго укреплен вращающийся преобразователь.

Постоянный резистор связан с самопишущим прибором через мостовой выпрямитель напряжения. Выход выпрямителя через переменный резистор и диод соединен с управляющим электродом тиристора, в цепь которого включена катушка реле, имеющего два нормально замкнутых и один нормально разомкнутый контакты, коммутирующие цепи питания переменного тока пары сервомеханизмов и синхронного микродвигателя, электрического секундомера и сигнализации.

При включении прибора через первый и второй нормально замкнутые контакты реле подается напряжение на сервомеханизмы, двигатель и электрический секундомер (пуск). После погружения вращающегося первичного преобразователя в продукт, нарушается фазовое равновесие обоих сервомеханизмов и по соединительному проводу через резистор протекает ток, который соответствует измеряемой вязкости. Падение напряжения на постоянном резисторе через выпрямитель поступает на самопишущий прибор. При достижении заданного значения вязкости через тиристор подается напряжение на реле, контактами которого отключаются оба сервомеханизма, микродвигатель, секундомер и включается сигнальный элемент.

Приборы, основанные на изгибе или закручивании чувствительного элемента.

Во ВНИИМПе разработано устройство, в котором чувствительный элемент выполнен в виде стержня, укрепленного на упругом элементе — пластине. Изгиб пластины регистрируется потенциометрическим датчиком, представляющим собой реостат с ползуном. Стержень расположен в кожухе, имеющем вид сплющенного цилиндра с вертикальным вырезом в нижней части. На неподвижном кожухе находится реостат, который регулируют при помощи установочного винта. От ползуна и реостата отходят соединительные провода к вторичному прибору.

Для непрерывного контроля консистенции продуктов используют консистометры, принцип работы которых основан на измерении силы сопротивления исследуемого материала движущейся в нем пластины. Пластина совершает колебательное или вращательное движение в самом продукте. Значение консистенции (вязкости) регистрируется с помощью электронной силоизмерителя.

Недостатком этих консистометров и рассматриваемых ранее приборов является ограниченная область применения из-за невозможности использовать их для измерения консистенции сложных нестационарных потоков продукта, имеющих место, например, в смесителях.

На базе консистометров разработано устройство повышенной точности за счет обеспечения автоматической ориентации гибкой пластины ребром к потоку (рис. 2). Устройство имеет рабочую гибкую пластину, укрепленную неподвижно на конце штока. Опорой штока является шаровой шарнир, состоящий из шара, жестко скрепленного со штоком. Шток соединяется с электродвигателем через редуктор и механизм, преобразующий вращательное движение вала редуктора в колебательное движение штока. Электродвигатель установлен на поворотной платформе, соединенной посредством зубчатой передачи с редуктором и реверсивным электродвигателем. Электронная схема устройства включает тензорезисторы, наклеенные на обе стороны гибкой пластины и являющиеся элементами электрического моста тензометрического усилителя.

После включения устройства шток с укрепленной на конце пластиной, погруженной в поток исследуемого продукта, приводится в колебательное движение от электродвигателя. Реакция продукта вызывает изгиб пластины, причем величина прогиба пропорциональна вязкости продукта. Сопротивление тензорезисторов изменяется, что приводит к появлению в диагонали электрического моста усилителя знакопеременного сигнала.

После усиления сигнал подается на самописец для регистрации величины колебаний выходного сигнала. Если направление потока не совпадает с плоскостью пластины, то возникает дополнительная сила, вызывающая постоянный прогиб пластины. Это приводит к увеличению амплитуды одной из полуволн выходного сигнала и уменьшению другой. Разность этих амплитуд колебаний вы-

ходного сигнала выделяется в дифференциальном усилителе и подается на усилитель мощности и реверсивный двигатель, который поворачивает платформу до необходимого ориентирования пластины к направлению потока. Устройство можно использовать в различных аппаратах для непрерывного контроля консистенции продукта.

Вибрационные вискозиметры

Для непрерывного контроля технологических процессов широко применяют вибрационные вискозиметры, имеющие такие преимущества, как возможность автоматизации процесса измерения и передачи его результатов на значительные расстояния; удобство и простота применения; небольшие габаритные размеры первичного преобразователя, возможность контроля сред, имеющих сравнительно высокие температуры и давление; хорошие динамические характеристики.

Фирма НААКЕ (ФРГ) разработала и выпускает промышленные вибрационные вискозиметры серии Covistat. Прибор того же названия является базовой моделью серии. Это регулятор вязкости с дистанционным обслуживанием и дистанционным показанием. При превышении установленной величины он посылает электрические импульсы, которые могут непосредственно управлять электромагнитными клапанами до 220 В/2 А.

Вискозиметр (Франция) может работать в широком диапазоне значений вязкости и температуры. Чувствительным элементом является тонкая игла, закрепленная в корпусе прибора неподвижно с помощью эластичного уплотнения. Один конец иглы погружается в анализируемую среду, второй входит в состав колебательной системы, включающей себя расположенный на торце иглы постоянный магнит и возбуждающий колебания электромагнит. В известных вискозиметрах такого типа система возбуждения работает на одной постоянной частоте, что ограничивает рабочий диапазон вискозиметра. В данном приборе частота возбуждения вибратора подбирается равной его собственной резонансной частоте, что достигается за счет использования регулировочной цепи, включающей датчик амплитуды колебаний вибратора.

В вибрационном вискозиметре (Япония) вязкость определяют по изменению амплитуды вынужденных колебаний тела, погруженного в контролируемую среду. На основании прибора закреп-

лены два сердечника из мягкой стали с магнитными системами в виде двух катушек с одинаковыми характеристиками. Эти катушки включены так, что создаваемые ими магнитные потоки находятся в противофазе. По обе стороны от сердечника на упругих вибраторах закреплены две круглые насадки в форме дисков, которые погружают в измеряемую среду.

Вибраторы соединены упругими тягами с тензо преобразователями, закрепленными на основании тех же катушек с сердечниками. Катушки соединены с генератором колебаний и усилителем, а тензо преобразователи — с измерительным усилителем амплитуды и стрелочным указателем, шкала которого градуирована в единицах вязкости. При пропускании переменного тока через обмотки катушек образуется магнитное поле, создающее периодически действующую силу на вибраторы и насадки. Амплитуда вынужденных колебаний зависит от потерь энергии вибрирующими подвижными частями. Эти потери связаны главным образом с вязкостью среды.

А. А. Зингер и др. разработали вибрационный вискозиметр, измерение вязкости в котором также основано на зависимости между амплитудой колебания виброэлемента в исследуемой среде и ее вязкостью. При проведении измерений амплитуду колебаний виброэлемента выводят на максимум варьирования частоты колебаний и при получении однозначной зависимости между частотой вынужденных колебаний и вязкостью контролируемой среды по показаниям частотомера определяют вязкость.

Недостатком такого способа является уменьшение чувствительности вискозиметра с ростом вязкости среды, обусловленное уменьшением амплитуды колебаний.

Разработаны вискозиметры (Швеция), определение вязкости в которых основано на измерении энергии, необходимой для поддержания колебаний виброэлемента резонансного электромеханического преобразователя с резонансной частотой и постоянной амплитудой. Прибор работает следующим образом. Электрическая схема устройства для измерения вязкости жидкости поддерживает амплитуду колебаний пластинки за счет автоматического регулирования амплитуды переменного напряжения генератора. Сигнал, управляющий величиной выходного напряжения генератора, является мерой вязкости среды. У данного вискозиметра недостаточная точность измерения вязкости, за счет различного демпфирования

колебаний осциллятора изменяются добротность, а также его амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики, что приводит к срыву автоколебаний.

С. Е. Саввин, А. Д. Денисов и др. разработали устройство для непрерывного измерения вязкости жидкости, которое основано на определении энергии, необходимой для поддержания колебаний виброэлемента резонансного электромеханического преобразователя с резонансной частотой и постоянной амплитудой. В данном вискозиметре путем регулирования демпфирования виброэлемента электромагнитным преобразователем постоянного тока поддерживают постоянную добротность резонансного электромеханического преобразователя. По силе тока в цепи демпфирующего преобразователя судят о величине вязкости. Обеспечение постоянства динамических характеристик позволяет повысить точность и расширить динамический диапазон измерения.

Устройство (Франция), предназначенное для измерения таких реологических свойств, как вязкость, эластичность, пластичность. Его можно использовать для работы с различными продуктами пищевой промышленности (различные фарши, желе, кремы и т. п.).

Способ измерения основан на возбуждении в анализируемой среднегармонического или псевдогармонического сдвига во вращении. Частота гармонических колебаний находится в диапазоне частот от 1 МГц до 10 Гц. Вискозиметр снабжен кюветой с анализируемой средой, в которую погружается цилиндрическая измерительная головка, приводимая во вращение с помощью электродвигателя. Ось вращения головки может совершать гармонические колебания. При этом амплитуда колебаний лежит в диапазоне от 0 до 20*. В ходе измерения головка приводится во вращение с помощью одного электродвигателя, а второй электродвигатель приводит ось вращения головки в колебательное движение с помощью эксцентрика. С помощью датчика измеряют величину усилия, прикладываемого к головке для ее вращения. Описанное устройство в ходе измерения не разрушает структуру материала (вследствие плавности сдвига) и позволяет измерять временные изменения вязкости.

В. С. Илюшкиным, В. П. Табачниковым и др. разработан прибор для контроля структурно-механических свойств молочного сгустка, который при соответствующем монтаже позволит также заме-

рять структурно-механические характеристики фарша при его движении по трубопроводу

Принцип действия прибора следующий. Под действием эксцентрикового кулачка стержень через промежуточные звенья сообщает мембране колебательное движение. При этом ферромагнитные участки стержня совершают возвратно-поступательное движение внутри соленоидов, причем величина перемещения ферромагнитного участка, жестко соединенного со стержнем, постоянная, а перемещение участка, соединенного со стержнем посредством прорезной пружины, изменяется в зависимости от давления, испытываемого мембраной со стороны внешней среды. При заполнении исследуемым продуктом объема между мембраной и кожухом наружное давление на мембрану увеличивается и, следовательно, перемещение стержня мембраны уменьшится в результате деформации прорезной пружины. При изменении структурно-механических свойств продукта будет изменяться, и величина перемещения стержня мембраны, так как меняется также наружное давление на мембрану. Это приводит к появлению разбаланса соленоидов, что отражается в показаниях регистрирующего органа.

Для экспресс-анализа реологических параметров молочных продуктов (мороженого, сливок, кисломолочных продуктов ит. д.), а также колбасных фаршей в процессе их транспортирования по трубопроводам Замыцкий И. А. и др. разработали время импульсное информационно-измерительное устройство (рис. 3) на базе микропроцессора и времяимпульсного реодатчика, содержащего механический чувствительный элемент (индикатор), совершающий периодические колебания или перемещения в исследуемой среде. Варьированием формы и размеров индентора и выбором соответствующего участка его движения можно контролировать вязкость, напряжение сдвига и плотность контролируемой среды. Реодатчик содержит блок внешней электромагнитной силы, перемещающий индентор, блок фиксации начала и конца движения и блок формирования время-импульсного кода от импульсов запуска до остановки измерителя времени. Информация о реологических параметрах от реодатчиков через определенные интервалы времени поступает в оперативную память микропроцессорного устройства, которое сравнивает его с предыдущим значением и при достижении экс-

тремальных или заданных значений формирует соответствующий сигнал.

Во ВНИИМПе («Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова» Российской Академии Наук) разработан вибрационный вискозиметр, который состоит из погруженного в исследуемый продукт зонда и соединённого ним кабелем электронного блока. Зонд представляет собой металлический герметизированный цилиндр, в дно которого впаяна пат у волновая магнито стационарная пластинка. Одна половина ее выступает, а другая, находящаяся внутри цилиндра, помещена в катушку с возбуждающей обмоткой. Место впая пластинки катается узлом продольных колебаний, импульсно возбуждаемых в ней обмоткой.

Основная частота собственных колебаний пластинки обусловлена ее длиной. Колебания пластины, возбуждая в окружающей среде поперечные волны, затухают вследствие обратной реакции среды, зависящей от ее вязкости. Эту зависимость между вязкостью среды и скоростью затухания колебаний пластины зонда автоматически непрерывно регистрирует электронный индикатор, снабженный показывающим и записывающим прибором. Вибрационные вискозиметры позволяют измерять вязкость как ньютоновских, так и неньютоновских сред в широком диапазоне и могут использоваться для непрерывного измерения вязкости.

Капиллярные вискозиметры

Существует ряд приборов, позволяющих определять структурно-механические свойства колбасного фарша непосредственно в потоке при его движении по трубопроводу. Фарш, например, во время измельчения, постоянно пропускается с помощью насоса по трубопроводу через эти устройства, воздействуя на чувствительный элемент. Эти приборы пригодны для использования в системах регулирования различных технологических процессов, в том числе и транспортирования фарша по трубопроводам.

Капиллярный вискозиметр состоит из основания, питателя в виде рабочего цилиндра с плунжером, плавающего капилляра, соединенного гибкими эластичными кольцами с участками входа и выхода (рис. 4).

Питатель и участки входа и выхода жестко соединены с основанием, а плавающий капилляр — с устройством для измерения

осевого усилия, представляющим собой упругую балку с тензодатчиком.

При перемещении плунжера с некоторой постоянной скоростью исследуемый продукт, находящийся в рабочем цилиндре, протекает через участок входа, плавающий капилляр и участок выхода.

Это вызывает перемещение плавающего капилляра. Осевое усилие, пропорциональное вязкости, измеряется тензодатчиком. По формулам, связывающим динамические и расходные характеристики потока, рассчитывают вязкость исследуемого материала. При использовании в качестве питателя насоса возможно непрерывное измерение реологических характеристик продукта в потоке. Другой вискозиметр постоянного расхода (рис. 4 б) работает следующим образом. Исследуемый продукт с постоянной скоростью подается в камеру через отверстия в крышках. Продукт, проходя по винтовым нарезкам цилиндра, приводит его во вращение. Частоту вращения воспринимающего цилиндра, пропорциональную вязкости продукта, определяют по частоте изменения тока в катушках отсчетного устройства.

Изменение тока обусловлено прохождением ферромагнитных вставок наконечников над магнитопроводами катушек. Двусторонний ввод продуктов в камеру обеспечивает надежное центрирование цилиндра в камере и исключает одностороннее нагружение ограничительных вкладышей.

В МГУПБ (Московский Государственный Университет Прикладной Биотехнологии) разработаны приборы для определения реологических

свойств пищевых продуктов в потоке (рис. 5). Принцип их действия основан на том, что фарш во время измельчения непрерывно пропускается через подвижную горизонтальную трубку, имеющую по краям упругие элементы — сильфоны, пружины и т. д. Эти приборы позволяют получать действительные характеристики продукта.

Значения, измеренные в потоке, служат входными параметрами для системы регулирования, которую можно включить в состав технологической линии. Для контроля консистенции продукта в потоке сравнивают с эталонной.

Устройство с сильфонным упругим элементом для контроля за процессом измельчения фарша (рис. 5 а) работает следующим образом. При измельчении фарш с помощью насоса непрерывно по-

ступает в устройство. Ввиду малой длины трубопровода и небольшого давления перетирание фарша в насосе практически отсутствует, а., следовательно, структурно-механические характеристики не изменяются.

Величина перемещения трубки зависит от структурно-механических свойств фарша, например, эффективной вязкости. Поэтому скорость движения фарша, или величину градиента скорости, надо выбирать такую, при которой наиболее чувствительно изменяется эффективная вязкость в зависимости от степени измельчения. По достижении оптимальной степени измельчения показания прибора через преобразователь передаются вторичному регулируемому прибору, который даст команду на автоматическое отключение измельчителя. Для улучшения санитарно-гигиенической обработки, повышения чувствительности к изменению структурно-механических характеристик в устройстве (рис. 5 б) упругие элементы — сильфоны — заменены пружинами.

Жесткость пружин выбирают в зависимости от вида фарша, т. е. от диапазона изменения его свойств, что повышает точность измерений. Для создания герметичности сопряжения патрубков с чувствительным элементом прибора они выполнены конусными и снабжены лабиринтным уплотнением.

Рассмотренные приборы основаны на методе капиллярной вискозиметрии, который предполагает равномерное движение деформируемой среды и отсутствие влияния эффекта пристенного скольжения. Скорость сдвига в любой точке потока является результатом воздействия приложенного напряжения.

В устройстве (рис. 5 в), работающем по принципу моста, при протекании продукта через трубки сечения возникает перепад давления — разбаланс моста. Если изменяются структурно-механические характеристики, то изменяется и перепад давления, который регистрируется прибором. При наличии обратной связи этот прибор может регулировать консистенцию фарша. Показания мостового устройства основаны на том, что разность скоростей движения фарша в трубках характеризует индекс течения, а потеря давления в плечах моста — величины структурно-механических характеристик фарша. Поэтому для обеспечения большего перепада давления в плечах моста были приняты следующие значения скоростей; для труб большого сечения k_v 0,05...0,1 м/с, для труб мало-

го сечения $k_m = 1 \dots 1,5 \text{ м/с}$. На рис. 6 показано устройство для измерения реологических характеристик вязких и вязко-пластичных материалов в потоке. Оно содержит чувствительный элемент с конической внутренней поверхностью, расположенной между входным и выходным патрубками. Внутренняя поверхность выходного патрубка имеет форму усеченного конуса. Сопрягаемые поверхности чувствительного элемента и патрубков выполнены цилиндрическими и снабжены проточками.

Перемещение чувствительного элемента воспринимается пружиной. На наружной поверхности патрубков и чувствительного элемента установлен нагреватель, температура h_{oi} рева которого регулируется терморегулятором. Для обеспечения необходимой температуры на входе в устройство предусмотрен нагрев транспортного трубопровода, что резко снижает давление при транспортировании, например, мясопродуктов.

На чувствительном элементе закреплен индуктивный преобразователь измерительной системы, включенный в мост переменного тока, который соединен с фоточувствительным детектором. К выходу фоточувствительного детектора подключен регулирующий прибор, блоку правления и исполнительный механизм с сервоприводом, обеспечивающий переключение трехходового крана. Питание измерительной схемы осуществляется от блока питания.

Устройство работает следующим образом. Чувствительный элемент с помощью входного и выходного патрубков присоединяют к трубопроводу. При прохождении транспортируемого пищевого продукта через устройство чувствительный элемент, преодолевая усилие пружины, перемещается в продольном направлении. Для обеспечения сдвига массы по массе внутренняя поверхность выполнена шероховатой. Такое изготовление внутренней поверхности чувствительного элемента в сочетании с его конической формой и конической формой выходного патрубка повышает точность измерения устройства. Для уменьшения влияния на точность измерения жировой массы, налипающей на внутреннюю поверхность устройства, включают нагреватель. Температуру нагрева регулируют и поддерживают постоянной на уровне начальной стадии плавления жира с помощью терморегулятора. При изменении реологических характеристик материала, проходящего через устройство, изменя-

ется величина отклонения чувствительного элемента и соответственно индуктивность преобразователя.

Вследствие этого возникает разбаланс моста переменного тока, сигнал с которого через фоточувствительный детектор поступает на регулирующий прибор и блок управления. Команда с блока управления передается на сервопривод исполнительного механизма, который связан с трёхходовым краном. В случае отклонения реологических характеристик от эталонных показателей переключается трехходовой кран и продукт подается на переработку.

Таким образом, выполнение внутренней поверхности чувствительного элемента и выходного патрубка в виде усеченного конуса, а сопрягаемых поверхностей патрубков и чувствительного элемента цилиндрической формы, которая обеспечивает постоянство зазора между ними, а также применение обогрева чувствительного элемента повышают точность измерения реологических характеристик. Повышение же точности измерения данных характеристик, которые являются входными параметрами для введенной в данное устройство системы регулирования, состоящей из блока управления, исполнительного механизма с сервоприводом и трехходовым краном, даст возможность вводить устройство в автоматизированные линии производства, например, пищевых продуктов с заранее заданными свойствами, и осуществлять непрерывный контроль за качеством обрабатываемого продукта.

Рассмотренное устройство можно применять и для определения степени готовности мясного и колбасного фарша в процессе куттирования или перемешивания. Устройство пригодно для любого типа измельчителей и дает возможность регулировать процесс благодаря непрерывному измерению структурно-механических характеристик.

Поточный вискозиметр (рис. 7) замеряет структурно-механические характеристики колбасного фарша при транспортировании, куттеровании и т.д. Вискозиметр состоит из корпуса, чувствительного элемента в виде полой трубки со строго расчетным сечением, соединенного герметично с корпусом и зондом, выполненным в виде шара определенного диаметра. Пазы, образованные ребрами корпуса, спрямляют течение потока исследуемого продукта, исключая влияние боковых усилий, и предохраняют чувствительный элемент от возможных перегрузок. Во втулке, которая мо-

жет совершать качение относительно опор на центрах, установлены щуп и пружина, под действием которой щуп заостренным концом поджимается к зонду. На втулке установлена призма, которая острым ребром касается измерительного штока преобразователя перемещения. В качестве последнего использован механотрон.

Вискозиметр работает следующим образом. При движении фарша с заданной скоростью он проходит через пазы в корпусе и воздействует на зонд и чувствительный элемент. Под действием сил вязкого трения чувствительный элемент прогибается и зонд перемещается, что воспринимается щупом. Щуп поворачивается в опорах на центрах. При этом призма воздействует на шток преобразователя перемещения (механотрона). Величина выходного сигнала механотрона пропорциональна вязкости исследуемого продукта.

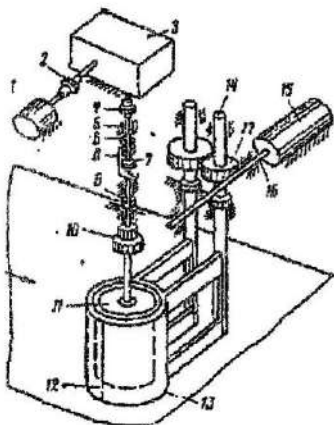


Рис. 1 Устройство для исследования реологических характеристик материалов;

1 — электродвигатель; 2 — муфта; 3 — двухскоростной редуктор; 4 — муфта; 5 — вал; 6 — упругий элемент; 7 — потенциометр; 8 — скоба; 9 — вал; 10 — замок; 11 — ротор; 12, 13 — полуцилиндры; 14 — вертикальные валы; 15 — пневмоцилиндр; 16 — шток-рейка; 17 — шестерни

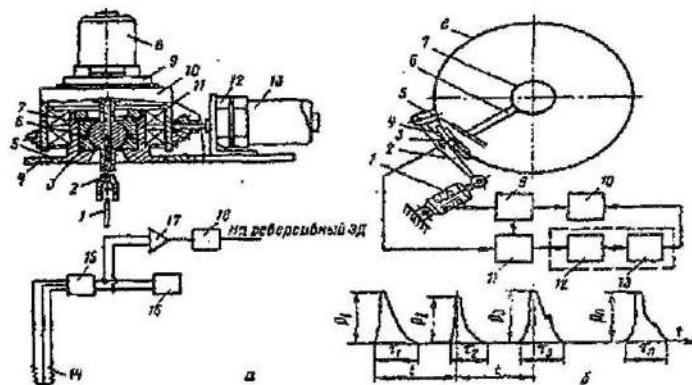


Рис. 2 Приборы для непрерывного измерения реологических свойств продуктов:

a — пластомер Б. С. Александрова и др.: 1 — рабочий орган; 2 — шток; 3 — нижний сухарь; 4 — станина; 5 — обойма; 6 — герметизирующая прокладка; 7 — верхний сухарь; 8 — электродвигатель; 9, 12 — редукторы; 10 — корпус преобразующего механизма; 11 — поворотная платформа; 13 — реверсивный электродвигатель; 14 — тензорезисторы; 15 — тензометрический усилитель; 16 — самописец; 17 — дифференциальный усилитель; 18 — моторный усилитель постоянного тока;

б — устройство Е. Л. Элера и С. Г. Силенко: 1 — электрогидравлический толкатель; 2 — рычаг; 3 — подвижная часть; 4 — датчик давления; 5 — пластина; 6 — кронштейн; 7 — ротор; 8 — корпус смесителя; 9 — блок управления; 10 — регистрирующее устройство; 11 — регистр запоминающих блоков; 12 — цифровой преобразователь; 13 — вычислительное устройство

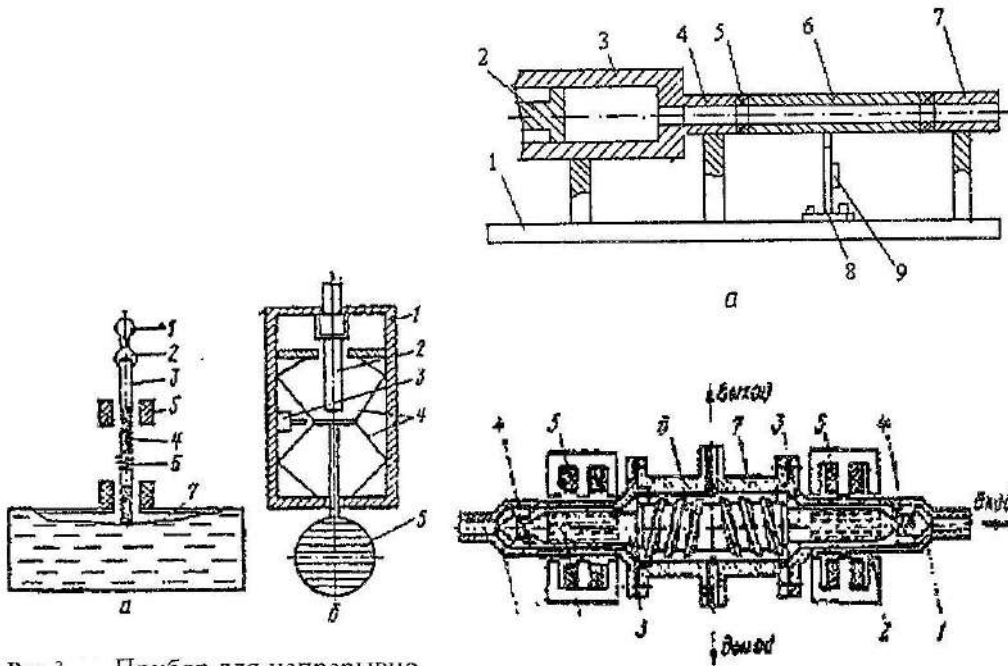


Рис. 3 Прибор для непрерывного измерения структурно-механических свойств продуктов:

a — системы В. С. Илюшкина и В. П. Табачникова: 1 — кулачок; 2 — ролик; 3 — стержень; 4 — ферромагнитные участки; 5 — соленоиды; 6 — прорезиненная пружина; 7 — мембрана;

б — автоматический пластомер системы И. А. Замышкого и др.: 1 — корпус; 2 — электромагнитная катушка привода пластины; 3 — регистрирующий датчик; 4 — система подвеса; 5 — пластина

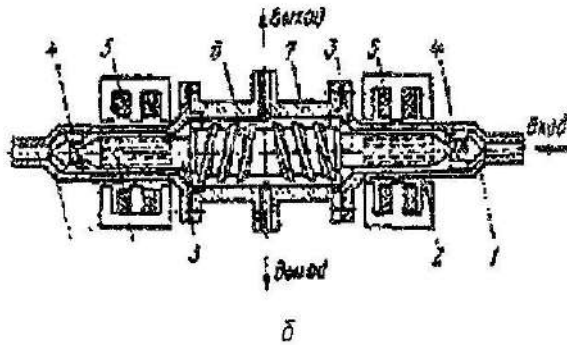


Рис. 4. Вискозиметры:

a — капиллярный: 1 — основание; 2 — плунжер; 3 — питатель; 4 — участок входа; 5 — эластичные кольца; 6 — плавающий капилляр; 7 — участок выхода; 8 — упругая балка; 9 — тензодатчик;

б — постоянного расхода: 1 — крышки; 2 — наконечники; 3 — ферромагнитные вставки; 4 — ограничительные вкладыши; 5 — катушки; 6 — шнек; 7 — корпус

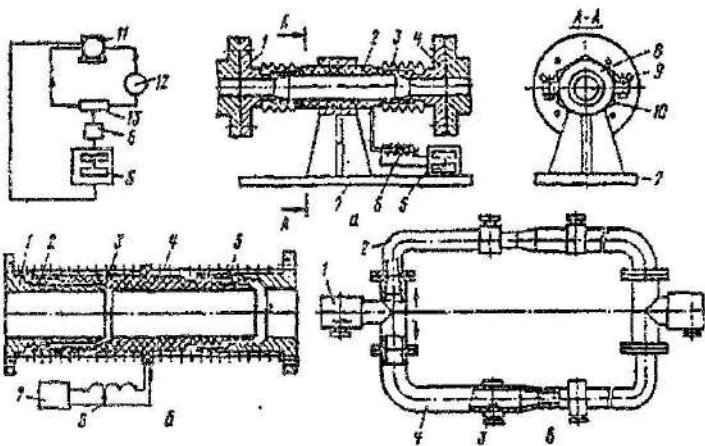


Рис. 5 Капиллярные вискозиметры:

a — с сифонными элементами: 1, 4 — патрубки с фланцами; 2 — трубка; 3 — сиффоны; 5 — регистрирующий прибор; 6 — преобразователь; 7 — основание; 8, 10 — верхняя и нижняя части направляющей втулки; 9 — барашки; 11 — измельчитель; 12 — насос; 13 — сифонный прибор в технологической схеме;

б — с пружинными элементами: 1, 5 — патрубки; 2 — проточки; 3 — чувствительный элемент; 4 — пружины; 6 — преобразователь; 7 — регистрирующий прибор;

в — мостового типа: 1 — магистральный трубопровод; 2, 4 — капилляры-плечи моста с различными диаметрами; 3 — датчик давления

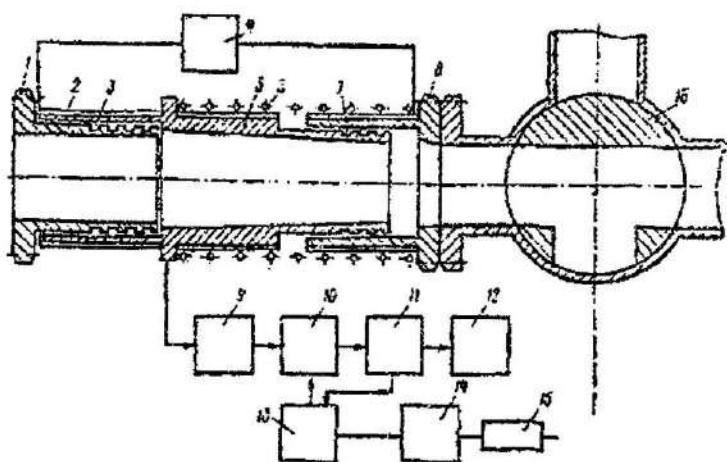


Рис. 6 Устройство для измерения реологических характеристик вязких и вязко-пластичных материалов в потоке:

1, 8 — входной и выходной патрубки; 2 — гибкий нагревательный элемент; 3 — проточки; 4 — терморегулятор; 5 — рабочий орган; 6 — пружина; 7 — проточки; 9 — индуктивный первичный преобразователь; 10 — синхронный детектор; 11, 14 — усилители; 12 — регистрирующий прибор; 13 — задачник с генератором; 15 — исполнительный механизм; 16 — трехходовой клапан

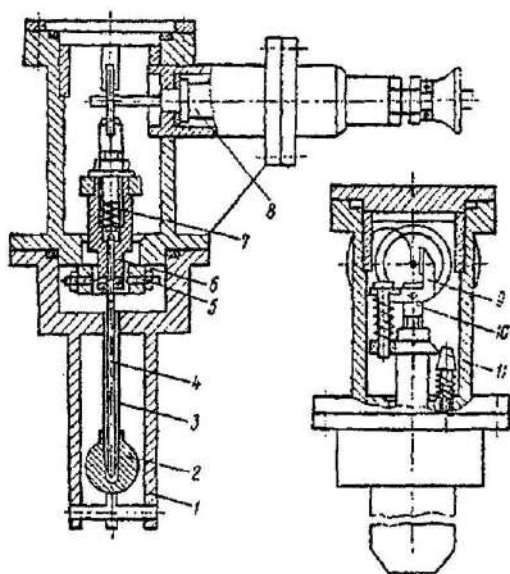


Рис. 7 Поточный вискозиметр:

1 — корпус; 2 — зонд; 3 — трубка; 4 — щуп; 5 — опоры; 6 — втулка; 7 — пружина; 8 — преобразователь перемещения; 9 — призма; 10, 11 — установочные винты

2 Вопросы и задания для самоконтроля

1. Какие принципы заложены в устройство приборов для определения реологических характеристик продукта в потоке?
2. Приведите схемы капиллярных вискозиметров и определите принцип их работы.

3. На каких принципах базируется методология исследований в реологии?
4. Какие этапы применительно к инженерной реологии будет включать методология исследований?
5. Какие методы измерения применяются для измерения структурно-механических свойств пищевых продуктов.
6. Какие приборы, применяются для измерения структурно-механических свойств пищевых продуктов (материалов), и как их классифицируют по следующим признакам
7. Какие приборы, применяются для измерения структурно-механических свойств в технологическом потоке.

Практическое занятие №7 Компрессионные свойства пищевых продуктов Приборы для измерения компрессионных характеристик

План занятий

1. Теоретическая часть
2. Вопросы и задания для самоконтроля

1. Теоретическая часть

Компрессионные свойства пищевых продуктов.

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

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

$$\rho = M / V, \quad (1)$$

где: M – масса продукта, кг;

V – объем продукта, м^3 .

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

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

$$\gamma = \rho \cdot g, \quad (2)$$

где: g – ускорение свободного падения, м/с^2 .

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

$$\rho = \sum_i c_i \rho_i \text{ или } \rho = 1 / \sum_i (c_i / \rho_i), \quad (3)$$

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

ρ_i – плотность компонента, кг/м^3 ;

i – число компонентов.

Коэффициент объемного сжатия (β , Па^{-1}) характеризует изменение объема (ΔV , м^3) продукта при изменении давления (Δp , Па) на единицу его измерения.

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

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

$$\beta_p = -\frac{1}{V} \cdot \frac{\Delta V}{\Delta p}. \quad (4)$$

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

$$\beta_p(p, t) = -\frac{\varepsilon_v(p, t)}{\Delta p}, \quad (5)$$

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

t – продолжительность действия давления на продукт, с;

ε_v – относительная объемная деформация.

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

$$\zeta = p_b / p_o. \quad (6)$$

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

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

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

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

Характеризуется упругость при растяжении – сжатии модулем упругости первого рода (E , Па). Для описания упругих свойств продуктов в различных зонах деформации (рис. 1.) часто недостаточно классических понятий о модулях упругости. Тогда можно применять модификации модулей упругости: условно-мгновенный, эластический, равновесный.

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

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

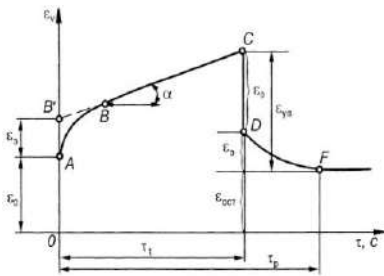


Рис. 1.. Типичная кинетическая кривая зависимости относительной объемной деформации от времени действия напряжения

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

Пищевые материалы при технологической обработке подвергаются воздействию внешних нагрузок, вызывающих их деформацию, вследствие которой в материале возникают внутренние напряжения. Даже при малых напряжениях соотношение между упругой, вязкой и пластичной компонентами деформации не сохраняется постоянным, и в материале происходит развивающийся во времени процесс *релаксации* (рассасывания) напряжений.

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

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

$$\sigma = \sigma_k + (\sigma_0 - \sigma_k)e^{-t/T_p}, \quad (7)$$

где σ – напряжение в момент времени t , Па;

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

T_p – период релаксации, с.

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

Это уравнение облакает в реальную форму, высказанную Максвеллом мысль, что пластичные тела текут в определенных границах напряжений. В отличие от Максвелла, принимавшего, что

напряжение в теле релаксирует до нуля, Шведов показал, что любое напряжение релаксирует не до нуля, а только до определенного предела σ_k , являющегося пределом упругости или пределом текучести, ниже которого релаксация не должна протекать.

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

Процессу релаксации напряжений в пищевых материалах сопутствует процесс *ползучести*. *Ползучесть* – медленное деформирование тела под действием постоянной нагрузки.

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

Релаксация напряжений и сопутствующая этому процессу ползучесть являются видами пластической деформации. Протекание процессов пластической деформации в условиях релаксации напряжений приводит к снижению упругих и повышению пластических свойств.

В свою очередь рост пластичности ведет к уменьшению энергии, затрачиваемой на формование изделий, при этом качество изделий улучшается.

Приборы для измерения компрессионных характеристик

Наряду со сдвигом, объемное или осевое сжатие, а также осевое растяжение являются основными типами механической деформации продуктов. В ряде машин, как-то волчках, шприцах, дозирочно-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. 2) компрессионных характеристик продуктов являются: осевое сжатие (а), осевое растяжение (б), одностороннее объемное сжатие (в) и двухстороннее объемное сжатие.

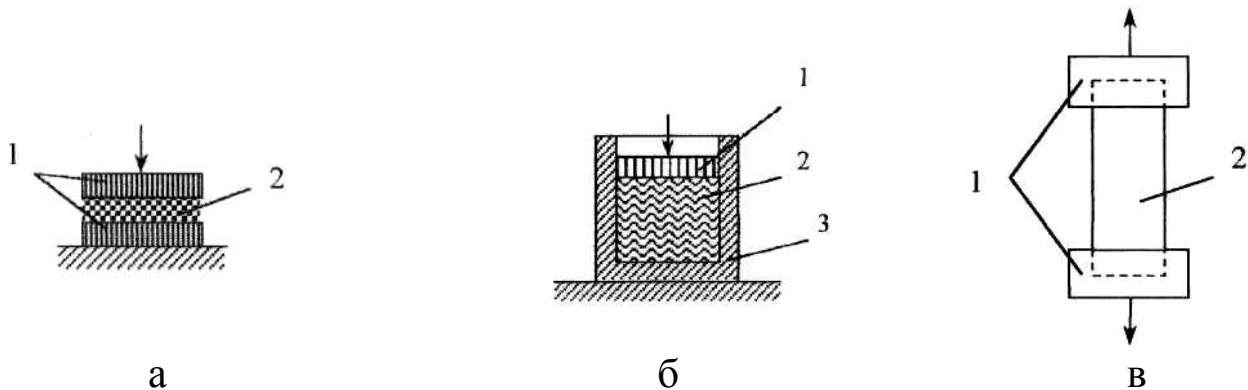


Рис. 2 Методы измерения компрессионных свойств продуктов

Прибор для измерения компрессионных характеристик продуктов (рис. 3). Прибор предназначен для определения деформационных свойств продуктов при осевом сжатии.

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 бобышка 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 выключатель и переключатель реверса. Прибор снабжен комплектом круглых пластин разного диаметра площадью 5, 7, 10, 15 см².

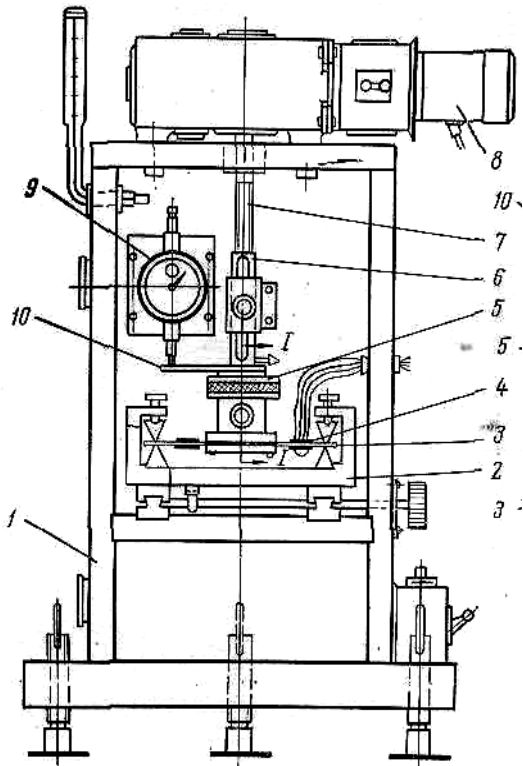


Рис. 3. Прибор для измерения компрессионных характеристик продуктов

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 передвигают 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 произошло 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). Прибор предназначен для измерения компрессионных характеристик при осевом сжатии продуктов.

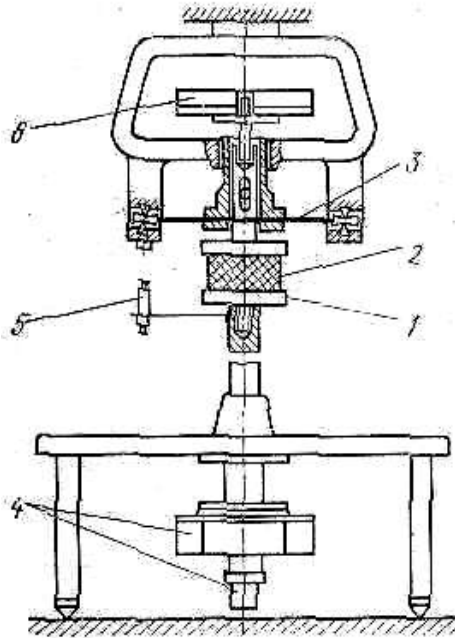


Рис. 4. Универсальный прибор ВНИИМПа

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

Консистометр Гепплера (рис. 5). Прибор предназначен для определения компрессионных свойств вязко-пластичных материалов, в частности для измерения относительных деформаций и построения кинетических зависимостей деформационных изменений материала под действием объемного сжатия.

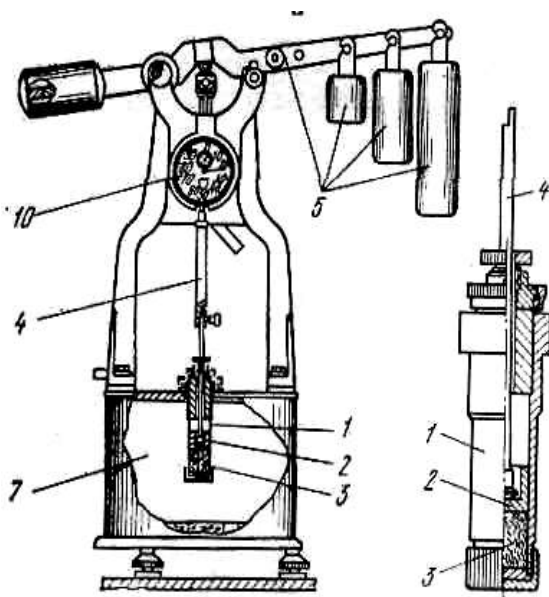


Рис. 5. Консистометр Гепплера

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 кон-

трольный груз и с помощью индикатора производят замер перемещения поршня. Замер величин абсолютных деформаций продукта производят через 20 сек или непрерывно. Рабочие пределы изменения давления у консистометра Гепплера от $1,56 \cdot 10^5$ до $15,6 \cdot 10^5$ Па. Максимальное время, необходимое для достижения равновесного состояния равно 180 сек, 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. 6) позволяет определять компрессионные и теплофизические свойства вязко-пластичных материалов при различных давлениях.

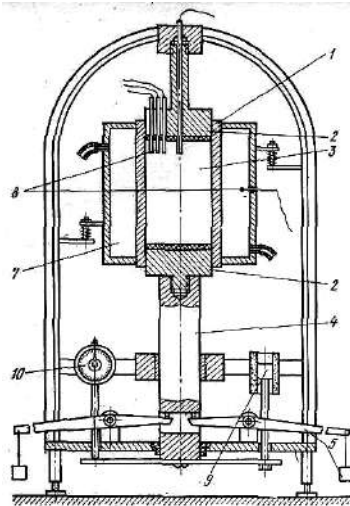


Рис.6. Компрессионный акалориметр МТИММПа (Московский технологический институт мясной и молочной промышленности)

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 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 исследуемо-

го 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 термопары (8) игольчатого типа. Запись показаний термопар производится потенциометром КСП-4.

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. 7) предназначен для определения усилий среза колбасных изделий, мяса, мясопродуктов и др.

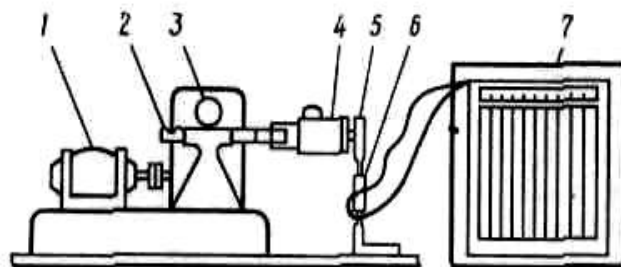


Рис. 7. Принципиальная схема прибора ПМ-3

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, состоящее 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.

2. Вопросы и задания для самоконтроля

1. Почему пластично-вязкие системы не следуют закону Паскаля?
2. С помощью каких формул можно определить плотность жидкообразных систем при различных температуре и давлении?
3. Дайте анализ кинетики процесса сжатия пластично-вязкого тела и его графической зависимости.
4. Приведите параметры, с помощью которых можно характеризовать процесс сжатия и формулы для определения.
5. Что такое релаксация напряжений и деформаций?
6. Какие случаи сжатия имеют практическую значимость при исследовании продуктов животного происхождения?

7. Какие задачи решаются при исследовании процесса сжатия продукта?
8. Величины каких релаксационных характеристик обуславливают показатель снижения напряжения или деформации продукта при его сжатии? Укажите примерные значения этих характеристик для мясного фарша.
9. Какое влияние оказывает давление на структуру продукта?
10. Как проявляет себя давление при воздействии на продукт в закрытой форме?
11. Изобразите принципиальные схемы приборов для исследования компрессионных свойств.
12. Определите теоретические основы, реализуемые в приборах для определения компрессионных свойств.
13. С помощью каких практических приемов сжатия можно определить релаксационные характеристики?

Практическое занятие №8 Сдвиговые свойства пищевых продуктов. Приборы для измерения сдвиговых характеристик

План занятий

1. Теоретическая часть
2. Вопросы и задания для самоконтроля

1. Теоретическая часть

Сдвиговые свойства молочных продуктов.

По виду приложения усилия или напряжения к продукту реологические свойства можно разделить на три связанные между собой группы. Сдвиговые свойства характеризуют поведение объёма продукта при воздействии на него сдвиговых, касательных напряжений. Изучение их занимает основное место в реологии.

Компрессионные свойства характеризуют поведение объёма продукта при воздействии на него нормальных напряжений в замкнутом объёме, между двумя пластинами или при каком-либо другом способе растяжения – сжатия образца продукта.

Поверхностные свойства характеризуют поведение поверхности продукта на границе раздела с другим, твёрдым материалом

при воздействии нормальных (адгезия, липкость) и касательных (внешнее трение) напряжений.

Сдвиговые характеристики жидкообразных систем

Коровье молоко представляет собой сложную полидисперсную систему, дисперсионной средой которой является вода (83 – 89 %), дисперсной фазой – жир, белки, газы т.д. (17 – 11%).

Вязкость молочных продуктов можно представить как сумму вязкости дисперсионной среды и дисперсной фазы, а так же приращение вязкости вследствие образования структуры:

$$\eta = 0,69 \cdot 10^{-3} \exp\left(\frac{19000T^*}{R}\right) \left\{ (1 + 4,5v_{ДФ}) + 1,67 \left[\exp\left(\frac{3800T^*}{R}\right) - 1 \right] \right\} \quad (1)$$

где: T^* – избыточная обратная абсолютная температура, 1/К;

R – универсальная газовая постоянная, 8,314 Дж/(моль·К);

$v_{ДФ}$ – объёмная концентрация дисперсной фазы, м³/м³.

Член, стоящий пред фигурной скобкой, характеризует изменение вязкости от температуры; $4,5v_{ДФ}$ – поправка на дисперсную фазу; второй комплекс в фигурных скобках учитывает приращение вязкости за счёт структуры.

Структурная составляющая вязкости молока исчезает после механического воздействия на молоко (например, многократное пропускание одной и той же порции молока через капиллярную трубку), что приводит к снижению вязкости.

У концентрированных белковых молочных продуктов, наоборот, структурная компонента вязкости настолько велика, что в сравнении с ней вязкостью дисперсионной среды можно пренебречь. При этом концентрированной белковой массе будут присущи предельное напряжение сдвига и аномалия вязкости.

Вязкость молока, замеренная на вискозиметре Гепплера, уменьшается с повышением температуры (рис. 1). Это явление наблюдается до тех пор, пока температура молока не перейдёт предел, выше которого начинается денатурация белков молока, сопровождаемая реакцией меланоидинообразования, вследствие чего темп возрастания вязкости молока с увеличением температуры повышается. Этот процесс необратим, поэтому после охлаждения мо-

лока до первоначальной температуры его вязкость будет выше прежнего значения.

Добавление к молоку соли повышает его вязкость, которая становится ещё больше после пастеризации молока при высокой температуре, добавление к молоку перекиси водорода также приводит к возрастанию его вязкости.

Вязкость сгущенных молочных продуктов уменьшается с повышением температуры, но увеличивается с повышением концентрации сухих веществ. Высокотемпературная обработка также приводит к повышению вязкости.

Сгущенное цельное молоко и обезжиренное молоко без сахара при концентрации сухих веществ 45% проявляют малую аномалию вязкости.

Сгущённые молочные продукты с сахаром являются псевдоэластичными неньютоновскими жидкостями. Для всех наименований сгущённых молочных продуктов с сахаром, выпускаемых отечественной пищевой промышленностью, разработана единая температурно-инвариантная характеристика вязкости, график которой показан на рис. 2:

$$(\eta/\eta_0) - (\tau_p \dot{\gamma}), \quad (2)$$

где: η – вязкость при градиенте скорости $\dot{\gamma}$ (с^{-1}), Па·с;

η_0 – наибольшая ньютоновская вязкость, Па·с;

τ_p – осреднённый период релаксации, с.

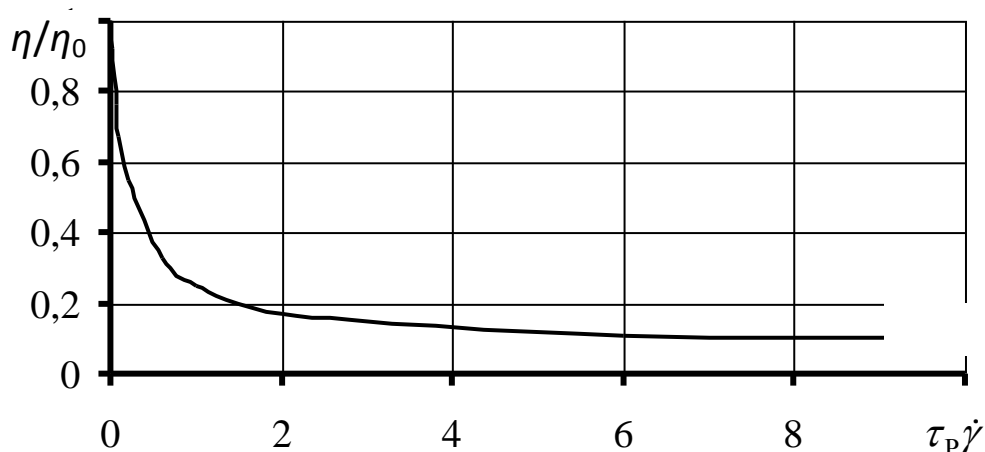


Рис. 2. Зависимость безразмерной вязкости (η/η_0) от приведенного градиента скорости ($\tau_p \dot{\gamma}$)

Для сгущённых молочных продуктов с сахаром осреднённое значение периода релаксации равно $2,5 \cdot 10^{-5}$ с. В интервале изменения

$(\tau_p \cdot \dot{\gamma})$ от $2 \cdot 10^{-2}$ до 3 безразмерная вязкость сгущённых молочных продуктов с сахаром может быть выражена по формуле:

$$\eta / \eta_0 = \frac{1}{3(\tau_p \cdot \dot{\gamma})^{0,85}} \quad (3)$$

Значения наибольшей ньютоновской вязкости сгущённых молочных продуктов с сахаром сразу же после сгущения должны находиться в пределах от 2 до 5 Па·с.

Вследствие развития структурообразования вязкость таких продуктов быстро увеличивается, особенно в течение первых суток. Заметное увеличение вязкости продолжается на протяжении первых трёх месяцев, после чего темп прироста вязкости резко снижается и значение вязкости асимптотически приближается к некоторой предельной величине.

На вязкость сгущённых молочных продуктов существенное влияние оказывает применяемый способ сгущения. Так, например, вследствие длительного пребывания молока в вакуумных выпарных аппаратах циркуляционного типа (без принудительной циркуляции) его вязкость оказывается выше, чем у молока, сгущённого в плёночных выпарных аппаратах (с падающей плёнкой) при одинаковых значениях концентрации сухих веществ. Вязкость сгущённых молочных продуктов с сахаром зависит также и от способа внесения сахара в молоко.

Вязкость кисломолочных продуктов во много определяется видом вносимой в молоко закваски, а также видом и количеством применяемого стабилизатора. Добавление к сливкам казеината натрия способствует упрочнению структуры сгустка и способствует лучшему восстановлению структуры. Так, например, достаточно к сливкам жирностью 20% добавить 1,2% казеината натрия, чтобы полученная из них сметана обладала такой же консистенцией, как и с 30%-ной жирностью.

Вязкость сливок коровьего молока. В зависимости от концентрации жира сливки могут быть отнесены как к ньютоновским, так и к неньютоновским жидкостям. Сливки с содержанием жира до 30% незначительно проявляют аномалию вязкости, и при инженерных расчётах их можно отнести к ньютоновским жидкостям. К ньютоновским жидкостям относятся также сливки и с более высо-

ким содержанием жира, если жир находится в расплавленном состоянии.

Вязкость сливок с содержанием жира 0,3 – 0,5 кг/кг может быть определена по формуле В.А. Ересько:

$$\eta = 0,07\varphi^{4,22}\dot{\gamma}^{-0,6}\exp\frac{5527\dot{\gamma}^{0,09}\varphi^{-0,4}}{RT} \quad (4)$$

Для сливок с содержанием жира 0,6 – 0,83 кг/кг

$$\eta = 0,9\varphi^{5,9}\dot{\gamma}^{-1,0}\exp\frac{8709\dot{\gamma}^{0,09}\varphi^{-0,15}}{RT} \quad (5)$$

Формула справедлива при значениях $\dot{\gamma} = 30 \div 1300 \text{ с}^{-1}$; $T = 293 \div 363^\circ \text{ К}$; $R = 8,314 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$.

Энергия активации сливок, проявляющих неньютоновское течение, зависит от концентрации в них жира, так и от величины градиента скорости.

Вязкость сливок во многом определяется фракцией жира с высокой и низкой температурой плавления, продолжительностью и условиями их хранения. Сливки после созревания перед сбиванием их в масло имеют большую вязкость, чем сливки, полученные из свежего молока и не подвергавшиеся созреванию.

Вязкость сливочного масла. Вязкость расплавленного масла практически соответствует вязкости сливок при одинаковой температуре и таком же содержании жира. Вязкость масла $\eta_{\text{ЭФ}}$ (Па·с), полученная на вискозиметре "Reotest" при температуре ниже температуры фазовых переходов большинства фракций жира, может быть определена по формуле:

$$\eta_{\text{ЭФ}} = K\dot{\gamma}^{n-1} \quad (6)$$

Вязкость масла, полученного методом непрерывного сбивания, можно также определить по формуле:

$$\eta_{\text{ЭФ}} = A\dot{\gamma}^{n-1}\exp(-at) \quad (7)$$

Сдвиговые характеристики твёрдообразных систем

В твёрдообразном состоянии при обычных условиях могут находиться растворы и суспензии казеина, казеинатов, коприципитатов, некоторые творожные изделия, белковые растворобразные

массы из подсырной сыворотки и расплавленная сырная масса. Сдвиговые свойства этих продуктов оценивают главным образом предельным напряжением сдвига и показателями вязкости.

Сдвиговые свойства сыров. При исследовании сдвиговых характеристик сыров наибольшее применение получили методы пенетрации и реологического зондирования.

Пенетрацию осуществляют с помощью полуавтоматических пенетрометров "Лабор" (Венгрия) или AP 4/1 (Германия). Измеряют в показателях пенетрации (1 ед. пенетрации равна $1 \cdot 10^{-4}$ м) глубину погружения в продукт конусного или шаровидного инденторов под действием полезной массы подвижной части прибора. По величине показателя пенетрации конусом вычисляют пенетрационную твёрдость θ_T , Па, пользуясь формулой Ребиндера для определения предельного напряжения сдвига:

$$\theta_0 = \frac{K_\alpha g M}{h_{\max}^2} = \frac{KM}{h_{\max}^2}, \quad (8)$$

где: M – масса нагрузки, действующей на конус, кг (за вычетом величины, компенсирующей трение и сопротивление пружины индентора);

K_α – константа конуса, зависящая от угла при его вершине.

Величина пенетрационной твёрдости тесно коррелирует (коэффициент 0,8 – 0,9) с предельным напряжением сдвига сыра θ_0 , определённым методом конического пластометра Ребиндера. При реологическом зондировании по методике ВНИИМСа в продукт с постоянной скоростью на глубину более высоты индентора внедряют металлический конус (диаметр основания 0,015 – 0,025 м, угол 45 – 90°) или шарик (диаметр 0,012 – 0,016 м), измеряя при этом силу сопротивления продукта.

По результатам реологического зондирования конусным индентором можно определить предел прочности τ_T , предельное напряжение сдвига (динамическое) τ_S , эффективную вязкость $\eta_{ЭФ}$, и модуль сдвига G , по формулам:

$$\tau_T = \frac{K_\alpha P_{\max}}{l^2}; \quad (9)$$

$$\tau_S = \frac{K_\alpha P_S}{l^2}; \quad (10)$$

$$\eta_{\text{ЭФ}} = \frac{K_{\alpha} P_S \sqrt{l^2 + r^2}}{2wl^2}; \quad (11)$$

$$G = K_{\alpha} \frac{(P_K - P_0) \sqrt{l^2 + r^2}}{2l^2(h_K - r)}, \quad (12)$$

где: P_{max} , P_S , P_0 , P_K – силы сопротивления внедрению индентора соответственно максимальная; на участке стационарного течения; в начале и конце гукковского деформирования, Н;

h_K – глубина погружения индентора, соответствующая величине P_K , м;

l – высота конуса, м;

r – радиус основания конуса, м;

w – скорость движения индентора, м/с;

K_{α} – поправка, зависящая от угла конуса при его вершине.

При шаровом инденторе эффективную вязкость условно рекомендуется определять по формуле Стокса:

$$\eta_{\text{ЭФ}} = \frac{P_S}{6\pi r w}, \quad (13)$$

где: r – радиус шарика, м.

С показателями качества сыра, в частности с органолептической оценкой консистенции, наиболее тесно коррелируют (коэффициент корреляции 0,80 – 0,92) показатели пенетрации и вращательного среза.

Сдвиговые свойства мясных продуктов

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, жи-

вотные жиры, мясокостный бульон, клеевые и желатиновые бульоны и др.

Вязкость крови. Значения вязкости крови убойных животных от концентрации сухих веществ и температуры, представлены в табл. 1.

Вязкость крови измеряют с помощью вискозиметра Гепплера и реовискозиметра Ротовиско.

Из результатов табл. 1. следует, что вязкость крови убойных животных зависит от концентрации сухих веществ и температуры. При этом, как при снижении концентрации сухих веществ, так и при повышении температуры вязкость крови значительно уменьшается.

Вязкость топленых животных жиров. Значения вязкости для разных видов топленых животных жиров представлены в табл.2.

Таблица 1

Зависимость вязкости крови от концентрации сухих веществ и температуры (градиент скорости 380 с^{-1})

Концентрация сухих веществ, кг на 1 кг крови	Вязкость $\eta \cdot 10^3$, Па·с, при температуре, °С			
	10	20	30	40
0,261	92	59	46	36
0,213	31	19	14	10
0,182	15	10	7	5
0,152	11	7	6	4

Таблица 2

Зависимость вязкости топленых животных жиров от температуры

Жир	Вязкость $\eta \cdot 10^3$, Па·с, при температуре, °С						
	40	50	60	70	80	90	100
Говяжий	-	29,0	21,0	15,8	12,5	10,0	8,4
Бараний	-	30,4	22,0	17,3	13,7	11,2	9,4
Свиной	39,0	26,7	19,5	15,0	12,0	9,7	8,2
Костный	36,2	25,1	18,6	14,5	11,6	9,6	8,1

Результаты показывают, что с увеличением температуры от 0 до 100 °С, вязкость всех видов топленых жиров уменьшается и имеет свое максимальное значение при температуре, близкой к температуре затвердевания причем, для говяжьего и бараньего она не определена, так как жиры переходят в другое аномальное состояние,

переставая быть как таковыми жидкостями. Среди жиров наибольшей вязкостью при одном значении температуры имеет жир бараний.

Таблица 3

Зависимость мясокостного бульона от концентрации и температуры

Концентрация сухих веществ, кг на 1 кг бульона	Вязкость $\eta \cdot 10^3$, Па·с, при температуре, °С					
	40	50	60	70	80	90
0,20	11,99	9,23	7,45	6,22	5,32	4,63
0,18	8,94	6,92	5,62	4,71	4,04	3,53
0,16	6,67	5,19	4,23	3,56	3,07	2,69
0,14	4,98	3,89	3,19	2,69	2,33	2,05
0,10	2,77	2,19	1,81	1,54	1,34	1,19
0,06	1,54	1,23	1,03	0,88	0,77	0,69
0,02	0,86	0,70	0,59	0,51	0,45	0,40
0,01	0,74	0,60	0,51	0,44	0,39	0,35
0	0,64	0,52	0,44	0,38	0,34	0,30

Вязкость мясокостного бульона, величины вязкости мясокостного бульона при различной концентрации и температуре приведены в табл. 3. Данные получены на капиллярных вискозиметрах и вискозиметре Гепплера.

Результаты таблицы показывают, что при повышении температуры вязкость мясокостного бульона уменьшается, а также отмечается резкое снижение вязкости при уменьшении сухого остатка.

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.). Значения

сдвиговых характеристик сосисочного фарша в области практически не разрушенных структур представлены в табл. 4.

Таблица 4

Структурно-механические характеристики сосисочного фарша

Показатель	Пределы измерения напряжения, Па	Значение величины
Модуль мгновенной упругости, Па	Меньше 100	$1,23 \cdot 10^4$
Эластический модуль упругости, Па	100-150	$0,8 \cdot 10^4$
Эффективная вязкость при деформации ползучести, Па·с	150-200	$16 \cdot 10^5$
Статическое предельное напряжение сдвига, Па	-	250
Наибольшая эффективная вязкость, Па·с	250-350	$5 \cdot 10^5$

Сдвиговые характеристики продуктов в области лавинного разрушения структуры определяют с помощью приборов, 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.

Значения основных сдвиговых характеристик для ряда мясных продуктов, измеренные при температуре 10 °С с помощью ротационного вискозиметра РВ-8, представлены в табл. 5.

Из таблицы видно, что величины реологических характеристик различных видов фарша отличаются довольно существенно. В определенной мере они показывают качественное различие структур продуктов, т.е. его состав, степень механической обработки и прочие.

Таблица 5

Сдвиговые характеристики различных видов мясного и колбасного фарша

Наименование фарша	Предельное напряжение сдвига, Па	Пластическая вязкость, Па·с	Коэффициенты		
			B , Па·с	B_o^* , Па·с	m
Говядина куттерованная (с водой)	700	18-20	6,1	510	0,73
Свинина полужирная куттерованная (с водой)	650	19-22	6,0	480	0,72
Колбаса:					
любительская	700	18-28	5,0	610	0,79
докторская	540	16-19	4,3	430	0,75
чайная	500	-	3,5	430	0,79
ливерная при t , °С					
30	2200	-	6,0	780	0,80
60	100	-	3,0	390	0,80
Сосиски свиные	450	9-11	3,0	320	0,77
Котлеты	400	9-14	3,5	360	0,76

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.

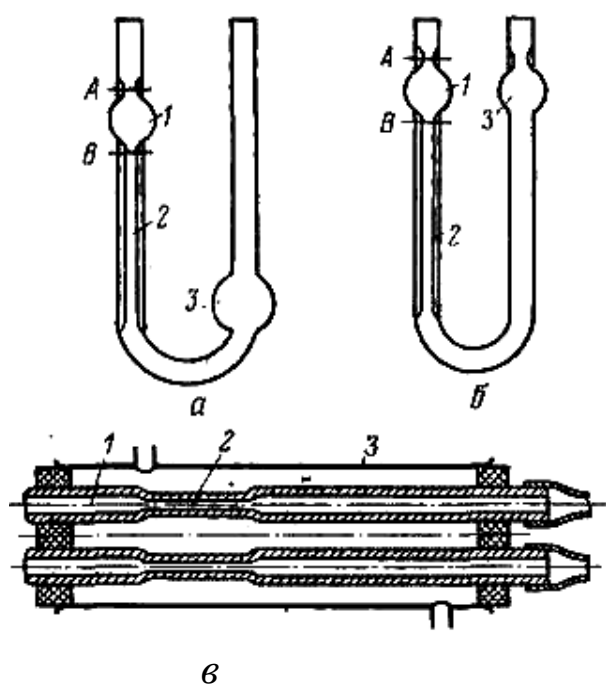


Рис. 3 Капиллярные вискозиметры:
 а) - вискозиметр Уббеллоде; б) - вискозиметр Освальда; в) - вискозиметр ВК-4

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 Уббеллоде (рис. 3 а) за счет гидростатического давления, а Освальда (рис. 3 б), за счет создания давления или вакуума на одном конце трубки. Вязкость на приборах Уббеллоде и Освальда обычно определяют по отношению к известной вязкости стандартной жидкости (вода, касторовое масло, глицерин).

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

$$\eta = \eta_0 \left[\frac{\rho \tau}{(\rho_0 \tau_0)} \right], \quad \text{или} \quad \eta = K \rho \tau, \quad (14)$$

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. 14 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 Уббелоде, 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), 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.

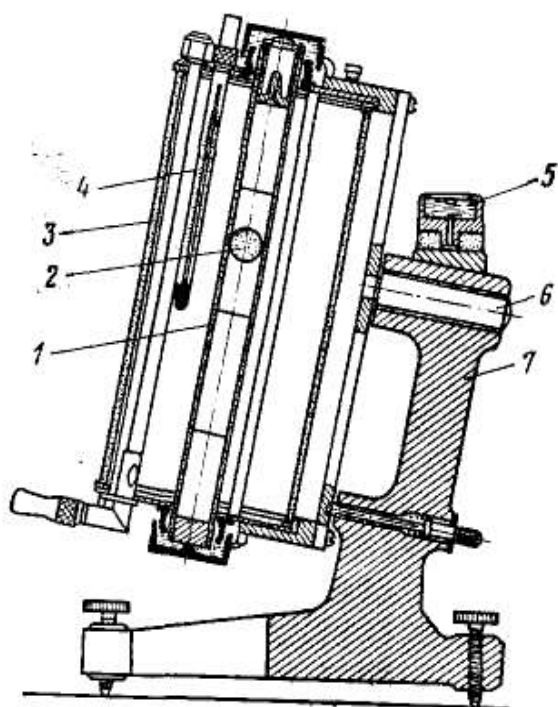


Рис. 4 Шариковый вискозиметр Гепплера

В начале измерений, в прецизионную трубку заливается 30 см³ 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 подвергается 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

$$\eta = K(\rho_{ш} - \rho_{жс})\tau, \quad (15)$$

где $\rho_{ш}$, ρ - плотность материала шарика и исследуемой жидкости соответственно, кг/м³; τ - время перемещения шарика на участке между метками, сек; 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, вязко-пластичных 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.

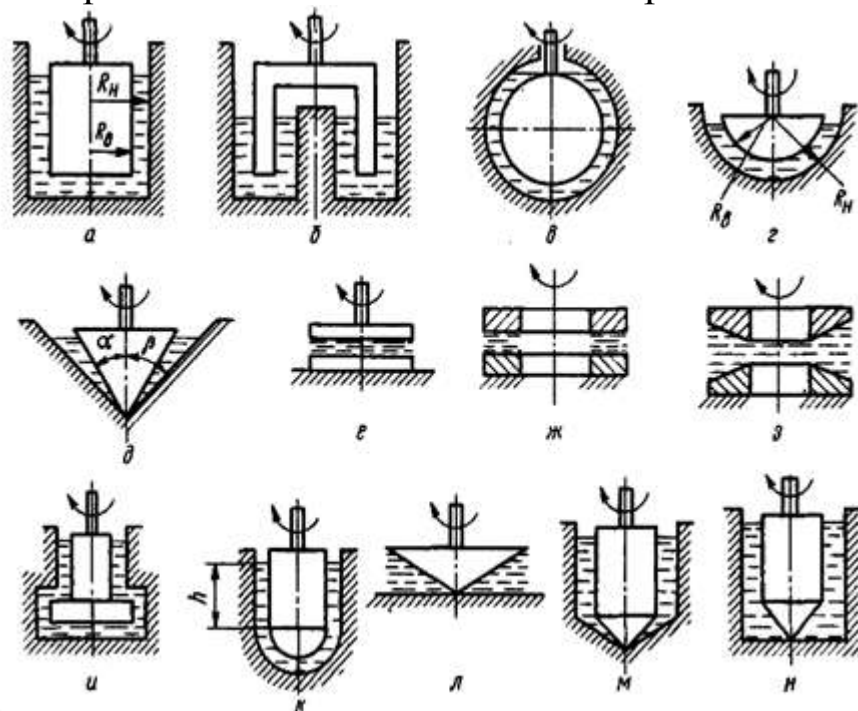


Рис. 5 Формы измерительных органов ротационных вискозиметров
Основным измерительным органом ротационных вискозиметров является рабочая пара, состоящая из неподвижного элемента, чаще всего называемого стаканом или цилиндром, и подвижного, вращающегося элемента, называемого ротором. При этом ротор находится 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. 5), 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.

Вискозиметр Воларовича РВ-8 (рис. 6). 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 днищем, наружного неподвижного стакана (6), термостатирующего сосуда (7) с теплоизоляцией (8), фиксатора (9), неподвижной шкалы (10) и стрелки (11).

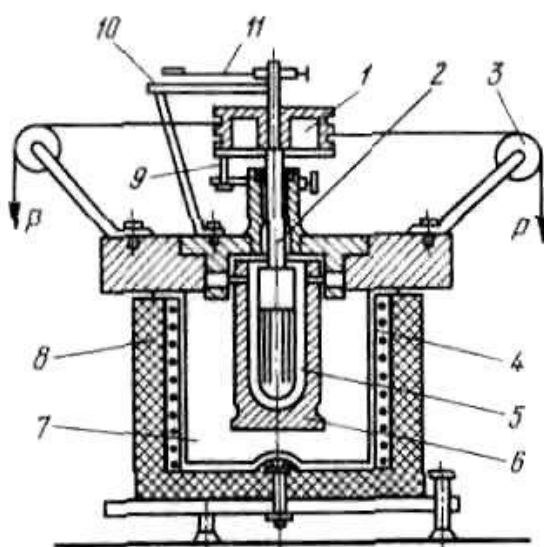


Рис. 6 Ротационный вискозиметр РВ-8

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 материал 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 уст-

ройство, 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 сек. 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

$$\theta_0 = K_0 m_0, \quad (16)$$

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

$$\eta_{эф} = Km / N, \quad (17)$$

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.

Характеристика прибора: пределы измерения вязкости - от 0,5 до 10^6 Па·с; пределы измерения напряжения сдвига - от 5 до 10^4 Па; интервал температур - от -60 до 150 °С. Ротационный вискозиметр МТИММПа (МАПБ).

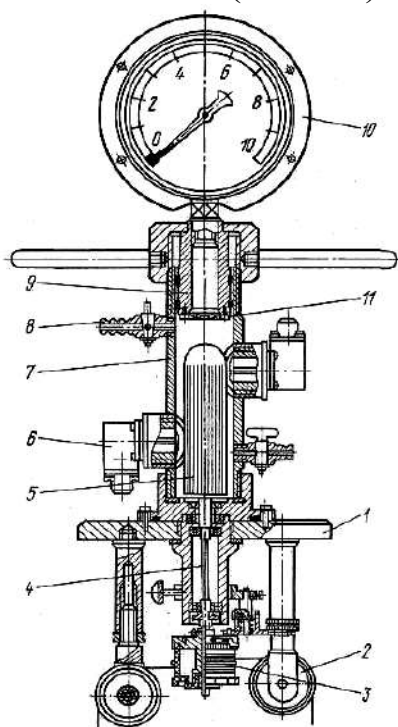


Рис. 7 Ротационный вискозиметр МТИММПа (МАПБ)

Прибор (рис. 7) 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 перемещая 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.

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.

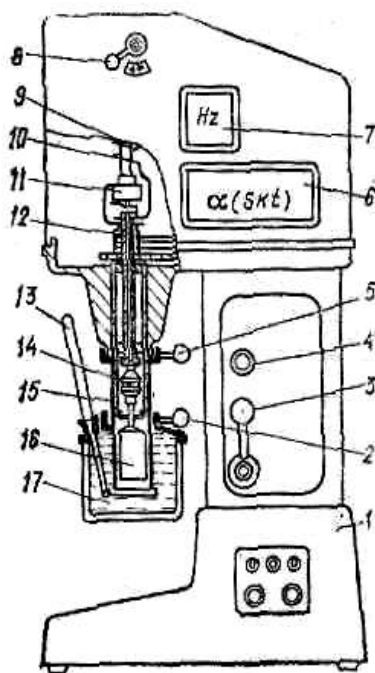


Рис. 8 Ротационный вискозиметр «Реотест-RV»

Ротационный вискозиметр «Реотест-RV». Прибор (рис. 8) смонтирован на станине (1), внутри которой установлен синхронный электродвигатель, соединенный с 12-ступенчатой коробкой передач, которая позволяет изменять частоту вращения внутренне-

го 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).

Характеристика прибора. Пределы измерения: вязкости - от 10^{-2} до $10^4 \text{ Па}\cdot\text{с}$; скорости сдвига - от 0,1667 до $1,458 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$; напряжения сдвига - от 12 до $1 \cdot 10^3 \text{ Па}$; температуры - от -30 до $150 \text{ }^\circ\text{C}$; погрешность измерений $\pm 3 \%$.

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.

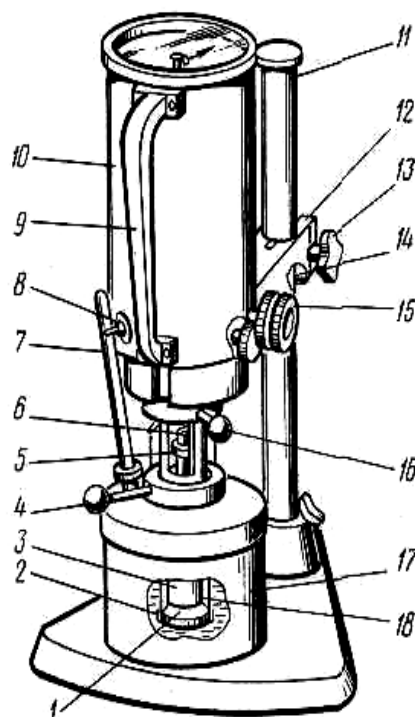


Рис. 9. Ротационный вискозиметр типа RN (Германия)

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).

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

Характеристика прибора. Пределы измерения: вязкости - от 10^{-2} до 420 Па·с; напряжения сдвига - от 5,0 до 1500 Па; скорости сдвига - от 5 до 492 с^{-1} ; частоты вращения ротора - 16, 40, 80 и 160 мин^{-1} ; температуры - от -30 до 120 °С. Погрешность измерений не более $\pm 5\%$.

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. 10 а) состоит из пластины (1), кюветы (2), микрошкалы (4), груза (5) и снабжен микроскопом (3). 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 их 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.

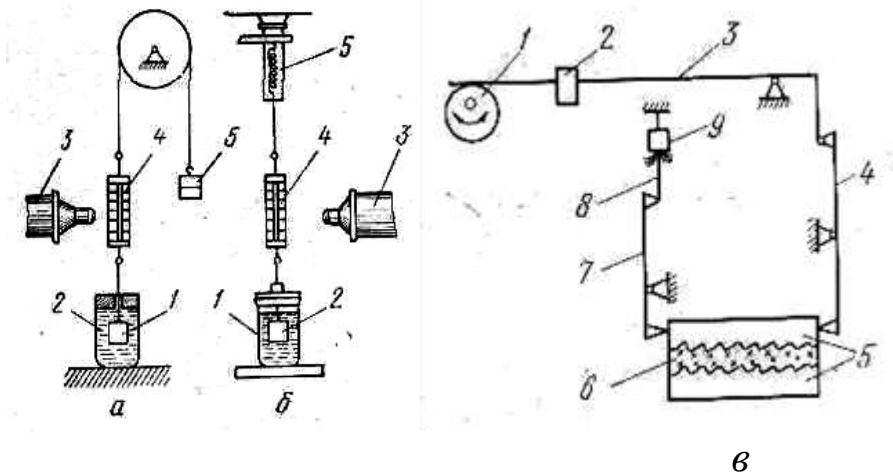


Рис. 10. Приборы с плоскопараллельным зазором:

а) - прибор С.Я. Вейлера и П.А. Ребиндера; б) - его модификация; в) - прибор Д.М. Толстого

После некоторой 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 последействия, их регистрируют до момента остановки указателя на шкале измерений.

Прибор Д.М. Толстого Его модификацией является прибор (рис. 10 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

$$\theta = P/(2F), \quad (17)$$

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

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

$$\theta_0 = P_{max}/(2F). \quad (18)$$

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. 10 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 0,05×0,02×0,006 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 экс-

центрика (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:

$$G_1 = \theta h / \Delta h_0; \quad G_2 = \theta h / (\Delta h_m - \Delta h_0); \quad \eta'_0 = (\theta - \theta_T) / \dot{\gamma}, \quad (19)$$

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, s^{-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. 11. В момент начала погружения конуса в продукт напряжение бесконечно велико (площадь касания равна нулю), его скорость равна нулю, а ускорение ($a = d^2h/d\tau^2$) 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.

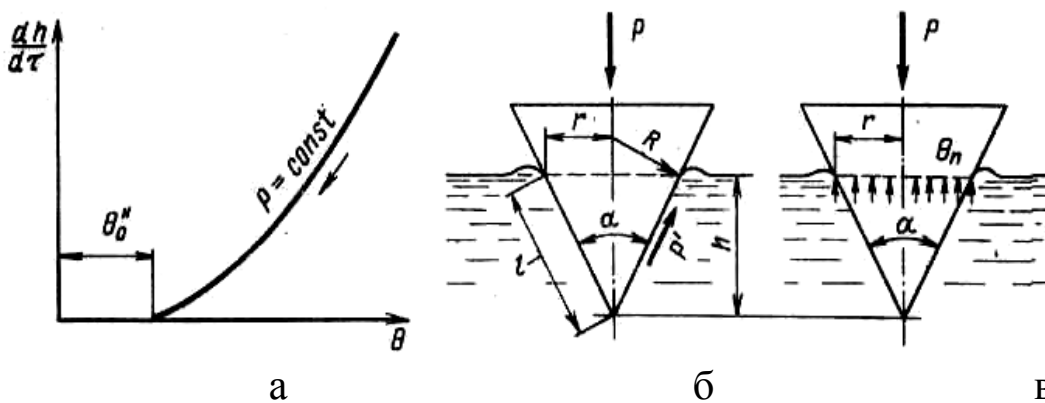


Рис. 11 Реограмма и схемы для расчета:

- а) - зависимость скорости движения конуса от напряжения сдвига;
 б) - схема для расчета предельного напряжения сдвига, в) - схема для расчета предельного давления.

При остановке конуса ($dh/d\tau=0$) погружение будет предельным, и внешняя сила уравновешивается пластической прочностью структуры. Для этого случая отсчитывается предельное напряжение сдвига (отношение силы у «смоченной» части боковой поверхности

конуса, рис. 11 б) или предельное давление (отношение силы к горизонтальной площади сечения конуса, которое проходит по поверхности продукта, рис. 11 в). Выталкивающей силой продукта (Архимедова сила) пренебрегают вследствие ее малости. Если снять полную кривую течения (рис. 11 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. 11 б). Условия равновесия сил на поверхности конуса получим, проектируя на образующую конуса l движущую силу P и приравнивая ее силе сопротивления P' :

$$P' = P \cos(\alpha/2). \quad (20)$$

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

$$\theta_0^H = P'/F = P \cos(\alpha/2) / \pi r l = K^\alpha m g / h^2, \quad (21)$$

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 сек.

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. Подробно схему конструкции прибора, мето-

дику измерения и обработку результатов см. в «Лабораторном практикуме».

Значительный вклад в развитие конических пластометров 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 электриче-

ская 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.

Характеристика прибора: предельное напряжение сдвига - $10 \cdot 10^4$ Па; напряжение - 220 В; габаритные размеры - $0,19 \times 0,08 \times 0,24$ м; масса - 3 кг.

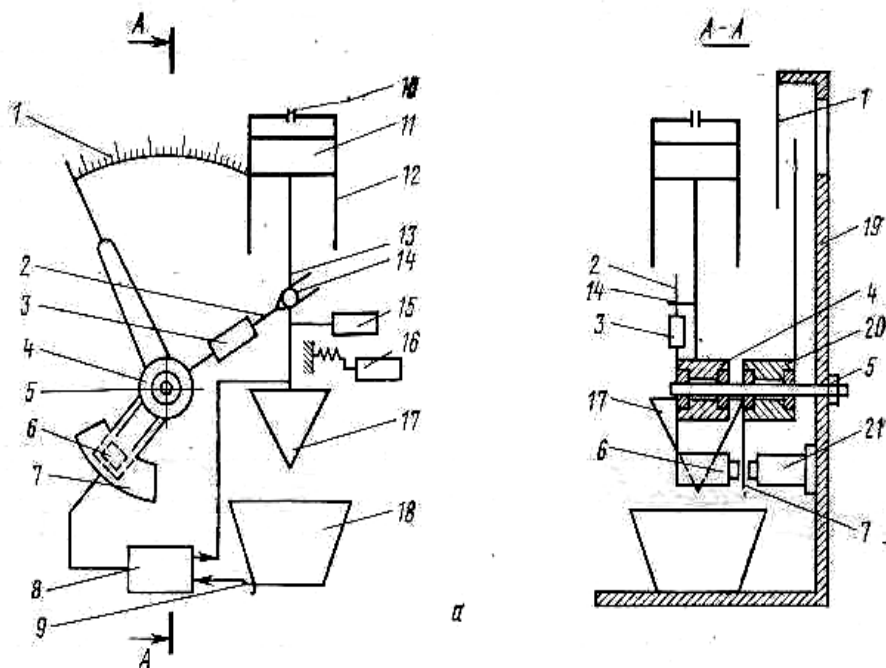


Рис. 4.10. Принципиальная схема полуавтоматического пластометра ПП-3М

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 определения 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 пре-

дельное напряжение сдвига и степень пенетрации как вязко-пластичных, так и упруго-пластичных продуктов.

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 максимальной 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.

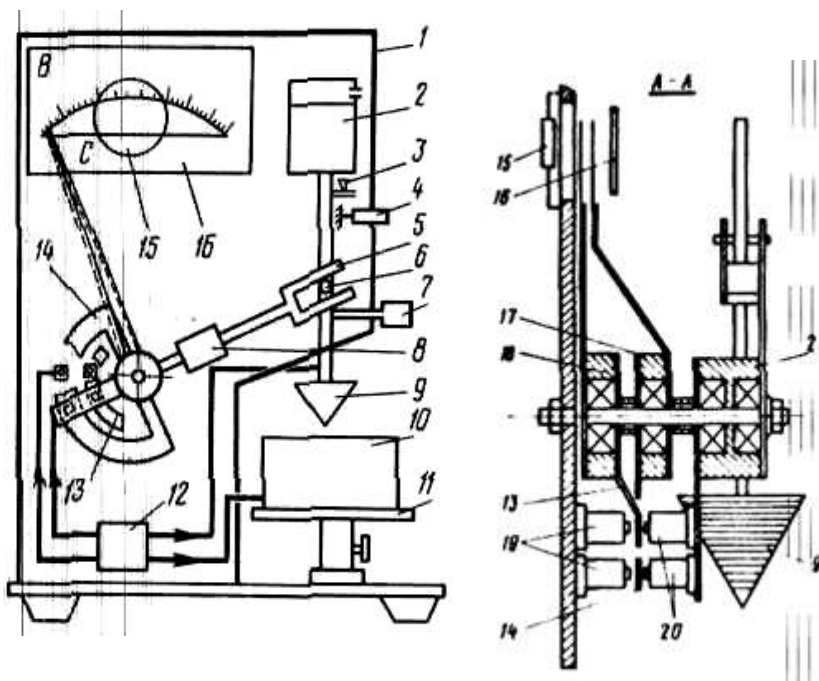


Рис 12. Принципиальная схема пенетрометра ПП-5

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 сек) 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 - это 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 сек, прибор ПШ-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:

$$\theta_0^H = K_{II} / h_{II}^2, \quad (12)$$

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

2. Вопросы и задания для самоконтроля

1. Напишите уравнение Гершеля-Балкли, его значение и определите смысл каждого из входящих в него символов.
2. Что определяет градиент скорости и как его рассчитать для различных вариантов сдвиговых деформаций?
3. Дайте графическое толкование эффективной и пластической вязкостей.
4. Какие реологические параметры можно определить по кривой течения?
5. С помощью каких показателей можно относить реологическое тело к жидкообразным или твердообразным?
6. Определите влияние температуры реологического тела на сдвиговые характеристики. Приведите уравнения, иллюстрирующие это влияние.
7. Как влияет температура жидкообразной системы на величины сдвиговых свойств?
8. Что характеризует предельное напряжение сдвига?
9. Как влияют влажность, жирность и степень измельчения фарша на его сдвиговые свойства?
10. Что понимается под термином «Эталонная характеристика фарша»?
11. Какую практическую роль играют эталонные характеристики продукта?
12. Приведите устройства и принцип измерения реологических характеристик с помощью вискозиметра РВ-8.
13. Определите отличительные особенности вискозиметров «Реотест» РВ-8.

14. Определите принципы измерения сдвиговых характеристик с помощью пенетрометров и пластометров.

15. Укажите условия, при которых пенетрометр может выполнять функции экспресс-прибора по определению реологических характеристик.

Практическое занятие №9 Поверхностные свойства пищевых продуктов. Приборы для измерения поверхностных характеристик

План занятий

1. Теоретическая часть
2. Вопросы и задания для самоконтроля

1. Теоретическая часть

Поверхностные свойства пищевых продуктов.

. Поверхностные свойства пищевых материалов

Поверхностные свойства продуктов отражают взаимодействие их с твердыми телами и характеризуются такими характеристиками, как липкость (адгезия) и коэффициентом внешнего трения. Данные характеристики используются при выборе материала для изготовления рабочих органов машин, аппаратов.

Таблица 1 Значения липкости фарша и мяса

Образцы	Напряжение предварительного контакта, $p_k \cdot 10^{-4}$, Н/м ²	Липкость, $p_o \cdot 10^{-4}$, Па при времени предварительного контакта, мин.		
		1	5	10
Фарш:	Фторопласт-4			
свиных сарделек	0,33	0,88	1,07	1,21
докторской колбасы	0,33	0,66	0,84	1,12
Свинина вдоль волокон	0,33	0,38	0,43	0,38
Фарш:	Сталь			

свиных сарделек	0,24	0,46	0,65	0,75
докторской колбасы	0,24	0,42	0,59	0,66

Значения липкости различных фаршей и мяса представлены в табл. 1

Значения липкости фарша в зависимости от времени выдержки в посоле представлены в табл. 2.

Таблица 2

Значения липкости фарша в зависимости от времени выдержки в посоле

Фарш	Давление контактирования, $p_k \cdot 10^{-4}$, Н/м ²	Липкость, $p_o \cdot 10^{-4}$, Па		
		Без выдержки	Выдержка, ч	
			48	96
Говядина куттерованная:	1,42	0,25	-	-
несоленая	1,12	0,5	0,57	0,56
соленая				
Соленая с добавлением 40 % воды	0,54	0,29	0,31	0,27
	1,42	0,4	0,45	0,44
Свинина без воды соленая	0,72	0,43	-	-
	0,72	0,45	-	-
Свиные сосиски				
Любительская колбаса				

В настоящее время, внешнее трение мяса и мясопродуктов пока еще мало изучено.

Липкость и коэффициент внешнего трения зависят от условий измерения, материала пластин, площади контакта, длительности и напряжения предварительного контакта, толщины слоя продукта, кинетики приложения, отрывающего или сдвигающего усилия.

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

В процессе технологической обработки пищевые материалы находятся в контакте с поверхностями различных рабочих органов машин, транспортирующих устройств и т.п. Характер течения мас-

сы по каналам формующих машин разных типов (шнековых, валковых, шестерённых и др.), а также по технологическим трубопроводам определяется как её структурно-механическими свойствами, так и силами сцепления с поверхностями контакта.

Адгезия – это слипание поверхностей двух разнородных материалов. Это явление часто встречается в природе и широко используется в технике. Под *когезией* понимают сцепление частиц внутри рассматриваемого тела. Для пищевых материалов характерны разные виды отрыва (рис. 1.7): *а)* адгезионный; *б)* когезионный; *в)* смешанный – адгезионно-когезионный.

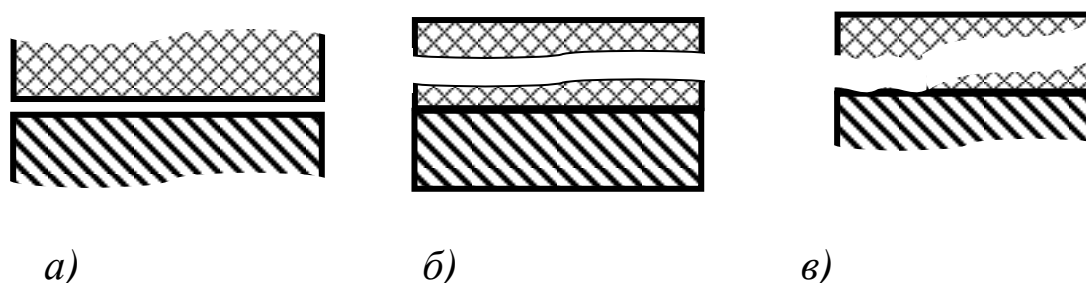


Рис. 1 Виды отрыва материала:

а) адгезионный; *б)* когезионный; *в)* смешанный – адгезионно-когезионный

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

Общей количественной теории адгезии пока нет, хотя весьма плодотворны попытки комплексного объяснения адгезии на основе различных механизмов взаимодействия. В этом смысле для разработки теоретических представлений об адгезии перспективны фундаментальные работы академика П.А. Ребиндера об адсорбции и поверхностной активности тонких плёнок. В результате остроумных и тонких экспериментов В.А. Пчелин установил для растворов белковых веществ поверхностное натяжение, диэлектрическую постоянную, поверхностный потенциал и др. В явлении адгезии белковых веществ, как следует из теоретических представлений Б.В. Дерягина, участвуют, кроме Ван-дер-Ваальсовых сил притяжения, электростатические силы, обусловленные возникновением двойного электрического слоя на поверхности.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$p_0 = F_0 / A_0, \quad (1)$$

где: F_0 – сила отрыва, Н;

A_0 – геометрическая площадь пластины, м².

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

$$F = \mu \cdot N + \mu \cdot p_0 \cdot A_0, \quad (2)$$

где: F – сила внешнего трения, Н;

μ – истинный коэффициент трения;

N – нормальная нагрузка, Н;

A_0 – площадь истинного контакта, м²;

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

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

$$F_{\text{ТР}} = f \cdot (F_{\text{К}} + p_0 \cdot A_0), \quad (3)$$

где: f – истинный коэффициент внешнего трения;

$F_{\text{К}}$ – сила, пропорциональная поверхности сдвига.

Если величины в уравнении (20) разделить на площадь истинного контакта A_0 , то мы получим следующие уравнения:

$$F_{\text{ТР}} = f \cdot (F_{\text{К}} + p_0), \text{ или } F_{\text{ТР}} = f \cdot F_{\text{К}} + \theta_0^*. \quad (4)$$

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

$$f_{\text{ЭФ}} = F_{\text{ТР}} / F_{\text{К}}, \quad (5)$$

и может быть связан с величиной истинного коэффициента трения:

$$f_{\text{ЭФ}} = f \cdot (1 + p_0 / p_{\text{К}}). \quad (6)$$

Уравнение (6) можно применить для вычисления как чистого трения, так и трения по поверхностной плёнке материала. Тогда θ_0^* можно отождествить с предельным напряжением сдвига в плёнке, $f \cdot F_{\text{К}}$ представляет собой касательное напряжение, вызванное внешним давлением $F_{\text{К}}$; коэффициент трения f характеризует скольжение в сдвигаемой плёнке.

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.

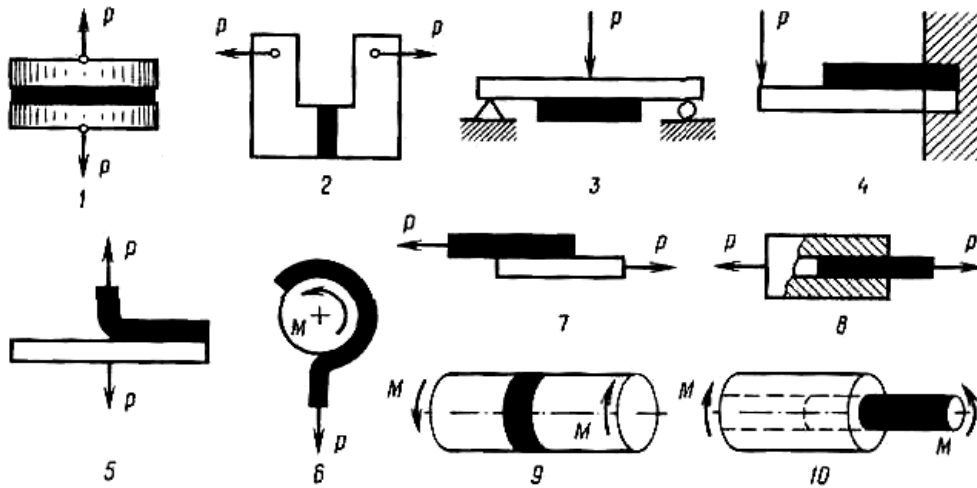


Рис. 2. Способы измерения адгезии:

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.

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). 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 адгезиометрам:

- 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 ад-

гезива относительно субстрата. Для исследования адгезии пищевых вязко-пластичных материалов используются приборы, основанные на способе нормального отрыва.

Адгезиометр Б.А. Николаева (рис. 3). 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. 3 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.

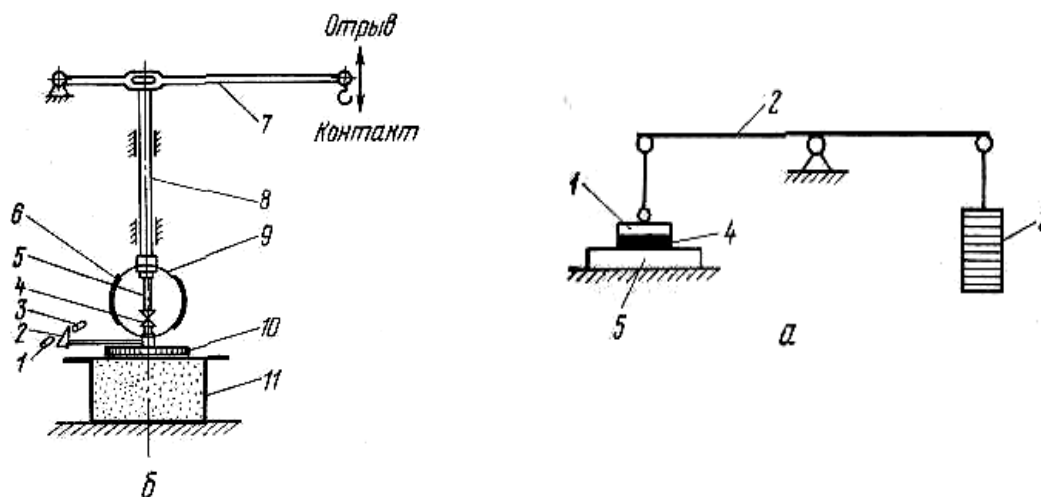


Рис. 3 Адгезиометры:

а) - адгезиометр Б.А. Николаева; б) - Адгезиометр Ю.В. Клаповско-го.

Универсальный адгезиометр МТИММПа (МАПБ). Прибор (рис. 4) 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 устанавливают грузы (5). В каждой серии опытов тензобалку тарируют, получая зависимость: величина нагрузки - отклонение «зайчика» на осциллограмме.

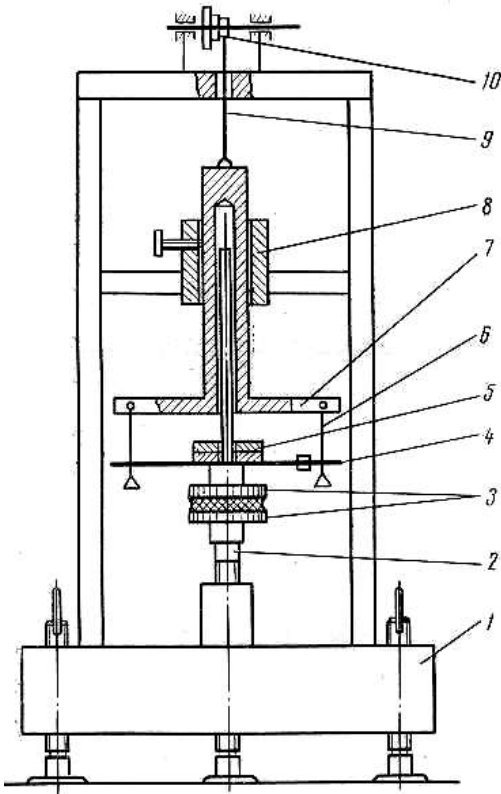


Рис. 4 Универсальный адгезиометр МТИММПа

Параметры прибора: давление предварительного контакта от 300 до $3,5 \cdot 10^5$ Па; длительность предварительного контакта - 3; 60; 180; 300; 600 с; скорость отрыва верхней пластины от продукта - 0,00167; 0,00358; 0,0093; 0,0193 м/с; площадь пластин - 0,0005; 0,0007; 0,0010; 0,0015 м²; материал пластин - сталь Ст. 3, нержавеющая сталь 1Х18Н9Т, дюралюминий, чугун, фторопласт-4, латунь; высота продукта - от 0,00003 до 0,003 м; относительная погрешность прибора - ± 4 %.

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.

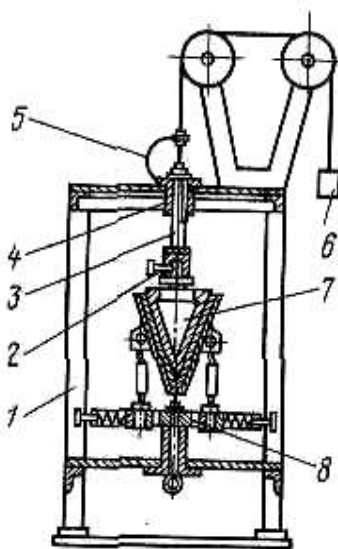


Рис. 5. Адгезиометр АМ-1

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. 6.

Первая группа - методы, в которых одна плоскость поступательно перемещается относительно другой плоскости (рис. 6 а, б, в). По схеме а, продукт перемещается по движущейся исследуемой поверхности, при этом сила трения измеряется динамометром любого

типа. Таким наиболее распространенным методом определяют трение твердообразных материалов: 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.

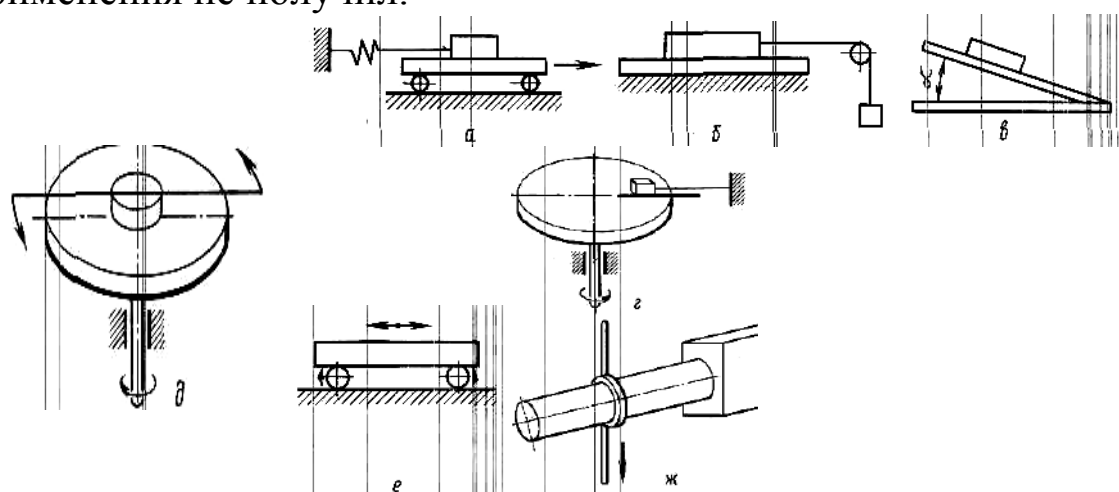


Рис. 6. Методы измерения силы трения скольжения:

- а), б), в) - при поступательном перемещении плоскостей;
- г), д) - при вращательном движении одной из фрикционных пар;
- е) - при соприкосновении образующей цилиндра с плоскостью;
- ж) - при перемещении цилиндрической или плоской гибкой поверхности по цилиндрической поверхности

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 е 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. 6 ж).

Трибометр с тележкой (рис. 7а). 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 предварительного контакта, скорость нарастания силы и пр.) факторы. Прибор снабжен комплектом сменных пластин изготовленных из разного материала.

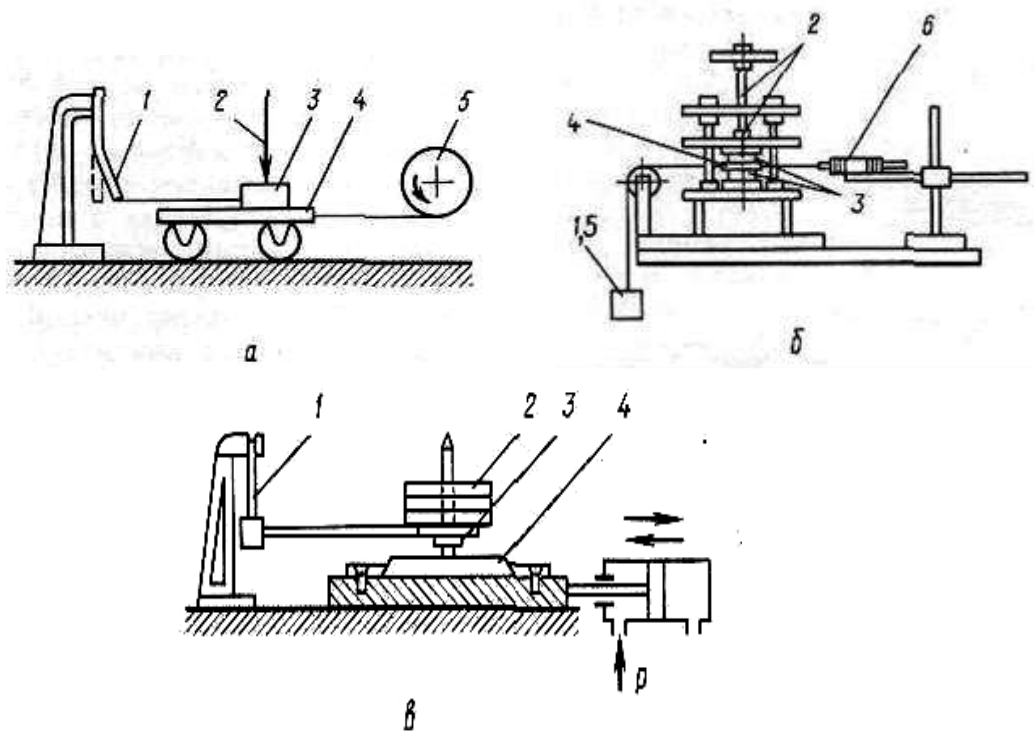


Рис. 7 Трибометры:

- а) - трибометр с тележкой; б) - трибометр с параллельным смещением пластин;
 в) - трибометр с приводной подвижной частью от гидроцилиндров.

Трибометр с параллельным смещением пластин (рис. 7б). 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. 7в). 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.

2. Вопросы и задания для самоконтроля

1. Какими параметрами определяются поверхностные свойства продуктов?
2. Приведите основные уравнения для расчета поверхностных свойств.
3. Что характеризует поверхностные свойства продукта и как они изменяются при изменении влагосодержания?
4. Что такое адгезия, когезия и смешанный отрыв?
5. Какие факторы влияют на процесс отрыва пластины с продуктом от подстилающей поверхности?
6. Как влияет на значение липкости материал пластины и чистота его механической обработки?
7. Какие факторы влияют на процесс внешнего трения продукта о поверхность скольжения?
8. Как влияет температура продукта на значение эффективного коэффициента трения?
9. Что такое равновесный релаксационный модуль упругости?
10. Приведите принципиальную схему адгезиометра.
11. Что такое трибометр? На чем основан принцип его измерений?

Практическое занятие №10 Реодинамические расчеты трубопроводов и транспортных устройств для вязкопластичных сред

План занятий

1. Теоретическая часть
2. Вопросы и задания для самоконтроля

1. Теоретическая часть

Общие положения

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.

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 $P_{общ}$, Па, необходимое для перемещения транспортируемой продукции (массы) определяют по формуле:

$$P_{общ} = \pm \rho gh + p + P_m + P_{ин} + P_{п} + P_{к} + P_{сж}, \quad (1)$$

где ρ - плотность перекачиваемой массы, кг/м³; h - высота нагнетания продукта, м; ρgh - потери давления, при подъеме массы на заданную высоту, Па;

p - потери давления по длине трубопровода, Па; P_m - потери давления в местных сопротивлениях, Па; $P_{ин}$ - инерционные потери давления, обусловлены неравномерностью движения, Па; $P_{п}$ - потери давления на преодоление противодействия, Па; $P_{к}$ - потери давления на создание кинетической энергии потока, Па; $P_{сж}$ - 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 $P_{п} = 0$, при отсутствии подъема массы на некоторую высоту $\rho gh = 0$ и при свободном течении массы по трубе $P_{к} = 0$.

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

$$\begin{aligned}
 & \text{- объемный расход: } V_c = V / \tau, \text{ м}^3/\text{с}; \\
 & \text{- массовый расход: } M_c = \rho V_c, \text{ кг/с}; \\
 & \text{- весовой расход: } G_c = \rho g V_c \text{ Н/с}.
 \end{aligned} \tag{2}$$

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:

$$V_c = w F = w \pi d^2 / 4 = w \pi R^2, \tag{3}$$

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):

$$Re = (mw^2)/[\eta F(w/l)l] = \rho l^3 w^2 / (\eta l^2 w) = \rho l w / \eta = \rho d w / \eta = 4V\rho / (\pi \eta d), \quad (4)$$

где l - характерный линейный размер (для круглой трубы - диаметр d), м;

ρ - плотность жидкости, кг/м³; η - динамический коэффициент вязкости, Па·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 мясопродуктов (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 постоянство 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.

$$p\pi r^2 = 2\pi r l \theta, \quad (5)$$

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

Решая уравнение (1) относительно θ , получают выражение вида

$$\theta = (p/2l)r \quad (6)$$

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:

$$\theta_c = (p/2l)R = (p/4l)d, \quad (7)$$

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

$$\theta = (\theta_c / R)r \quad (8)$$

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

$$-\frac{\partial u(r)}{\partial r} = \dot{\gamma}(\theta) \quad (9)$$

Знак « \leftarrow » 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 точно-

стью 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

$$V_c = \pi \int_0^R r^2 \dot{\gamma}(\theta) dr \quad (10)$$

Из формулы (6) получаем $r = (\theta/\theta_c)R$; $dr = (R/\theta_c)d\theta$.

Тогда выражение (10) можно представить в самом общем виде

$$\frac{4V_c}{\pi R^3} = \frac{4}{\theta_c^3} \int_0^{\theta_c} \theta^2 \dot{\gamma}(\theta) d\theta \quad (11)$$

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_o . В пристенном слое градиент не равен нулю, и второй интеграл имеет пределы от θ_o до θ_c .

Ниже приведены результаты решения уравнения (11) относительно конкретных видов жидкостей и продуктов.

Для линейной ньютоновской жидкости. Уравнение течения жидкости имеет вид:

$$P = \pm \eta F \frac{\partial u(r)}{\partial r} \quad \text{или} \quad \theta = \frac{P}{F} = \eta \dot{\gamma}(\theta), \quad (12)$$

где P - сила вязкого сопротивления; F - площадь боковой поверхности цилиндра радиусом r .

Из уравнения (12) $\dot{\gamma}(\theta) = \theta/\eta$. Интегрируя уравнения (11), получают уравнение Пуазейля

$$V_c = \frac{\pi r d^4}{128 \eta l}, \quad \text{или} \quad \frac{4V_c}{\pi R^3} = \frac{\theta_c}{\eta}, \quad \text{или} \quad \theta_c = \eta \frac{4V_c}{\pi R^3} = \eta \frac{32V_c}{\pi d^3}, \quad (13)$$

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 (3), в результате получают

$$\theta_c = \eta \frac{4w}{R} = \eta \frac{8w}{d} = \eta \frac{4V_c}{\pi d^3}. \quad (14)$$

В этих выражениях по аналогии с законом вязкого сопротивления Ньютона (12) находим консистентную переменную - «напряжение сдвига»

$$\theta_c = \frac{pR}{2l} = \frac{pd}{4l}, \quad (15)$$

и консистентную переменную - «градиент скорости»

$$\dot{\gamma} = \frac{32V_c}{\pi d^3} = \frac{8w}{d}. \quad (16)$$

Из уравнения Пуазейля (13) и с учетом (2) получают выражение определения вязкости жидкости

$$\eta = \frac{\pi r d^4}{128 V l} \tau. \quad (17)$$

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

$$\theta = \theta_o + \eta_{nl} \dot{\gamma}(\theta) \quad \text{или} \quad \dot{\gamma}(\theta) = (\theta - \theta_o) / \eta_{nl}, \quad (18)$$

где θ_o - предельное напряжение сдвига, Па; η_{nl} - пластическая вязкость, Па·с.

Подставляя последнее выражение в общее уравнение (11) и интегрируя с учетом того, что, при $0 \leq r \leq R_o$ и $0 \leq \theta \leq \theta_o$ градиент скорости $\dot{\gamma}(\theta) = 0$, получаем уравнение Букингама, которому после замены и подстановки придается вид, подобный уравнению Пуазейля:

$$V_c = \frac{\pi p d^4}{128 \eta_{nl} l} \left[1 - \frac{4}{3} \left(\frac{d_o}{d} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{d_o}{d} \right)^4 \right] = \frac{\pi p d^4}{128 \eta_{nl} l} f \left(\frac{d_o}{d} \right). \quad (19)$$

Запись этого уравнения в консистентных переменных имеет вид:

$$\frac{pd}{4l} = \eta_{nl} \frac{32V_c}{\pi d^3} \left[1 / f \left(\frac{d_o}{d} \right) \right], \quad (20)$$

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:

$$\theta^{1/2} = \theta_o^{1/2} + [\eta_\kappa \dot{\gamma}(\theta)]^{1/2} \quad \text{или} \quad \dot{\gamma}(\theta) = (\theta^{1/2} - \theta_o^{1/2})^2 / \eta_\kappa, \quad (21)$$

где η_κ - вязкость по Кэссону, Па·с.

Выполнив аналогичные действия, описанные выше получают уравнение вида уравнения Пуазейля:

$$V_c = \frac{\pi p d^4}{128 \eta_\kappa l} \left[1 - \frac{10}{7} \left(\frac{d_o}{d} \right)^{1/2} + \frac{4}{3} \left(\frac{d_o}{d} \right) - \frac{1}{21} \left(\frac{d_o}{d} \right)^4 \right] = \frac{\pi p d^4}{128 \eta_\kappa l} f \left(\frac{d_o}{d} \right). \quad (22)$$

В консистентных переменных его записывают в следующем виде:

$$\frac{pd}{4l} = \eta_\kappa \frac{32V_c}{\pi d^3} \left[1 / f \left(\frac{d_o}{d} \right) \right]. \quad (23)$$

Анализ уравнений (19) и (22) показывает, что: при $d_o = 0$ (предельное напряжение сдвига отсутствует) жидкость течет как истинно вязкая по закону Пуазейля; при $d_o \rightarrow d$ (т. е. при $\theta_o \rightarrow \theta_c$) функция приближается к нулю и течение прекращается либо для обеспечения подачи давления стремится к бесконечности. Резкое

увеличение давления для жидкости Кэссона начинается при $d_o/d > 0,5$, для жидкости Бингама - при $d_o/d > 0,8$.

Для *нелинейной степенной жидкости*. Уравнение течения жидкости имеет вид:

$$\theta = B_1^* [\dot{\gamma}(\theta)]^n, \quad (24)$$

где B_1^* - коэффициент, пропорциональный вязкости, Па·сⁿ; n - индекс течения.

В результате проведения математических действий получают уравнение общего вида:

$$\frac{4V_c}{\pi R^3} = \frac{4n\dot{\gamma}_1}{3n+1} \left[\frac{R}{2B_0^*\dot{\gamma}_1} \left(\frac{\partial p}{\partial l} \right) \right]^{1/n}, \quad (25)$$

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

$$\theta_c = B_0^* \dot{\gamma}_1 \left(\frac{3n+1}{4n} \right)^n \left(\frac{8w}{\dot{\gamma}_1 d} \right)^n, \quad (26)$$

или

$$\theta_c = A_1 \dot{\gamma}_*^n, \quad (27)$$

где A_1 - напряжение сдвига на стенке трубы при единичном значении относительного градиента скорости, Па; $\dot{\gamma}_*$ - 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 мясо-продуктов (бульон, расплавленный жир, кровь, сыворотку 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:

$$z_1 + p_1 / (\rho g) + w_1^2 / (2g) = z_2 + p_2 / (\rho g) + w_2^2 / (2g) + h_w, \quad (28)$$

где z_1, z_2 - геометрическая высота центров тяжести рассматриваемых сечений относительно горизонтальной плоскости сравнения, или удельная потенциальная энергия положения, м; $p_1 / (\rho g), p_2 / (\rho g)$ - пьезометрическая высота в рассматриваемых сечениях, или удельная потенциальная энергия давления, м; P_1, P_2 - давления в сечениях, Па; ρ - плотность жидкости, кг/м³; g - ускорение свободного падения, м/с² ($g=9,81$ м/с²); $w_1^2 / (2g), w_2^2 / (2g)$ - скоростной напор в рассматриваемых сечениях, или удельная кинетическая энергия потока, м; h_w - потери энергии (напора) между этими сечениями, м.

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: $p = \rho g h_w$. Общие потери напора определяют по формуле:

$$h_w = h_{ол} + h_m = (\lambda / d + \sum \zeta) w^2 / 2g, \quad (29)$$

где $h_{ол}$ - потери напора по длине, м; h_m - потери напора в местных сопротивлениях, м; λ - коэффициент сопротивления трения по длине трубы; l - геометрическая длина трубопровода, м; 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:

$$h_w = (\lambda / d) \cdot (w^2 / 2g). \quad (30)$$

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

$$d_s = 4F / \Pi, \quad (31)$$

где d_s - эквивалентный диаметр, м; F - площадь живого сечения потока, м²; Π - длина смоченного периметра, м.

Для труб с местными сопротивлениями потери напора определяют по формуле:

$$h_w = (\lambda_n / d) \cdot (w^2 / 2g),$$

$$l_n = l + l_s; \quad (32)$$

$$l_s = d / \lambda \sum \zeta,$$

где l_n - приведенная длина трубопровода, м; l_s - эквивалентная длина, м (потери напора по длине эквивалентны потерям напора в местных сопротивлениях реального трубопровода).

Наряду с формулами (30) и (32) потери напора определяют по видоизмененной первой водопроводной формуле:

$$h_w = 0,0827 \lambda_n V_c / d^5. \quad (33)$$

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 30, 32, 33) сводится к определению коэффициентов сопротивления. Расчеты по их определению рассмотрены ниже.

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

$$\lambda = f(1/Re; \Delta/d), \quad (34)$$

где Δ/d - относительная шероховатость трубы; Δ - абсолютная высота выступов шероховатости трубы, м.

Критерий Рейнольдса определяют по формуле:

$$Re = wd\rho/\eta, \quad (35)$$

где ρ - плотность жидкости, кг/м^3 ; η - вязкость жидкости, $\text{Па}\cdot\text{с}$.

В гидравлически гладких трубах шероховатость практически не оказывает влияния на потери энергии, а в гидравлически шероховатых трубах происходит дополнительная турбулизация потока, и увеличиваются потери энергии.

Величину коэффициентов сопротивления при различных режимах движения жидкости определяют по графику Никурадзе (рис. 1)

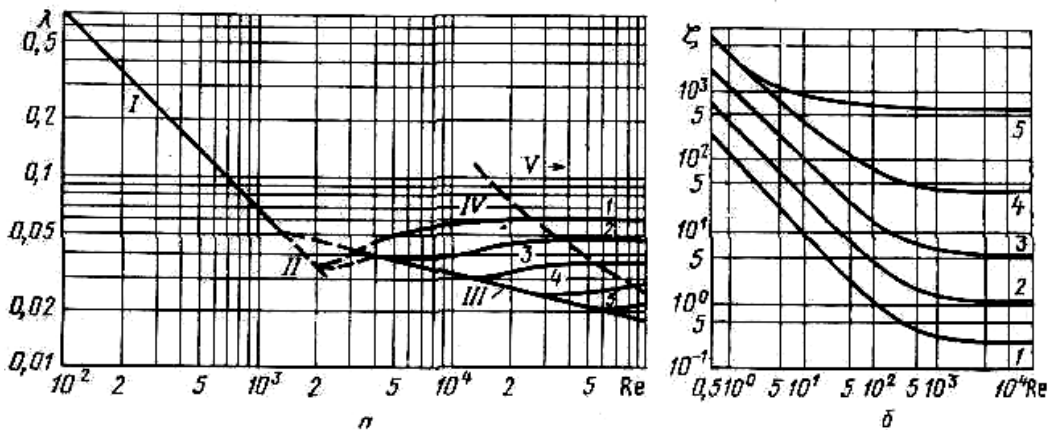


Рис. 1. Зависимость коэффициентов гидравлических сопротивлений от критерия Рейнольдса:

а) - по длине трубы для различных зон движения жидкости

при различной относительной шероховатости трубы:

1 - 0,0334; 2 - 0,0164; 3 - 0,0083; 4 - 0,004; 5 - 0,0002; I - ламинарная зона движения жидкости;

II - переходная зона движения; III - турбулентная зона движения в гидравлически гладких трубах;

IV - турбулентная зона движения в шероховатых трубах;

V - автомодельная, или квадратичная, зона движения;

б) - в местных сопротивлениях:

1 - тройник; 2 – угольник 90°; 3 - открытый вентиль; 4 - шаровой кран; 5 - диафрагма (степень сжатия 0,05).

Для I зоны (ламинарный режим движения жидкости):

$$Re < 1400, \quad \lambda = K/Re,$$

где K - коэффициент (для маловязких жидкостей $K=64$, высоковязких - $K=70$);

для II зоны (переход от ламинарного к турбулентному движению жидкости):

$$2000 < Re < 5000, \quad \lambda = 2,7/Re^{0,53};$$

для III зоны (турбулентный режим движения в гидравлически гладких трубах):

$$5000 < Re < 7000, \quad \lambda = 0,3164/Re^{0,25};$$

для IV зоны (турбулентное движение в шероховатых трубах):

$$2300 < Re < 218d/\Delta, \quad \lambda = 0,1\Delta/d + 100/Re^{0,25} \quad \text{или} \quad \lambda = 1,5/10^6 d^{0,3} + 1/Re^{0,3};$$

для V зоны (автомодельный, или квадратичный режим движения):

$$Re > 125d/\Delta, \quad \lambda = 0,11\Delta/d^{0,25}.$$

Абсолютная величина выступов шероховатости зависит от вида перекачиваемой жидкости, материала трубы, длительности ее эксплуатации и их значения представлены в табл. 1.

Таблица 1

Средние значения шероховатости для некоторых трубопроводов

Материал и состояние трубопровода	Шероховатость $\Delta \cdot 10^3$, м	
	абсолютная	эквивалентная
Стекланные новые	0,0006	0,005
Из нержавеющей стали:	новые	0,01-0,02
	старые	0,5-1,0
Стальные:	новые	0,05-0,1
	старые	0,05-2,0
Чугунные	новые	0,4-0,6
	старые	1,0-3,0

Значения коэффициентов местных сопротивлений для каждого вида сопротивления зависят от критерия Рейнольдса. Для определения коэффициентов местных сопротивлений, виды которых представлены на рис. 2, пользуются таблицами и эмпирическими данными. Для некоторых местных сопротивлений величины коэффициентов приведены на графике (рис. 1 б)

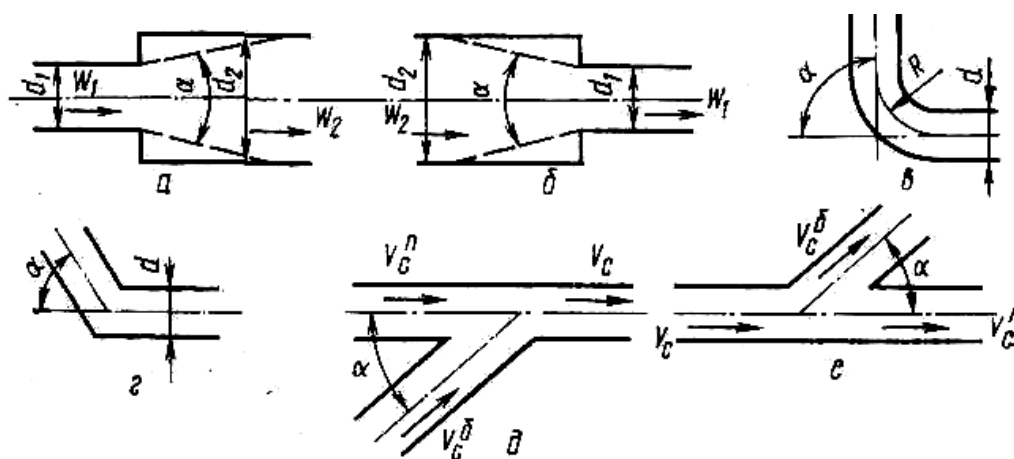


Рис. 2. Виды местных сопротивлений:

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 °С 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:

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

$$t_2 = St_o / (1 + 0,5S) + (1 - 0,5S) / [(1 + 0,5S)t_1]; \quad (36)$$

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

где K - коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·К), ($K=10-20$ Вт/(м²·К)); c - теплоемкость продукта, Дж/(кг·К); ρ - плотность продукта, кг/м³; t_1, t_2 - температура на входе и выходе из трубы, К; t_o - температура окружающей среды, К; 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:

$$V_c = \mu F_o \sqrt{2p/\rho}, \quad (37)$$

где μ - коэффициент расхода, принимается по таблице; F_o - площадь входного сечения, м²; p - давление перед входом в отверстие, Па.

$$p = p_o + \rho g H, \quad (38)$$

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

$$Re_T = \rho d w_T \eta, \quad (39)$$

где η - вязкость жидкости, Па·с.

Теоретическую скорость находят из выражения

$$w_T = \sqrt{2p/\rho}. \quad (40)$$

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

$$Re = \mu Re_T. \quad (41)$$

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, Н/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

$$\tau = \frac{2F(\sqrt{H_1 + p_o/(\rho g)} - \sqrt{H_2 + p_o/(\rho g)})}{\mu F_o \sqrt{2g}}, \quad (42)$$

где F - площадь сечения сосуда, м²; p_o - избыточное давление на свободную поверхность жидкости, Па; F_o - площадь сечения отверстия, м².

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

$$\tau = \frac{29F\eta}{F_0 d g \rho} \lg \left(\frac{H_1 + p_o' / (\rho g)}{H_2 + p_o' / (\rho g)} \right), \quad (43)$$

где d - диаметр отверстия, м.

При истечении из затопленного отверстия по уравнению

$$p_o = (p_o' + \rho g H_1) - (p_o'' + \rho g H_2), \quad (44)$$

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 мясopодуkтов (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 меньшую 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:

$$\text{а) } p/(l/d) = A w_*^n, \quad \text{где } A = 4B_o^* \dot{\gamma}_1 \left[\frac{2(3n+1)}{\dot{\gamma} n d} w_1 \right]^n; \quad (45)$$

$$\text{б) } pd/(4l) = A_1 [8w/(j d)]^n \quad \text{где } A_1 = B_o^* \dot{\gamma}_1 [(3n+1)/(4n)]^n; \quad n = 1 - m;$$

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

где w_* - относительная среднеобъемная скорость, (отношение скорости к ее «единичному» значению), равно $w_* = w/w_1$; $\dot{\gamma}_1$ - «единичный» градиент скорости, c^{-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, Па·с; w - скорость движения продукта, м/с; w_1 - скорость, равная единице ее измерения, ($w_1=1$ м/с), м/с; 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:

$$p = 1800ld^{-0,8} \theta_o^{0,118} (\eta_{эф} \rho_{отн} w)^{0,882} ,$$

$$A = 1800d^{0,2} \theta_o^{0,118} (\rho_{отн} B w_1)^{0,882} , \quad (46)$$

$$n = 0,882(1 - m) ,$$

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·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 насадок 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_α за счет конусности (конусные насадки). Последние учитывают полный угол при вершине конуса α с соответствующим знаком. Общие потери определяют по формуле:

$$p = p_m + p_l + p_\alpha. \quad (47)$$

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

$$p = 790B^{0,4}d^{-0,8}w^{0,56} + 2600ld\eta_{\phi}w(1 + 0,08\alpha). \quad (48)$$

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:

$$p = a_1 \cdot 10^5 d^{-0,86} \quad \text{и} \quad p = a_2 10^5 w^{0,5}, \quad (49)$$

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.

Методика инженерного расчета трубопровода

В качестве примера практического использования приведенных зависимостей ниже рассмотрена одна из типовых методик инженерного расчета технологического трубопровода. Она позволяет определить диаметр трубы или среднеобъемную скорость движения продукта, потери давления при его транспортировке, мощность, сообщаемую продукту (полезную), и мощность на валу насоса, выполнить прочностные расчеты трубопроводов.

I. Исходные параметры

1. Вид продукта и его рецептура.

2. Производительность трубопровода M_c , кг/с, определяют по формуле

$$M_c = M_{см} / (3600 \tau_p), \quad (50)$$

где $M_{см}$ - выработка в смену, кг/смену; τ_p - эффективное время работы в смену, час.

3. Общая длина трубопровода l , м, рассчитывается с учетом поворотов (отношение радиуса закругления к диаметру трубы должно быть больше шести, для того, чтобы не учитывать потери в местных сопротивлениях).

II. Выбираемые параметры

1. Скорость движения фарша по трубопроводу w_o , м/с. Принимают из рекомендуемого оптимального значения в пределах $0,1 \div 0,5$ м/с (например, чем «гуще» фарш, тем меньше скорость).

Примечание. Вместо скорости в качестве расчетного параметра может быть оптимальный диаметр по формуле, связанной со скоростью.

III. Расчетные параметры

1. Секундный расход V_c , м³/с, трубопровода

$$V_c = M_c / \rho, \quad (51)$$

где ρ - плотность продукта, кг/м³.

В частности, плотность фарша определяют по формуле

$$\rho = 1037 - (290\varphi + 10,5U) + 221g P_T \text{ или } \rho = 1037 - [(290\varphi + 10,5W)/(1-W)] + 221g P_T$$

где φ - жирность фарша, 1 кг жира на 1 кг фарша; U - влагосодержание фарша, кг влаги на 1 кг сухого остатка; W - влажность фарша, кг влаги на 1 кг фарша; P_T - давление в трубопроводе, равное половине давления на выходе из насоса, Па.

При организации транспортирования колбасного фарша следует руководствоваться следующим. Плотность жирных видов фарша находится в диапазоне 960÷980 кг/м³, плотность для мало-жирных видов - 1030÷1040 кг/м³. Значения жирности, влагосодержания и влажности фарша выбирают по справочнику.

2. Диаметр трубопровода d , м, определяют по формуле расхода.

$$d = \sqrt{\frac{4V_c}{\pi w}} . \quad (52)$$

Далее по ГОСТу выбирают ближайшую величину d . Затем, находят действительную среднюю скорость w движения продукта по той же формуле.

3. Консистентную переменную («градиент скорости») $\dot{\gamma}$ и безразмерную консистентную переменную вычисляют по формуле

$$\dot{\gamma}_* = \frac{8 \cdot w}{d} . \quad (53)$$

4. Консистентную переменную («напряжение сдвига») θ , Па, определяют по формуле

$$\theta_c = A_1 \dot{\gamma}_*^n . \quad (54)$$

5. Потери давления или давление в продукте на выходе из насоса определяют по найденному значению консистентной переменной по формуле

$$p = \frac{4l\theta_c}{d} \quad (55)$$

6. Мощность N , кВт, сообщаемую продукту, определяют по формуле

$$N = pV_c \cdot 10^{-3} \quad (56)$$

IV. Выбор оборудования

1. Насос выбирают по требуемой производительности трубопровода M_c или по часовой производительности, принимая во внимание, что объемный КПД насоса составляет 0,5–0,6. Выбор насоса производят по справочнику.

2. Мощность электродвигателя $N_{эл}$, кВт, к насосу определяют по формуле

$$N_{эл} = \frac{a}{K_{II}} \left(\frac{N}{K_H} + \frac{N_{III}}{K_{III}} \right), \quad (5.57)$$

где a - коэффициент запаса мощности (для коротких трубопроводов до 5 м

$a = 1,2$; для длинных $a = 1,5$); K_{II} , K_H , K_{III} - КПД механических передач от электродвигателя к насосу, насоса и шнеков (питателей); N , N_{III} - полезная мощность, развиваемая насосом и шнеком, кВт.

Данная методика позволяет выполнить расчет трубопроводной установки для пластично-вязких и твердообразных продуктов, например мясных фаршей.

Пример расчета

I. Исходные параметры:

1. Вид продукта - говяжий фарш, приготовленный на куттере.
2. Количество транспортируемого сырья в смену - $M_{см} = 3000$ кг.
3. Продолжительность транспортирования сырья - $\tau_p = 2,1$ ч.
4. Производительность установки равна:

$$M_c = 3000/3600 \cdot 2,1 = 0,3968 \text{ кг/с.}$$

5. Общая длина трубопровода: $l = 6$ м.

II. Выбираемые параметры:

1. Скорость движения фарша по трубопроводу. Принимаем среднюю скорость $w_o = 0,3$ м/с.

III. Расчетные параметры:

1. Секундный объемный расход составит:

$$V_c = 0,3968/1020 = 3,88 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Принимаем плотность для говяжьего фарша $\rho = 1020$ кг/м³.

2. Диаметр трубопровода:

$$d_{\text{расч}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 3,88 \cdot 10^{-4}}{3,14 \cdot 0,3}} = 40,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

По ГОСТу принимаем $d = 35,4 \cdot 10^{-3}$ м. Тогда действительная скорость потока будет равна:

$$w = \frac{4V_c}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot 3,88 \cdot 10^{-4}}{3,14 \cdot (35,4 \cdot 10^{-3})^2} = 0,395 \text{ м/с}.$$

3. Консистентная переменная («градиент скорости») равна:

$$\dot{\gamma}_* = \frac{8 \cdot w}{d} = \frac{8 \cdot 0,395}{35,4 \cdot 10^{-3}} = 89,3 \text{ с}^{-1}$$

4. Консистентная переменная («напряжение сдвига») равна:

$$\theta_c = A_1 \dot{\gamma}_*^n = 600 \cdot 89,3^{0,27} = 2015 \text{ Па}.$$

Значения $A_1 = 600$ и $n = 0,27$ взяты из табличных данных.

5. Потери давления на выходе из насоса равны:

$$p = \frac{4l\theta_c}{d} = \frac{4 \cdot 6 \cdot 2015}{35,4 \cdot 10^{-3}} = 13,68 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

6. Полезная мощность равна:

$$N = 13,68 \cdot 10^5 \cdot 3,88 \cdot 10^{-4} \cdot 10^{-3} = 0,53 \text{ кВт.}$$

7. Выбор оборудования

По справочнику выбираем пластинчатый насос, у которого КПД = 0,12.

Принимаем $a = 1,2$, КПД передач равно 0,6. Тогда,

$$N_{эл} = (1,2/0,6) \cdot (0,3/0,12) = 5 \text{ кВт.}$$

По каталогу производим выбор электродвигателя.

2. Вопросы и задания для самоконтроля

1. Роль трубопроводного транспорта в Агропромышленном комплексе.
2. Требования к насосам для перекачки вязкопластичных биотехнологических сред.
3. Что лежит в основе гидравлических расчетов трубопроводов?
4. Какова связь объемного расход;» с геометрическими размерами трубопровода и кинематикой течения продукта?
5. Какие факторы являются определяющими при расчете трубопроводного транспорта?
6. Какие три случая расчетов трубопроводов вы знаете?
7. Каков физический смысл критерия Рейнольдса?
9. Какие допущения используются в теории реодинамики?
10. Как распределяются напряжение, и подача жидкости по сечению трубы?
11. Что характеризует и каков физический смысл уравнения Пуазеля?
12. Дифференциальное уравнение течения для линейной системы Шведова — Бингама.
13. Объясните физический смысл уравнения Букннтама.
14. Объясните графический и физический Смысл индекса течения я.

15. Физический смысл темпа разрушения структуры т.
16. Рассчитайте и постройте эпюры скоростей для индексов течения 0.3:0,6; 10,0; 20.0.
17. Метод получения критериев (π -теорема).
18. Критериальное уравнение динамики движения пластично-вязких масс.
19. Чем отличается течение иластичновязких биотехнологических систем от жидкообразных?
20. Какое общее давление необходимо создать в трубопроводе для перекачки по нему фарша?
21. Чем обусловлено перераспределение компонентов фарша по живому сечению при перемещении его по трубе?
22. Для чего нужен подогрев трубопровода при перекачки жиросодержащего биотехнологического пластично-вязкого сырья?
23. Используемые методы подогрева продукта в процессе его перемещения по трубопроводу.
24. Как рассчитать скорость движения фарша по трубе при нагревании его до заданной температуры?
25. Объясните физический смысл обобщенного уравнения для расчета эффективной вязкости при любой температуре.
26. Как влияет химический состав фарша и действующее на него давление на его сдвиговые структурно-механические характеристики?
27. Чем отличаются эпюры деформационного поведения фарша по живому сечению при использовании обогреваемой и необогреваемого трубопровода?
28. В чем состоят особенности истечения пластично-вязких биотехнологических сред через насадки по сравнению с истечением структурированной (ньютоновской) жидкости?
29. Уравнение для расчета общих потерь давления при истечении пластично-вязких биотехнологических систем.
30. От чего зависит и как определить давление, необходимое для экструдирования начинки, приготовленной из различных биотехнологических сред (творожной, мясной, рыбной и др.), через конические насадки?
31. Как определить эффективный угол конусности?
32. Что включает в себя расчет трубопроводов для вязкопластичных биотехнологических сред?

33 Приведите основные формулы для расчета фаршепроводов.

34. Сделайте расчет фаршепровода по критериальному уравнению и уравнению «степенной» жидкости для одних и тех же исходных параметров.

Практическое занятие №11 Измерение реологических свойств в процессе переработки и готовой продукции молочной промышленности. Расчет трубопроводного транспорта. Расчеты процессов дозирования.

План занятий

1. Теоретическая часть
2. Вопросы и задания для самоконтроля

1. Теоретическая часть

Измерение реологических свойств в процессе переработки и готовой продукции молочной промышленности

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

Все выше перечисленное делает непрерывный контроль реологических параметров особо значимым для пищевой отрасли. Поэтому разработка приборов для непрерывного реологического контроля является актуальной проблемой. Эти приборы можно разделить на два типа: *первые* – устанавливаются в трубопроводах и служат для измерения свойств в потоке; *вторые* – устанавливаются

непосредственно в рабочей ванне, на машине или на аппарате и следят за изменением реологических характеристик в процессе переработки пищевых материалов.

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

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

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

Еще одной конструкцией, работающей по такому же принципу является автоматический пластометр ЛТИХПа, схема которого представлена на рис. 2. Принцип действия прибора основан на определении напряжений тангенциального сдвига, возникающих при смещении пластины 3 под действием электромагнитного поля, создаваемого катушкой 2, в контролируемой среде. Контроль осуществляется без отбора проб при погружении герметичного измери-

тельного преобразователя непосредственно в резервуар со средой. Для регистрации глубины погружения служит датчик 1. Однако на рифления пластины 3, выполненные для предотвращения ее проскальзывания относительно материала, во время измерений налипают материал, что незамедлительно сказывается на результатах измерений.

Переносной эластомер (рис. 3) предназначен для определения готовности сгустка к резке. Он состоит из измерительного блока 2, индентора 6 с ребрами вдоль образующей и динамометрического устройства 5. эластомер закрепляется в верхней части корпуса ванны

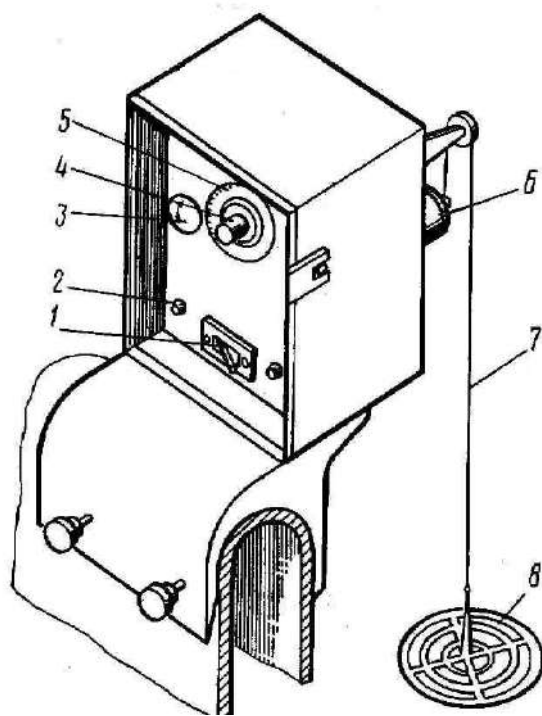


Рис. 1. Консистометр

«Элгеп»

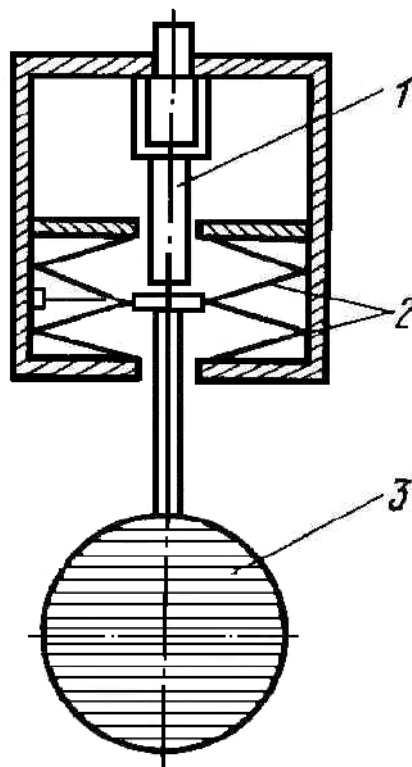


Рис. 2.

Пластометр ЛТИХПа

при помощи кронштейна 7 и винтового зажима 1. После внесения сычужного фермента в молочную смесь опускают измерительный цилиндр. Сопротивление перемещению последнего, которое по мере упрочнения структуры сгустка растет, отмечается лимбом 4. С помощью установочного диска 3 эластомер настраивается на определенную величину сопротивления, при достижении которой прибор подает звуковой сигнал, извещающий о готовности сгустка к

резке. Это позволяет производить резку сгустка при заданных структурно-механических свойствах, дает объективную оценку свойств сгустка перед резкой, сокращает потери жира и сухих веществ в сыворотку.

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

В лаборатории «Сопротивления материалов» КемТИППа разработан ротационный датчик «Сгусток – Р1», в котором устранены недостатки предыдущих конструкций. Схема прибора «Сгусток – Р1» показана на рис. 4.

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

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

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

Известна конструкция датчика для непрерывного контроля процесса свертывания молока, работающего по методу «неразрушающего» контроля. Мембранный прибор для определения готовности сгустка к резке (рис. 5) работает на принципе деформации мембран под влиянием повышенного давления. Прибор состоит из

двух капсул 3 и 4, на внутренней поверхности которых поставлены гофрированные мембраны. Они полностью погружаются в емкость с молоком. С помощью насоса 2 задается циклически (2 раза в минуту) повышенное давление в капсулу 3, которое ведет к деформации мембран, и это воздействие передается на свертываемый продукт. Пока смесь не свернулась, эта деформация мембран почти не передается на приемную капсулу 4. Приемная капсула связана с приемным устройством, состоящим из камеры давления и трансформаторного датчика 1 с линейной дифференциальной характеристикой. При свертывании молока и увеличении плотности сгустка пульсации мембран приемной капсулы увеличиваются. Недостатком данного прибора является сложность конструкции.

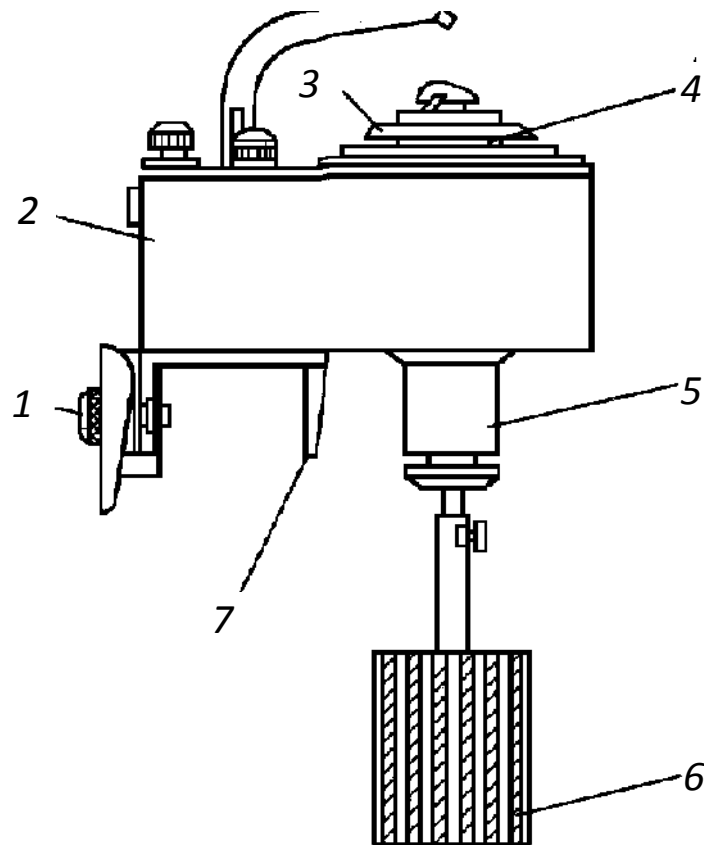


Рис. 3.

Переносной эластомер

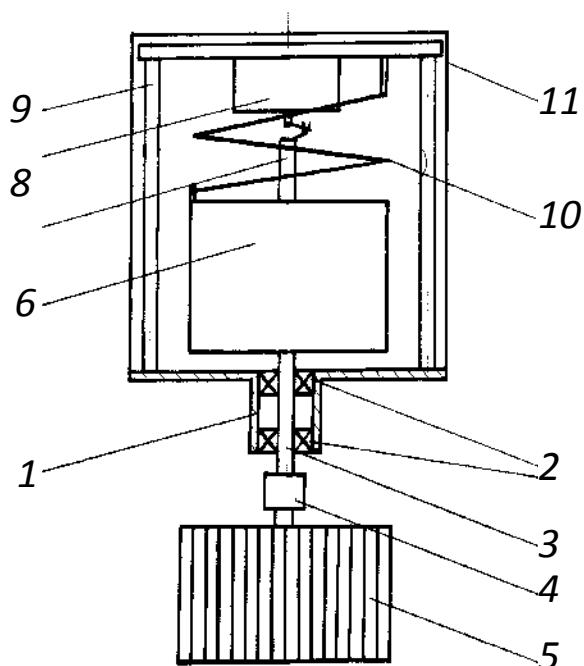


Рис. 4.

«Сгусток – Р1»

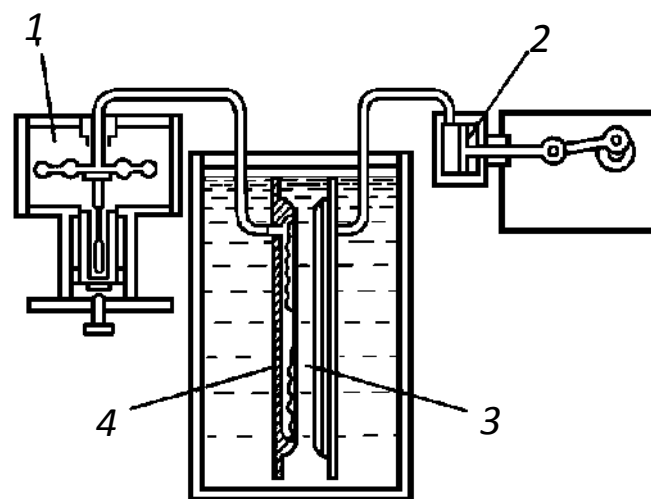


Рис. 5

Мембранный датчик

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

В пищевой промышленности очень эффективными являются портативные приборы, позволяющие не только контролировать конечный продукт, но и проводить исследования его структурно-механических свойств в лабораторных условиях. К таким приборам относятся портативные сдвигометры. Экспериментальным машиностроительным заводом ВНИИМСа изготавливается портативный прибор Табачникова для контроля консистенции сыра (рис. 6), основными элементами которого являются специальный съемный пробоотборник и присоединенный к нему динамометр вращательного движения. Пробоотборник выполнен с продольными рифлениями вдоль наружной поверхности, которые предотвращают его проскальзывание относи-

тельно сыра.

В лаборатории «Прикладной механики» КемТИППа разработана конструкция сдвигометра для определения предельного напряжения сдвига твердых и мягких сыров СР –1 (рис. 7). Отличительной особенностью данного сдвигометра является наличие внутри измерительного цилиндра 4 сверла 2, размещенного на стержне 3, выполненного в виде четырех винтовых лопастей, расположенных через 90° по окружности, и снабженного коническим наконечником 1 с винтовой нарезкой, которая позволяет более точно установить прибор в вертикальном положении относительно материала за счет того, что форма резцов 2 (угол конуса) точно соответствует углу фаски нижнего торца цилиндра. Причем диаметр сверла гарантированно меньше диаметра впадин измерительного цилиндра. Для автоматической фиксации данных измерения устройство имеет тормоз, выполненный в виде фрикционной обгонной муфты, что повышает точность измерений.

Пенетрометр ППМ – 4 (рис. 8), основан на внедрении конического индентора в материал. Его достоинствами является четыре легко заменяемые силоизмерительные гильзы, позволяющие проводить исследование материалов различной твердости, кроме того, прибор снабжен цифровым индикатором перемещений индентора. В качестве индентора можно использовать как конусы с различными углами при вершине, а также одно- и четырехигольчатые инденторы.

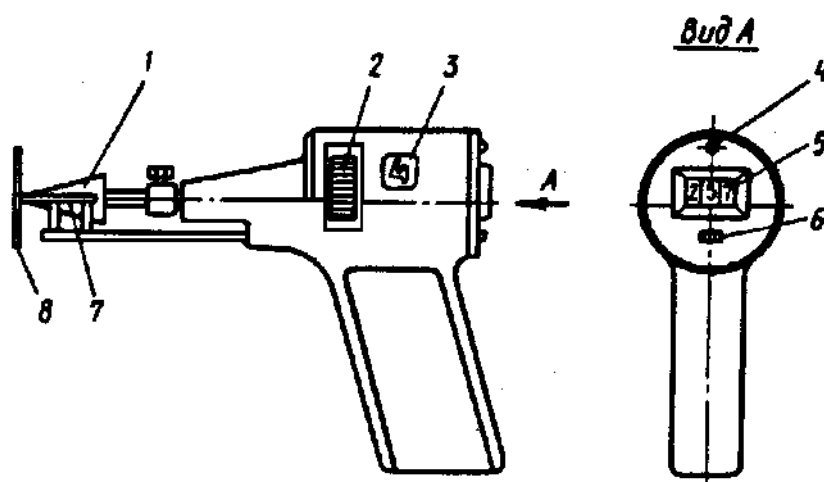


Рис. 8 Пенетрометр ППМ – 4

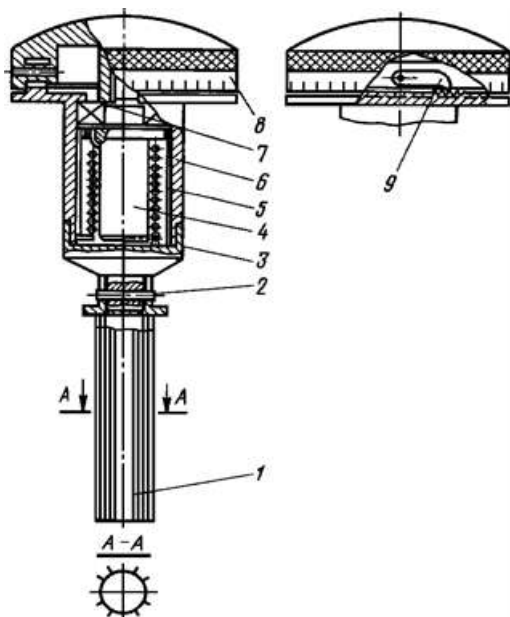


Рис. 6 Портативный прибор для контроля консистенции сыра

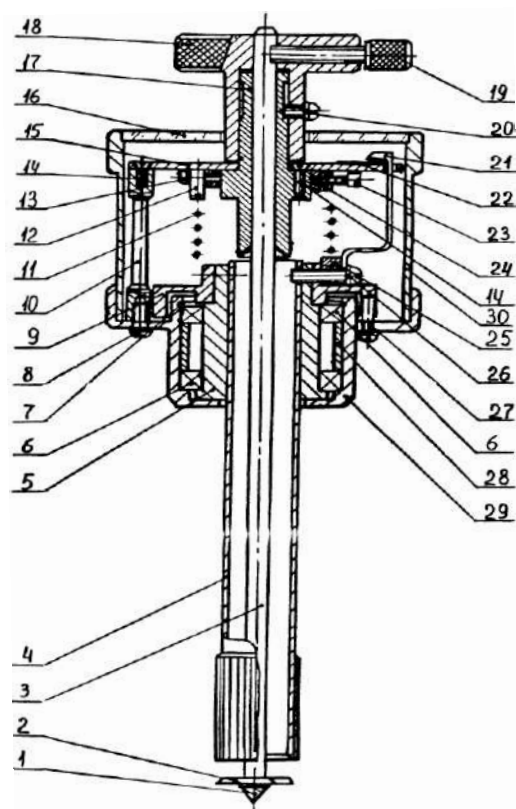


Рис. 7. Сдвигометр

Расчёты процессов дозирования

Процессы дозирования по назначению чрезвычайно многообразны. Одной из основных задач дозирования является создание базы для механизации и автоматизации производственных процессов при одновременном обеспечении точности и соблюдения рецептуры. Наиболее типичными функциями дозирования являются отмеривание продукта по заданному объёму, массе, длине и поддержке заданного объёмного или массового расхода.

Различают два метода дозирования: по объёму и по массе. При объёмном дозировании реологические свойства продукта и способ заполнения формы определяют процесс и конструкцию машины, при массовом – имеют второстепенное значение. Поэтому рассмотрим только первый способ на примере дозирования пластично-вязких масс. Схематически метод объёмного дозирования можно представить как отмеривание определённого объёма продукта и заполнение тары. В одну тару можно дозировать несколько компонентов. Поскольку продукты являются труднотекучими, то их подачу в

рабочие органы следует осуществлять принудительно: с помощью напорных шнеков или лопастей, насосов или поршневых шприцев.

При конструировании дозирующих устройств обычно исходят из кинематики питающих устройств, не увязывая кинетические расчёты с динамикой течения продукта и его реологическими свойствами. Заполнение формы пластично-вязким продуктом представляет собой нестационарный процесс. Продукт, подходя к форме, деформируется и движется в ней, имея выпуклую верхнюю поверхность. При подходе к крышке или дну формы скорость продукта замедляется и начинается заполнение углового пространства. Процесс считается законченным, когда весь объём формы занят продуктом. Необходимое для этого давление складывается из следующих составляющих: потери в местных сопротивлениях – внезапное сужение на входе в форму p_M ; потери при движении по длине формы $p_{ДЛ}$ и давление, необходимое для окончательного заполнения формы $p_{СЖ}$ (его величину определяют в центре крышки, когда угловые пространства заполнены продуктом).

Продолжительность заполнения формы обычно известна. Поэтому в качестве основной расчётной величины можно принять полное давление, которое необходимо создать перед формой для её заполнения в заданный промежуток времени. Если давление превышает необходимое, то продукт сжимается, плотность его увеличивается, что приводит к увеличению массы дозы. При недостаточном давлении масса дозы получается меньше установленной.

Таким образом, полное оптимальное давление p , Па, перед входом в форму составит:

$$p = p_M + p_{ДЛ} + p_{СЖ}. \quad (1)$$

Составляющие общего давления вычисляют по зависимостям:

$$p_M = A_2 \theta_0^{0,4} d_{\text{Э}}^{-0,86} w^{0,56}; \quad (2)$$

$$p_{ДЛ} = C_1 l d_{\text{Э}}^{-1} \eta_{\text{ЭФ}} \rho_{\text{ОТН}} w; \quad (3)$$

$$p_{СЖ} = D \cdot 10^{aw^*}, \quad (4)$$

где: A_2, C_1, D – эмпирические коэффициенты;

$l, d_{\text{Э}}$ – длина дозатора и эквивалентный диаметр поперечного сечения;

w – средняя скорость заполнения дозатора, м/с;

w^* – кинематический коэффициент, зависящий от средней скорости движения продукта в дозаторе;

a – геометрический коэффициент, зависящий от площади сечения дозатора F , м, его формы и специфики заполнения углового пространства у дна, последнее отражается величиной a^* .

$$w^* = w + 0,004, \quad (5)$$

$$a = 56 (F \cdot 10^2)^{2,5} + a^*. \quad (6)$$

Предельное напряжение сдвига и эффективную вязкость берут из таблиц или рассчитывают на основе экспериментальных данных.

2. Вопросы и задания для самоконтроля

1. Какие приборы используются для измерения реологических свойств в процессе переработки и готовой продукции молочной промышленности?
2. На какие типы делятся приборы для непрерывного реологического контроля?
3. Какие приборы служат для контроля подаваемых в переработку материалов по трубопроводам или материалов, выходящих из рабочей машины?
4. Какие приборы предназначены для контроля процессов переработки?
5. Для каких целей используют переносной эластомер, дайте описание этому прибору.
6. Какие приборы работают на принципе деформации мембран под влиянием повышенного давления?
7. Опишите принцип действия пенетрометра и его назначение
8. Опишите принцип действия сдвигометра.
9. Какие два метода дозирования Вы знаете? Описать методы и дать им характеристику.

Практическое занятие №12 Определение предельного напряжения сдвига пластично-вязких продуктов на коническом пластометре КП-3

План занятий

1. Теоретическая часть
2. Вопросы и задания для самоконтроля

1. Теоретическая часть

Цель работы: углубить знания по структурно-механическим свойствам пищевых продуктов, изучить конструкцию прибора КП-3 и методику измерения характеристик, определить предельное напряжение сдвига мясного фарша

Одним из важных показателей, определяющих качество мясного фарша и готовых колбасных изделий, является консистенция. Консистенция является комплексной оценкой структуры продукта и включает в себя такие показатели, как степень плотности, твердости, нежности, упругости, пластичности, вязкости, и которой пользуются при проведении инструментальной или сенсорной оценке качества сырья и готовой продукции.

Для получения продуктов высокого качества необходимо постоянно оценивать свойства сырья на этапах его обработки, что позволит стабилизировать его качество и улучшить эффективность работы технологического оборудования.

Качество фарша и готовых изделий лучше всего характеризует величина предельного напряжения сдвига. По сравнению с эффективной и пластической вязкостью, предельное напряжение сдвига наиболее чувствительно к изменению технологических и механических факторов. Этот показатель можно использовать для технологической оценки качества фарша в процессе его приготовления.

Для определения предельного напряжения сдвига на ряду с другими реологическими приборами широко применяются конические пластометры. Они позволяют определять консистенцию мясопродуктов по величине предельного напряжения сдвига или по относительной величине - степени пенетрации.

Метод погружения конуса для измерения структурно-механических свойств вязко-пластичных тел предложен П.А. Ребин-

дером и Н.А. Семененко.

Согласно теории конических пластометров, разработанной академиком 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. 1. В момент начала погружения конуса в продукт напряжение бесконечно велико (площадь касания равна нулю), его скорость равна нулю, а ускорение ($a = d^2h/d\tau^2$) 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.

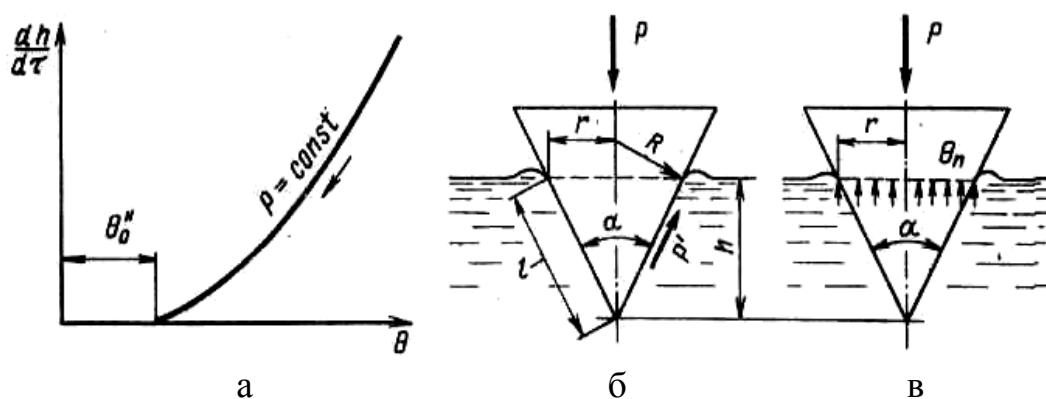


Рис. 1 Реограмма и схемы для расчета:

а - зависимость скорости движения конуса от напряжения сдвига;

б - схема для расчета предельного напряжения сдвига, в - схема для расчета предельного давления.

При остановке конуса ($dh/d\tau = 0$) погружение будет предельным, и внешняя сила уравновешивается пластической прочностью структуры. Для этого случая отсчитывается предельное напряжение сдвига (отношение силы у «смоченной» части боковой поверхности конуса, рис.1. б) или предельное давление (отношение силы к горизонтальной площади сечения конуса, которое проходит по поверхности продукта, рис.1. в). Выталкивающей силой продукта (Архимедова сила) пренебрегают вследствие ее малости. Если снять полную кривую течения (рис. 1. 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. 1. б). Условия равновесия сил на поверхности конуса получим, проектируя на образующую конуса ℓ движущую силу P и приравнивая ее силе сопротивления P' :

$$P' = P \cos(\alpha/2). \quad (1.)$$

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

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

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 сек.

Значительный вклад в развитие конических пластометров 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 вязкопластичных материалов, в которых используется конический индентор. Приборы обладают достаточно высокой точностью измерений, компактны, надежны в работе и просты в обслуживании, имеют небольшую массу.

Оборудование, приборы, инструменты, материалы

Оборудование: ручная мясорубка.

Приборы: конический пластометр КП-3, технические весы, секундомер, школьный транспортер.

Инструменты: нож, разделочная доска.

Материалы (сырье): свинина нежирная - 0,25 кг или говядина - 0,25 кг. Прочее: миллиметровая бумага 1 лист формата А4, карандаш, резинка.

Порядок выполнения работы

1. Познакомьтесь с целью, содержанием и порядком выполнения работы.

2. Изучите теоретические положения работы.

3. Изучите назначение и конструкцию прибора КП-3.

Назначение. Конический пластометр КП-3 разработан М.П. Воларовичем и предназначен для измерения предельного напряжения сдвига пластично-вязких и твердообразных продуктов с неразрушенной структурой, а также для определения консистенции продуктов методом пенетрации.

Конструкция прибора. Общий вид конструкции конического пластометра КП-3 представлен на рис. 2. Прибор состоит: из основания (2) с установочными винтами (1), литой П-образной станины (3), винта подъема столика (4), стопорного винта, микрометрической гайки, подъемного столика (5), емкости для продукта (6), конуса (7), штанги (8), обоймы с подшипниками (9), индикатора пружинного типа (10), направляющих роликов (11), установочных поперечных пластин (12), стопорного устройства (13) и кнопки «пуск» (14).

Основной частью прибора является рабочий конус. Он имеет рифленую поверхность, что исключает скольжение исследуемой массы вдоль его поверхности. Конус соединяется со штангой с помощью стопорного винта. Штанга служит вертикальной направляющей и перемещается в вертикальном направлении по направляющим роликам, которые закреплены в обойме.

Замер глубины погружения конуса осуществляется индикатором. Индикатор позволяет измерять глубину погружения конуса лишь на 0,01 м. Для отсчета большей глубины погружения (до 0,04 м), служат четыре поперечных пластины, жестко связанные между собой, расположенные одна от другой на расстоянии 0,01 м. В центре на основании укреплен столик, который может перемещаться вдоль вертикальной оси прибора. Грубая регулировка положения столика производится стопорным винтом, а точная - микрометрической гайкой. На круглой плите расположены три винта для установки оси прибора в вертикальном положении. Кнопка «пуск» служит для удержания штанги с конусом в начальном положении и для освобождения их в момент испытания. Для проведения испытаний образцов прибор снабжен емкостью цилиндрической формы диаметром 80 мм и высотой 50 мм. Прибор имеет комплект конусов с различными углами при вершине - 30, 45, 60, 90, 120 °. Характеристика прибора: пределы измерения напряжения сдвига - от 5 до 10^4 Па; интервал температур - от 2 до 100 ° С; габа-

ритные размеры - 350×350×700 мм.

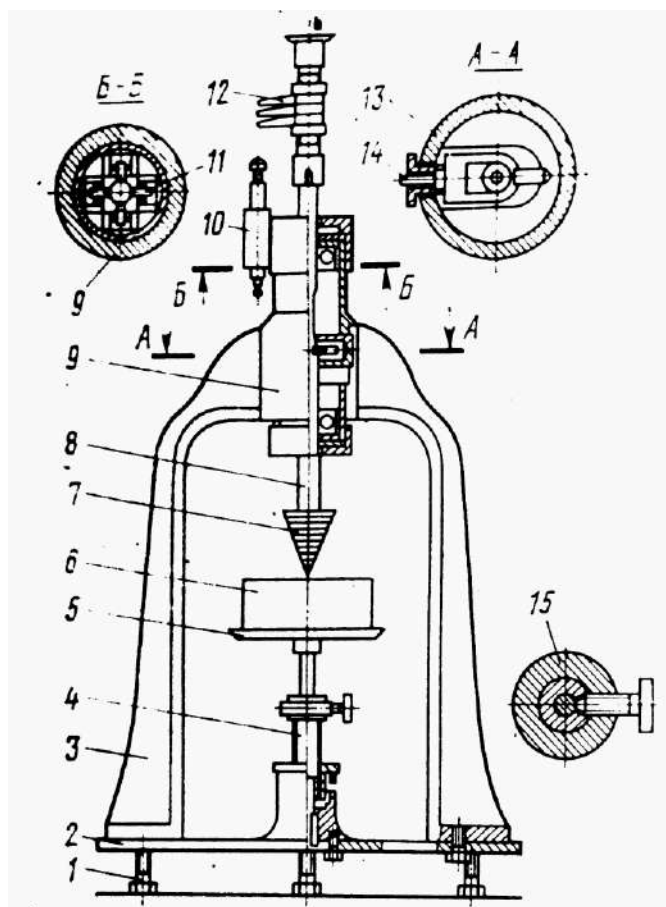


Рис. 2. Конический пластометр КП-3

4. Подготовьте прибор к измерениям.

Для правильной работы прибора необходимо провести его предварительную подготовку, которая включает: установку прибора по уровню; выбор конуса; массы дополнительных грузов (по необходимости), тарировку индикатора и проведение контрольного испытания (замера).

Установка прибора по уровню. На основание прибора (2) кладут уровнемер и, вращая установочные винты (3), выставляют прибор, совмещая шарик уровнемера с риском центра. Правильная установка прибора по уровню необходима для того, чтобы штанга прибора располагалась строго вертикально, в противном случае, измерения будут неправильны.

Выбор конуса. Из комплекта прибора берут конус с наименьшим углом при вершине, например $\alpha = 30^\circ$. Затем выбранный конус закрепляют и производят контрольный спуск штанги. По окончании времени погружения конуса в продукт, равного 180 сек, произ-

водят контрольный замер по шкале индикатора. Для правильности работы прибора глубина погружения конуса $h_{\text{конус}}$ в продукт высотой h должна удовлетворять условию $0,33h \leq h_{\text{конус}} \leq 0,75h$. Если погружение конуса происходит на большую величину, то необходимо взять конус с большим углом при вершине и вновь повторить испытание. Либо добавить груз с учетом условия.

Тарировка индикатора. Под стержень индикатора (10) подвесить первую (нижнюю) установочную планку (12), которая определяет нулевое положение индикатора. Если нулевое положение индикатора нарушено, то надо установить стрелку на нуль вращением его диска.

5. Познакомьтесь с методикой проведения испытаний образцов продукта и измерения его характеристик.

Вначале готовят образцы продукта заданной консистенции.

Приготовленный продукт закладывают в цилиндрическую емкость (6) и уплотняют с помощью шпателя, так чтобы масса не держала пустот. Избытки продукта снимают острым краем шпателя, одновременно выравнивая и сглаживая поверхность образца.

Емкость (6) с приготовленным продуктом устанавливают на подъемный столик (5) и далее, ослабив стопорный винт механизма подъема столика, свободно поднимают вверх, немного не доводя до соприкосновения поверхность с вершиной конуса. Вращая микрометрическую гайку, подводят продукт до соприкосновения с вершиной конуса. Затем, в зависимости от ожидаемой глубины погружения конуса, установить соответствующую поперечную пластину напротив головки индикатора.

После, слегка придерживая штангу, нажать кнопку «пуск» и включить секундомер. Под действием собственного веса и веса штанги конус погружается в испытываемый продукт.

По мере погружения конуса в исследуемый продукт через каждую минуту записывать глубину погружения по индикатору. Во время погружения площадь соприкосновения конуса с продуктом возрастает, а напряжение уменьшается. В результате этого скорость погружения конуса затухает. Затухание происходит до тех пор, пока практически скорость не становится равной нулю.

Принято считать, что погружение заканчивается через 3-5 мин, так как после этого промежутка времени конус погружается на незначительную глубину, чем практически можно пренебречь. Дли-

тельность погружения 180-300 сек. соответствует наибольшему периоду релаксации и для пластично-вязких продуктов. При выполнении работы длительность погружения конуса принять равной 180 сек.

По окончании измерения производят подъем штанги с конусом в исходное положение до фиксации в стопорном устройстве. Далее конус очищают и аналогично готовят прибор к следующему измерению.

Для одного образца продукта выполняют 3-5 измерений. Для повторного измерения, продукт после испытания выкладывают из емкости, перемешивают, укладывают назад, уплотняют, выравнивают и снова испытывают.

6. Измерьте величину угла конуса, массу конуса и штанги, рассчитайте истинную массу грузов, определите константу прибора K_α и результат запишите в табл. 1.

Измерение угла конуса проводится с помощью прибора угломера или школьного транспортира. Массу конуса и штанги определяют путем измерения на технических весах. Истинную массу грузов $m_{ист}$, кг, *рассчитайте* по формуле

$$m_{ист} = (m_{конуса} + m_{штанги}) - m_{тр}, \quad (3)$$

где $m_{конуса}$ - масса конуса, кг;

$m_{штанги}$ - масса штанги, кг;

$m_{тр}$ - масса трения, кг.

Принять $m_{тр} = 0,003$ кг.

Константа прибора K_α принимается по данным Н.Н. Аграната.

7. Приготовьте из мяса три модельных образца продукта для испытаний.

Для подготовки модельных образцов продукта сырье измельчается на мясорубке через решетку диаметром отверстий 3 мм. Для первого образца сырье измельчается однократно, для второго - трехкратно, для третьего - пятикратно.

8. Проведите испытания образцов и результаты измерения запишите в табл. 1. Для точности получения результатов каждый образец подвергается трехкратному измерению.

9. Рассчитайте для каждого испытания предельное напряжение сдвига, его среднее значение для каждой серии и результаты впишите в табл. 1

Таблица 1

Результаты испытаний

Образцы продукта измельчение	Кон- станта Прибо- ра, K_α	Истинная масса гру- зов, $m_{ист}$	Номер испы- тания	Предельное напряжение сдвига, θ_0 , Па	Среднее значение θ'_0 , Па
Однократное			1		
			2		
			3		
Трехкратное					
Пятикратное					

10. По результатам испытаний сделайте вывод.
11. Оформите отчет.
12. Ответьте на контрольные вопросы.

2. Вопросы и задания для самоконтроля

1. Консистенция продукта, что под ней понимают, и что она выражает.
2. Что называется, предельным напряжением сдвига, формула расчета.
3. Объясните, какова значимость предельного напряжения сдвига в оценке сырья и готового продукта.
4. Расскажите механизм погружения конуса в продукт.
5. Расскажите устройство и принцип работы конического пластометра КП-3.
6. Дайте описание методике измерения предельного напряжения сдвига на коническом пластометре КП-3.
7. Дайте описание методике подготовки образца для испытаний.

Практическое занятие №13 Связь структурно-механических свойств и органолептической оценки показателей качества пищевых продуктов

План занятий

1. Теоретическая часть
2. Вопросы и задания для самоконтроля

1. Теоретическая часть

Структура и консистенция как качественные характеристики пищевых сред

Биотехнологические продукты имеют различную структуру и подвижность, характеризующиеся качественным показателем — консистенцией.

Консистенция – это совокупность реологических свойств продуктов с различной структурой. Консистенция характеризует степень плотности, твердости продукта.

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

Структура – это строение продукта, характеризующееся размерами, формой и расположением частиц.

Структура определяется химическим составом, биохимическими показателями, дисперсностью, температурой, агрегатным состоянием и рядом технологических процессов и параметров.

Большинство пищевых продуктов содержат значительное количество воды (60—85%, а некоторые овощи — до 95—97%), но благодаря особому внутреннему строению и свойствам компонентов обладают определенной формой и структурой.

Придание пищевым изделиям в процессе производства заданной формы и структуры — одна из задач технологии пищевых продуктов.

По структуре биотехнологические продукты можно разбить на следующие группы:

- структурированные жидкости (молоко, сливки, концентрированное молоко без сахара, бульоны, расплавленный жир и т.д.),
- вязко-пластичные (фарш для вареных колбас, мясные паштеты, сметана, творожные изделия, сгущенное молоко с сахаром и т.д.)
- пластичные (фарш для полукопченых и сырокопченых колбас, плавленые сыры и т.д.) системы,
- упруго-эластичные (готовые мясные и рыбные колбасы, цельнокусковые мясные и рыбные изделия, сычужные сыры и т.д.) продукты, обладающие иными, чем ньютоновские жидкости структурно-механическими свойствами.

Понятие структуры включает в себя:

- макроструктуру, видимую невооруженным глазом,
- микроструктуру, определяемую при помощи оптического микроскопа,
- ультраструктуру, видимую только в электронном микроскопе.

Макроструктура и ее эквивалент «текстура» характеризуют, прежде всего, технологические аспекты образования и преобразования структуры пищевых продуктов и описываются специальными терминами:

- твердая,
- мягкая,
- хрупкая,
- волокнистая,
- слоистая,
- пористая и др.

Микроструктура дает представление о биологическом аспекте изменения строения продукта, *ультраструктура* — о химическом, физико-химическом и биохимическом строении структурных элементов.

Помимо органолептических структура продукта характеризуется реологическими показателями, в частности эластичностью, вязкостью, упругостью, прочностью и др.

В дальнейшем мы будем характеризовать структуру продукта совокупностью органолептических и реологических свойств, а при необходимости дополнять и другими физическими показателями (водостойкость, набухаемость). При этом следует иметь в виду, что органолептические, реологические и другие физические показатели являются производными микроструктуры, т. е. структуры, формирующейся вследствие физико-химического взаимодействия на молекулярном уровне между белками, водой, углеводами, липидами и другими компонентами, входящими в состав пищевых продуктов.

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

Тип структуры и механические свойства пищевых продуктов определяют их консистенцию.

Показатель «консистенция» характеризует сумму свойств продукта, воспринимаемых глазами и органами осязания. Визуально определяют:

- жидкую,
- гранулированную,
- порошкообразную,
- мажеобразную,
- сиропообразную,
- твердую консистенцию.

Пальцевыми органами осязания оценивают:

- упругость,
- плотность,
- эластичность продукта.

Органами осязания в полости рта ощущают:

- волокнистость,
- крошливость,
- нежность,
- липкость,

- сочность,
- густота,
- зернистость.

Условно показатели консистенции можно разделить на три группы:

- 1) механические,
- 2) геометрические
- 3) зависимые от химического состава.

Механические показатели – параметры, характеризующиеся реакцией продукта на внешнее силовое воздействие. Они определяются с помощью давления, оказываемого зубами, языком и нёбом при пережевывании пищи. К ним относятся:

- твердость,
- выраженность степени сцепления частиц,
- вязкость,
- эластичность
- клейкость.

Геометрические параметры зависят от макроструктуры продукта и делятся на две подгруппы.

Первая включает в себя показатели, определяемые формой и размерами частиц и обозначается терминами:

- однородный,
- порошкообразный,
- мучнистый,
- крупитчатый,
- песчанистый,
- спекшийся,
- рассыпчатый.

Вторая группа показателей характеризуется формой и ориентацией частиц, составляющих макроструктуру (текстуру) продукта, и описывается терминами:

- волокнистый,
- ячеистый,
- стекловидный,
- слоистый,
- пористый и т. д.

Показатели консистенции третьей группы зависят от содержания в продукте влаги или жиров и определяются терминами:

- сухой,
- влажный,
- мокрый,
- водянистый,
- маслянистый,
- жирный,
- салитый и др.

Терминология, характеризующая показатели консистенции третьей группы, указывает не только на количество воды в продукте, но и на скорость её отделения или впитывания. Что касается жиров, то в этом случае учитывается смазывающий эффект, ощущаемый при пережёвывании; а также твёрдость жиров и трудность очищения полости рта от обволакивающего жирового слоя, что связано с их составом и свойствами (например, температурой плавления).

Некоторые термины могут иметь комплексный характер: в частности, понятие «сочный» включает в себя сочетание геометрического параметра «ячеистый» и одновременно свидетельствует о высоком содержании влаги в продукте.

Консистенция взаимосвязана не только со вкусовыми характеристиками продукта. Также она влияет на усвояемость либо является характеристикой степени свежести сырья или продукта. Так, присутствие частиц оболочек зерна в муке грубого помола ухудшает вкус и снижает усвояемость хлеба.

Огрубевшие ткани корнеплодов плохо усваиваются организмом человека. О безупречной свежести охлажденной рыбы обычно судят по запаху и упругости мышечной ткани, а гелеобразующая способность рыбного фарша сурими определяется его показателем эластичности.

Консистенция является одной из наиболее сложных сенсорных характеристик пищевых продуктов.

Однозначная интерпретация ощущения консистенции затруднена из-за особенностей восприятия и физического измерения этого свойства продуктов.

Сенсорная оценка консистенции, которую можно характеризовать как эмпирическую характеристику деформационного поведения материала, была известна до широкого применения реологи-

ческого анализа и используется до настоящего времени. Причиной этого является простота и высокая скорость измерений, невысокие требования к приборам и процедурам обработки данных.

Показатели в достаточной мере отражают анализируемые реологические свойства, обеспечивают быстрый контроль пищевых продуктов относительно соответствия или отклонения того или иного параметра от номинального значения.

Пищевые продукты и сырье, являющиеся биологически активными материалами, представляют собой неустойчивые дисперсные системы, часто подвергающиеся быстрым изменениям, влияющим на реологические свойства, поэтому оценка консистенции в некоторых случаях может быть единственным методом реологического анализа.

Текстура – физико-структурные свойства вещества, в частности продукта, воспринимаемые органами слуха, зрения и осязания и вызывающие у человека определенные ощущения при потреблении (откусывании, разжевывании, проглатывании). Комплекс ощущений при потреблении пищи, который называется органолептическим, приводит потребителя к предпочтению или отказу от пищевых продуктов.

Для создания высококачественных пищевых продуктов необходимо целенаправленно воздействовать на их органолептические свойства.

Консистенция и вязкость относятся к текстуре и представляют собой два из множества возможных ее отличительных признаков (рис. 1).

Сенсорное впечатление о консистенции получают с помощью осязательных ощущений, возникающих в момент соприкосновения с продуктом. Чувство осязания складывается из ряда сигналов, поступающих в головной мозг от рецепторов, расположенных на поверхности кожи, слизистых оболочек, в мышцах и суставах, воспринимающих прикосновение и давление, температуру и боль, а также изменение положения тела в пространстве.

Наиболее чувствительны к давлению и прикосновению кончик языка, губы и кончики пальцев. Осязательная чувствительность полости рта значительно ниже, чем кожи. Способность к осязанию зависит от ряда условий, в том числе и от температуры, длительности воздействия, прикосновения и давления на кожу, к которому

она привыкает быстро. Кроме того, консистенция пищевых продуктов, подобных тесту, сырной массе, фаршам и другим, в том числе искусственным, структурам, может характеризоваться шестым видом ощущения, правда, признаваемым не безоговорочно психофизиологами — кинестезисом.

Под кинестезисом понимают чувствительность к давлению и сдвигу определенных рецепторов в мышцах и суставах; оно возникает, например, при вымешивании теста вручную.

В некоторых случаях отдельные элементы консистенции определяют визуально (это волокнистость, однородность, расслаиваемость, крупитчатость и частично вязкость). При оценке консистенции ряда продуктов исследуют звуки, возникающие при его разрушении в полости рта — раскусывании, пережевывании.

Органолептически определенная консистенция как комплексный показатель складывается из единичных показателей, число и качественный состав которых у отдельных видов продуктов будут различными. Таким образом, при анализе текстуры определяют *кинестетические* признаки продукта, связанные с мышечными ощущениями.

Инструментальные измерительные методы для определения отдельных кинестетических признаков можно разделить на три группы:

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

- эмпирические методы, при которых продукты подвергаются воспроизводимой деформации или нагрузке при помощи измерительных приборов, не позволяющих точно определить реологические свойства. Результаты измерений представляют собой параметры консистенции. Они хорошо коррелируют с признаками текстуры, полученными при органолептической оценке;

- имитационные методы, при которых пищевые продукты в специальных измерительных приборах подвергаются испытаниям, имитирующим реальные нагрузки при приеме пищи, например с помощью циклических нагрузок имитируется процесс разжевывания пробы. Цель такого анализа текстуры – измерение параметров, которые соответствуют признакам текстуры продукта, полученным сенсорным методом. Это предполагает полное совпадение вида на-

грузки, скорости деформации, температуры и других факторов испытания.

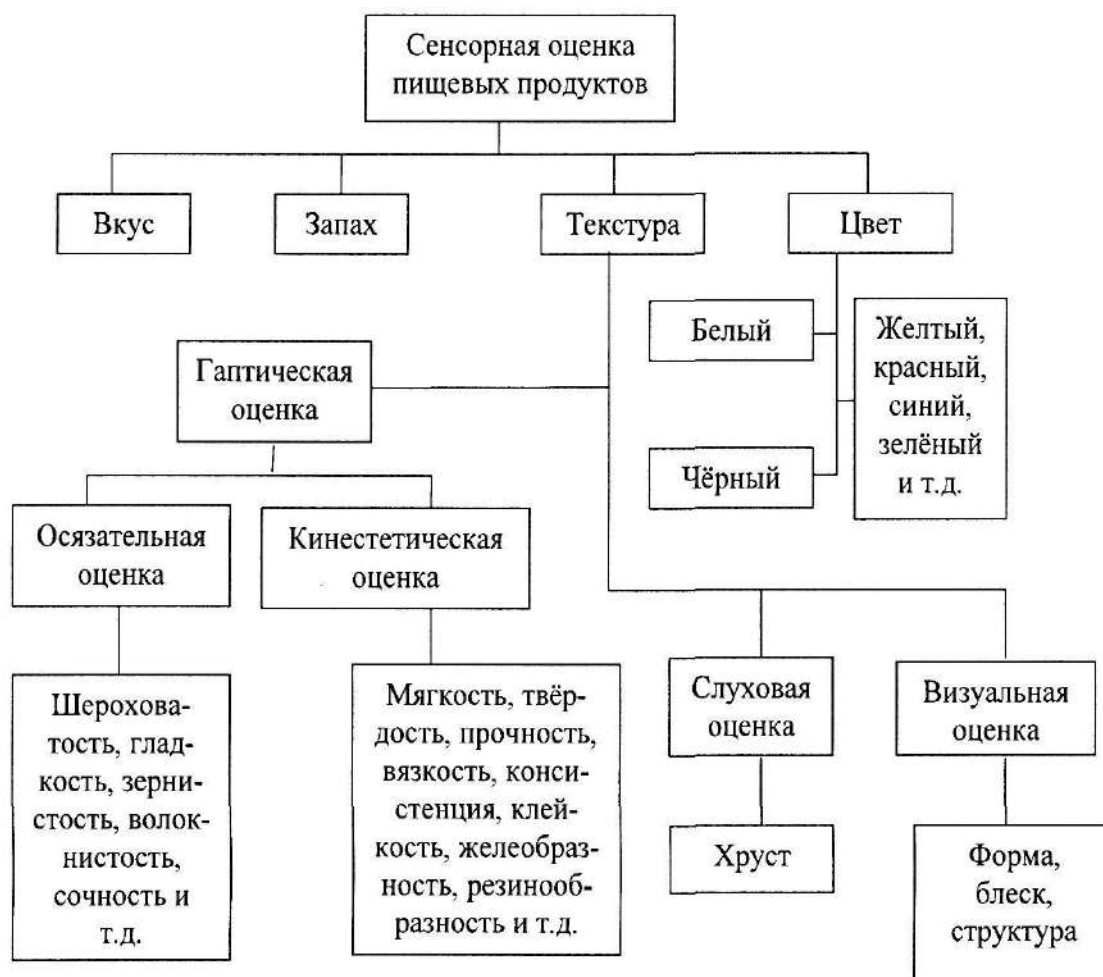


Рисунок 1 – Классификация сенсорной оценки качества и текстуры пищевых продуктов

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

Связь структурно – механических свойств и органолептической оценки параметров качества готовой продукции

Оценка качества продуктов пищевых производств 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 реологии 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 реологических характеристик продукта с органолептической оценкой (консистенцией). Характеристики разделены на три класса:

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

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

Установлено, что сенсорная оценка вязкости продукта может быть дана при напряжении сдвига, развиваемом при скорости сдвига до $\dot{\gamma} \leq 50 \text{ с}^{-1}$. Зависимость сенсорной оценки продуктов ψ (установленной вязкости) от напряжения сдвига (возбудителя) τ при $\dot{\gamma} = 50 \text{ с}^{-1}$ имеет вид:

$$\psi = K_S \tau^{n_B}, \quad (1)$$

где: K_S , n_B – эмпирические коэффициенты.

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

Таким образом, по вискозиметрическим данным при определенной скорости сдвига можно прогнозировать адекватную реакцию человека при сенсорной оценке вязкости. Однако выводы, основанные на изучении только соотношений приборной и сенсорной оценок, не могут быть просто механически использованы для широких обобщений о качестве продукта.

При этом должны быть учтены: значения коэффициентов корреляции; характеристики, измеряемые данным прибором, и условия опытов; однородность образцов продуктов, подвергнутых дегустации; методы расшифровки сенсорных оценок.

Таким образом, для оценки качества каждого продукта необходимо проведение серии реологических измерений с параллельным дегустированием специалистами для выявления практических диапазонов связи измеряемых реологических характеристик с консистенцией продукта. Сенсорные оценки можно также использовать для ориентировочных реодинамических расчётов.

Например, можно воспользоваться номографической таблицей нарастания вязкостных свойств, составленной на основании данных о значениях коэффициентов динамической вязкости различных пищевых продуктов.

Данной таблицей можно пользоваться для ориентировочной сенсорной оценки вязкостных свойств пищевого продукта без проведения измерений, а также для приближённого реодинамического расчёта перерабатывающих машин и аппаратов.

Предположительно рассматриваемый продукт располагается в столбце наименований, а в правой части определяется примерный диапазон его коэффициентов динамической вязкости. Далее проводится расчёт при минимальном и максимальном значении коэффициента.

Результаты анализируются, оценивается их адекватность. Разумеется, более точные расчёты можно производить лишь после вискозиметрии рассматриваемого продукта.

Особое внимание исследователи уделяют изучению взаимосвязи между субъективными ощущениями и механическими параметрами консистенции, измеряемыми с помощью приборов. Очевидно, что машина не в состоянии оценить консистенцию так, как это воспринимает человек. Но, несомненно, существует достаточно четкая связь между инструментальными измерениями и ощущениями дегустатора.

Эту корреляцию можно использовать для прогнозирования потребительской предпочтительности на основе механических параметров консистенции, что способствовало развитию нового направления — психофизики, или психореологии, рассматривающей математическую зависимость между физическими свойствами и ощущениями человека. Учёные стремятся к созданию стандартной номенклатуры и классификации терминов, которые могли бы послужить соединительным звеном между основными принципами реологии и бытовой терминологией.

Терминология консистенции наиболее обширна по сравнению с другими сенсорными свойствами продуктов. Несмотря на многочисленные попытки, до сих пор нет единого словаря терминов, определяющих консистенцию. Определённые трудности возникают также при переводе терминов на другой язык.

Наиболее распространённый термин «консистенция» определяют, как характерный признак продукта, воспринимаемый ощущениями, возникающими при возбуждении механических и осязательных рецепторов, как правило, в ротовой полости; а также при сопротивлении, которое оказывает продукт в попытке его деформировать. При оценке консистенции особое внимание следует уделять размерам образцов и их температуре, так как эти факторы оказывают существенное влияние на результаты анализа.

В таблице 2 приведена характеристика параметров консистенции (по К. Помпеи), определяемых физическими и сенсорными методами.

Таблица 1 -Характеристика параметров консистенции (по К. Помпеи)

Параметр	Характеристика параметров консистенции	
	с точки зрения физики	с точки зрения органолептики
Первостепенные параметры		
Твёрдость	сила, необходимая для достижения определенной деформации	сила, необходимая для откусывания зубами (для твердых продуктов) или для отделения путем прижатия языком к нёбу (для полутвердых)
Сцепление частиц	степень деформации, при которой не происходит разлома	степень деформации зубами, не приводящая к разлому
Вязкость (жидкости)	скорость течения на единицу силы	сила, необходимая для всасывания на язык жидкости с ложки
Эластичность	скорость, с которой продукт принимает первоначальную форму, когда устранен источник деформации	степень, в которой продукт принимает первоначальную форму после сжатия зубами
Клейкость	усилие, необходимое для противодействия силам сцепления между поверхностью продукта и материалом, с которым он может соприкасаться	усилие, необходимое для отделения продукта, прилипшего к тканям рта (чаще всего к нёбу и зубам) при пережевывании
Второстепенные параметры		
Хрупкость	сила, при которой материал крошится; продукт с высокой степенью твердости и низкой степенью сцепления между частицами	сила, при которой продукт крошится, трескается, расслаивается
Пережевываемость	энергия, требуемая для пережевывания цельного продукта до степени, позволяющей его проглотить; продукт, обладающий твердостью, сцеплением частиц и эластичностью	время, затраченное на пережевывание образца с постоянной скоростью пережевывания до тех пор, пока продукт не станет годным для глотания
Вязкость (полутвердого продукта)	энергия, требуемая для размалывания полутвердого продукта до состояния, пригодного для проглатывания; продукт с низкой степенью твердости и высокой степенью сцепления частиц	плотность, сохраняющаяся при пережевывании; время, требуемое для размалывания полутвердого продукта до состояния, пригодного для глотания

Интенсивность проявления оцениваемых признаков обычно характеризуют полуколичественными терминами, например: «мало», «умеренно», «много». При решении точных задач разрабатывают шкалы с определённым числом уровней.

Проблема корреляции между объективными и субъективными измерениями— тема многих исследований. Бонд и Шерман установили, что методы приближения сенсорных оценок к результатам измерений, полученных на приборе, изменяются в зависимости от консистенции продукта.

Например, при оценке деформации, вызванной давлением, определяют два основных показателя: величину прилагаемой силы и скорость ее приложения в целях нахождения связи между органолептической и объективной оценками. В большинстве случаев скорость приложения силы в органолептическом анализе выше, чем при измерении с помощью инструментов. Приводятся примеры графической взаимосвязи между дегустационными оценками параметров консистенции по шкалам А.С. Щесняк и др. и показателями, измеренными физическими методами.

И. Капсалис (США) изучал зависимость между гигроскопическим равновесием, текстурой сублимированных мясных продуктов, термодинамикой и механикой. Оценивались три органолептических показателя (жесткость параллельно волокнам, жесткость поперек волокон и выделение теплоты при дегидратации во рту) и три механических параметра (жесткость, когезионная способность и хрупкость) при различной относительной влажности на изотерме сорбции влаги при 20С. В результате было установлено, что из всех переменных величин основное влияние на органолептические и механические показатели оказывает относительная влажность. Отмечена четкая корреляция между теплотой, образующейся во рту при пережевывании, и общей чистой теплотой адсорбции. Сенсорные и термодинамические величины были максимальными при нулевом значении относительной влажности и минимальными при наибольшем уровне относительной влажности изучаемых объектов.

А. Пирсон (Франция) предложил метод контроля структуры пищевых продуктов путем регистрации жевательных движений. Проводилась электромиографическая запись жевания и глотания, названная программой. Дегустатор откусывал последовательно равные по объему куски продукта, жевал и глотал. Перед опытом

он должен был испытывать чувство голода. В опыте оценивались 15 видов различных по текстуре пищевых продуктов. Основным показателем, характеризующим связь между сенсорными и механическими признаками консистенции продуктов, служило число жевательных движений перед глотанием. Для жидких и полужидких продуктов этот показатель составил нулевое значение, для жестких продуктов — максимально 90 движений. Также определяли характер развиваемой силы и затрачиваемой работы при каждом жевательном движении от начала до конца пережевывания откушенной порции.

Наряду с основным показателем (числом жевательных движений) эти параметры служат дополнительными характеристиками геологической структуры, которую измеряли тремя механическими величинами: жесткостью, сухостью и делимостью продуктов.

Б. Драке (Швеция) исследовал корреляцию между звуками, раздающимися при раздавливании продуктов между зубами, и структурно-механическими свойствами продуктов, оцениваемыми сенсорным методом: твердостью и мягкостью, сухостью и сочностью, хрупкостью. С помощью магнитофона записывали достоверные и очищенные звуки. Установлено, что консистенция продуктов оказывает влияние на распределение амплитуды образующихся звуков по частотам в диапазоне слышимости.

В профильном анализе текстуры продукта К. Помпеи описывает следующий метод. На предварительном этапе группа экспертов работает коллективно. При этом решается вопрос, какие параметры играют роль при оценке качества конкретного продукта и вырабатывается единая терминология. Затем согласовывается карта для регистрации результатов. Можно использовать бланк, на который наносится несколько горизонтальных линий, на которых указываются соответствующие описательные термины.

Эксперты индивидуально оценивают интенсивность каждого параметра текстуры и регистрируют результаты, отмечая на линии соответствующее расстояние от указанных терминов. Ответы трансформируются в числовые значения последующей градуировкой шкалы. Результаты обрабатываются статистически отдельно для каждого параметра. Устанавливают уровень значимости ответов по отношению к образцам либо по отношению к отдельным

экспертам. Затем строится профиль. Радиальные линии представляют собой шкалы со значениями 0 в центре и 30 в конце. Число линий равно числу исследуемых параметров. На линиях откладывают отрезки, соответствующие средним арифметическим значениям оценок интенсивности различных параметров. Соединив полученные точки, получают профиль текстуры.

Профильный метод имеет большие перспективы. Например, при разработке нового продукта может быть построен идеальный профиль, а затем, варьируя технологические режимы и набор компонентов, можно приблизить профиль получаемого продукта к идеальному профилю.

С помощью этого метода удобно выявлять изменения, протекающие в продукте при замене составляющих в рецептуре или при уменьшении (увеличении) массовой доли какого-либо компонента. Метод может также успешно применяться при анализе изменений, происходящих в продукте под влиянием различных условий хранения, по сравнению с аналогом

Для объективной характеристики окраски продуктов применяют спектрофотометрические и колориметрические методы исследования.

Вкусовые и ароматобразующие соединения анализируют методами, основанными на химических реакциях, в которых участвуют основные вещества или классы соединений, ответственные за определенное ощущение вкуса (соленого, сладкого, кислого, горького) или запаха. Измерение интенсивности и стойкости запаха, как свойств соединения, называется одориметрией.

Установление взаимосвязи между сенсорными и инструментальными исследованиями запаха представляет сложную, но увлекательную научную и практическую проблему. Новым направлением являются биосенсоры, основанные на использовании ферментов для обнаружения ничтожных количеств пахучих веществ, и нашедшие на Западе практическое применение для отбраковки некачественной продукции.

Сенсорные методы установления интенсивности запаха ароматобразующих веществ основаны на непосредственных измерениях либо требуют применения специальных приборов. Сенсорный способ оценки интенсивности запаха пахучих веществ достаточно

быстрый и точный, поэтому в промышленности он находит широкое применение при оценке запахов эссенций, концентратов, экстрактов и приправ. Такую оценку проводят методом разбавления растворов, обладающих запахом. Приготавливают водный, масляный, глицериновый растворы исследуемого ароматобразующего вещества определенных концентраций, а затем подвергают органолептической оценке запах этих растворов.

Определение корреляции между сенсорными (субъективными) и инструментальными (объективными) методами и показателями качества является единственным способом обоснования объективных методов анализа.

Приборные методы часто бывают более легкими и быстрыми по выполнению и менее трудоемкими по сравнению с научно обоснованными органолептическими приемами. Взаимосвязь между сенсорными и инструментальными показателями позволяет решить вопрос о приемлемости того или иного несенсорного метода для оценки органолептических свойств продуктов. Однако дегустационный анализ является наиболее точным и надежным при решении вопросов сенсорного качества и потребительской предпочтительности продуктов питания.

2. Вопросы и задания для самоконтроля

1. На какие группы разбиты пищевые продукты по структуре?
2. Что определяет термин «консистенция»?
3. Методы оценки и регулировки качественного показателя консистенции биотехнологических сред.
4. Какими методами проводят упрочнение структуры?
5. На какие группы разделяются реологические характеристики по способу приложения усилия?
6. Методы определения реологических характеристик биотехнологических сред.
7. Какова взаимосвязь между инструментальной и органолептической оценкой качества различных видов биотехнологических сред?
8. Как влияют технологические и механические факторы на различные группы структурно-механических характеристик биотехнологических сред?

9. Какая реологическая характеристика является наиболее чувствительной величиной от технологических и механических факторов?
10. Какой метод измерения структурно-механических характеристик биотехнологических сред с различной структурой является наиболее перспективным и почему?
11. Описать взаимосвязь между субъективными ощущениями и механическими параметрами консистенции, измеряемыми с помощью приборов.
12. Опишите классификацию структурных характеристик продуктов определенную Шерманом
13. Приведите классификацию сенсорной оценки качества и текстуры пищевых продуктов
14. Привести примеры использования сенсорных оценок для ориентировочных реодинамических расчётов
15. Структура и консистенция как качественные характеристики пищевых сред.
16. Дайте определения понятию кинестезис.

Практическое занятие №14 Структурно – механические свойства животных тканей. Свойства твердообразных продуктов. Прочностные свойства замороженного связного сыря

План занятий

1. Теоретическая часть
2. Вопросы и задания для самоконтроля

1. Теоретическая часть

Структурно – механические свойства животных тканей.

К животным тканям относятся мышечная ткань (мясо), соединительная ткань, костная ткань и жировая ткань. Мышечная ткань или мясо относят к структурированным дисперсным системам, для которых характерны высокая структурная вязкость и упругость формы.

Мышечная ткань представляет собой совокупность мышечных волокон, объединенных в пучки различных порядков, которые раз-

делены тонкой прослойкой соединительной ткани. Мясо содержит 72 -75 % воды и 28 - 25 % сухого остатка, который в свою очередь на 80 % состоит из белковых веществ.

Физико-механические свойства мяса характеризуются прочностью, упругостью, эластичностью, вязкостью, липкостью и др. Важными показателями прочности мяса являются напряжения сжатия, растяжения, среза, изгиба, а для замороженного мяса также твердость и ударная вязкость. На деформацию мяса влияет его анизотропность. Предел прочности на растяжение является одним из основных показателей прочности мяса. При исследовании упруго - эластично- пластичных свойств мяса методом растяжения (рис. 1) отчетливо прослеживается трансформация различных видов деформаций.

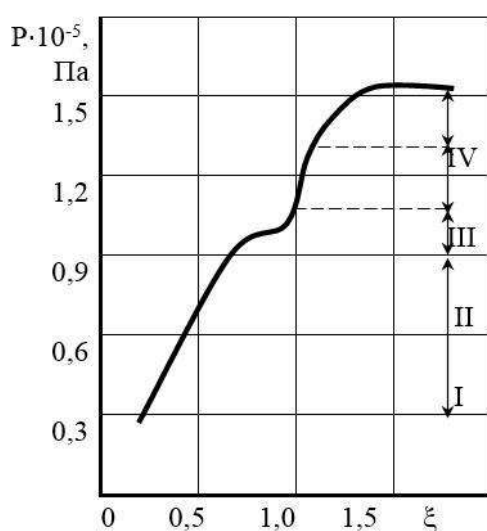


Рис.1. График зависимости напряжений от деформации при растяжении мышечной ткани.

Участок I характеризует чисто упругую деформацию в соответствии с законом Гука. На участке II происходит частичное изменение структуры мышечных волокон, сопровождающееся упрочнением мяса. Это зона эластично-пластичных деформаций мышечной ткани. На участке III наблюдается упруго-эластичные деформации, переходящие в пластические на участке IV.

Прочностные свойства мышечной ткани сильно зависят от ее температуры. Для мяса существует две характерные температуры, которые являются границами проявления различных прочностных

свойств (рис.2). Криоскопическая температура $t_{\text{кк}} = -4^{\circ}\text{C}$ характеризует процесс кристаллизации свободной влаги.

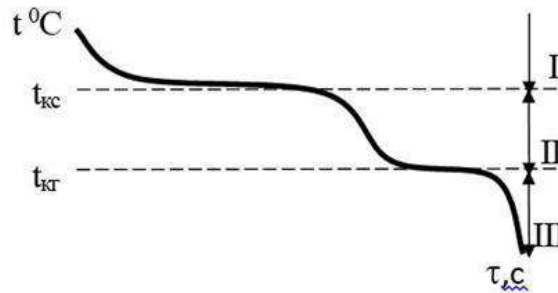


Рис 2 Термограмма замораживания мяса

Криогидратная температура $t_{\text{кг}} = -56^{\circ}\text{C}$ является точкой замораживания связанной влаги. При температуре выше криоскопической мясо ведет себя как упруго-эластично-пластичное тело. Температура -4°C является оптимальной при хранении свежего мяса. В диапазоне температур от -4°C до -56°C кристаллизуется свободная влага, снижается пластичность и повышаются упругие свойства мышечной ткани.

Ниже криогидратной температуры (-56°C) мясо ведет себя как абсолютно упругое тело, его разрушение под воздействием нагрузок носит хрупкий характер. Зависимость напряжений от деформаций при таких температурах подчиняется закону Гука.

Соединительная ткань состоит из коллагеновых и эластических волокон. Коллагеновые волокна отличаются высокой прочностью и обуславливают прочностные свойства соединительной ткани. Для сравнения: сопротивление резанию различных мышц 1,3 - 8,6 кН/м, соединительной ткани 27 - 40 кН/м. Соединительная ткань биологической ценности не представляет, однако включается в различные продукты питания как полезный для процесса пищеварения компонент.

Костная ткань - это вид соединительной ткани с сильно развитым промежуточным межклеточным веществом, состоящим из органических и неорганических компонентов и воды. Сухая кость содержит 70 % неорганических компонентов, 30 — 36 % из оставшихся 30 % приходится на коллаген, который определяет прочностные свойства кости, ее высокую упругость и ударную вязкость. В скелете животных различают опорные кости (конечности, череп) и каркасные кости (ребра, позвоночник). Костная ткань подразделя-

ется на компактную костную ткань и губчатую костную ткань. Опорные кости скелета состоят преимущественно из компактной костной ткани, каркасные кости - из губчатой. Строение опорной кости представлено на рис. 3

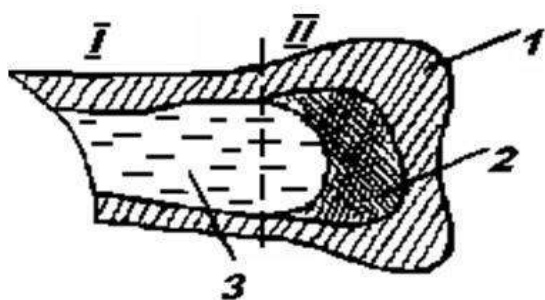


Рис. 3. Строение опорной кости. 1 – компактная костная ткань, 2 – губчатая костная ткань, 3 – жировая ткань. I – диафиз, II – эпифиз.

По данным А. А. Соколова модуль упругости диафиза составляет 156 МПа. На прочностные свойства кости значительно влияет термическое воздействие.

График зависимости ударной вязкости от продолжительности термической обработки представлен на рис. 4. Из графиков видно, что говяжья кость достигает наименьшей прочности после 15 мин. варки, а свиная - после 5 мин. Эти данные очень важны при расчете машин для разрушения кости и определяют технологию ее переработки.

Свойства твердообразных продуктов

Твердые тела в зависимости от упругости бывают гуковскими и негуковскими.

Гуковское тело – это идеально упругое тело, состояние которого описывается уравнением Гука. После снятия нагрузки, отдавая накопленную энергию, гуковское тело без запаздывания возвращается в исходное состояние.

Поведение негуковских тел не соответствует поведению идеально упругого тела. Для негуковского твердого тела с нелинейной упругостью полагают

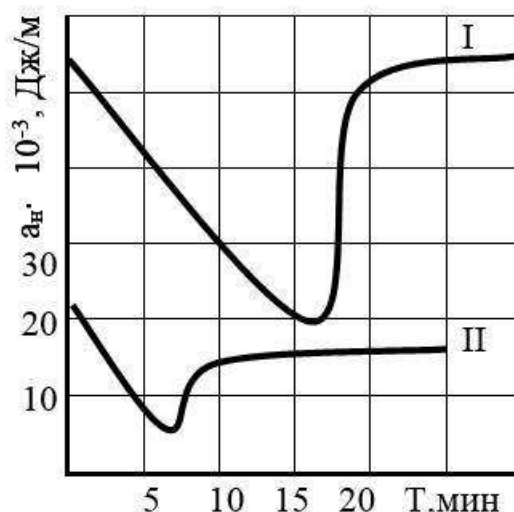


Рис. 4. Зависимость ударной вязкости от продолжительности термической обработки: I - говяжья реберная кость, II - свиная реберная кость.

$$\Theta / \gamma = G \neq const \quad (1)$$

При этом модуль сдвига является функцией деформации, что характерно, например, для пористых пенообразных пищевых продуктов, в частности, натуральных сыров, мороженого.

По аналогии с неньютоновскими жидкостями вводят понятие эффективного модуля упругости $G_{эф}$. При напряжении, не превышающем предел текучести или прочности твердого тела, соотношение между напряжением сдвига Θ и деформацией γ можно описать с помощью эмпирической формулы

$$\Theta = G_{эф} \cdot \gamma^m \quad (2)$$

Реологическое поведение простейшего вязкоупругого тела можно описать с помощью закона Кельвина

$$\Theta = G \cdot \gamma + \eta \cdot (d\gamma / d\tau) \quad (3)$$

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

$$\gamma = \gamma_{max} \cdot \exp(-G\tau / \eta), \quad (4)$$

$$\gamma = \gamma_{max} \cdot \exp(-\tau / T), \quad (5)$$

где $T = \eta/G$ - период релаксации напряжений.

Если среду нагрузить постоянным напряжением θ при $\tau_p > 0$, то

$$\gamma = \frac{\Theta_1}{G} [1 - \exp(-\tau / T)], \quad (6)$$

т. е. деформация во времени постепенно увеличивается, стремясь к значению Θ_1 / G при $\tau \rightarrow \infty$.

Входящая в эти уравнения величина периода релаксации имеет большое значение при исследовании физико-механических свойств, особенно при малых напряжениях и времени действия напряжения того же порядка, как период релаксации. В зависимости от периода релаксации деформации тела можно разделить на два рода. Когда продолжительность действия силы меньше периода ре-

лаксации, энергия, подводимая к системе, вызывает упругие деформации по всему объему. Когда продолжительность действия силы больше периода релаксации, процесс протекает с накоплением энергии и влечет за собой остаточные деформации.

Таким образом, течение реальных твердых тел наблюдается после превышения критического напряжения предела текучести.

При дальнейшем нагружении достигается предел прочности, при превышении которого твердое тело разрушается. Это явление наблюдается в таких процессах, как дробление или резание, и поэтому имеет технологическое значение. Если разрушение происходит без существенного изменения формы, говорят о хрупком разрушении, если разрушению предшествует значительное изменение формы, говорят о вязком разрушении. Простейшим случаем пластичного твердого тела является тело Бингама. При нагрузке ниже предела текучести ($\Theta < \Theta_0$) оно ведет себя как гуковское тело ($\Theta < G\gamma$), выше ($\Theta \geq \Theta_0$) - как жидкость ($\Theta = \eta_{nl}\dot{\gamma} + \Theta_0$). Такие деформационные свойства наблюдаются у сливочного масла при $t > 14$ °С, плавленных сыров и сыров типа чедер.

Прочностные свойства замороженного связного сыря

Большое количество пищевых материалов резко меняет свои прочностные свойства при отрицательных температурах. Это связано, конечно, с тем, что они содержат вещество, меняющее свое агрегатное состояние. Этим веществом может быть не только вода, но и глицериды различных видов, содержание которых в объектах переработки может быть весьма велико.

Рассмотрим прочностные свойства мышечной ткани, которые сильно зависят от ее температуры. Для мышечной ткани существует две характерные температуры, которые являются границами проявления различных прочностных свойств (рис. 1).

Для изучения деформационного поведения растительной ткани при отрицательных температурах был взят мускатный орех – пряность, широко используемая в качестве вкусовых и ароматических добавок в пищевые продукты. Получение порошка мускатного ореха вызывает большие проблемы, так как он проявляет высокую адгезионную активность и повышенную пластичность.

В промышленности используют как мускатный цвет, так и сам плод – мускатный орех. Его включают в состав пряных смесей: "карри", сиамскую универсальную, болонскую, франкфуртскую, "сухие духи" и др. Мускатное масло входит в состав пряных смесей для колбас, куриных изделий, ароматизации конфет и некоторых типов табака. В пищевой промышленности мускатный орех добавляют в соусы "Южный", "Восток", острый томатный, горчицу "Ароматная". Им ароматизируют вареные и ливерные колбасы, сосиски, печеночный паштет. В составе смесей этой пряностью сдабривают некоторые хлебобулочные изделия. С мускатным орехом готовят пряную и маринованную сельдь, пряную мелкую рыбу, сельдь беломорскую, рыбу горячего копчения.

Семенное ядро (мускатный орех) содержит не менее 3 % (по некоторым сведениям до 10 %) эфирного масла сложного состава (включает пинен, гераниол, овгенол, дипентен, линалоол и др.), около 40 % плотного жирного масла, состоящего в основном из триглицеридов миристиновой кислоты (тримиристин), органические кислоты, а также крахмал (около 20 %), пигменты, сапонины, пектиновые вещества. В ариллусе присутствуют эфирное и жирное масла – соответственно 10-15 и 30 %, смолы, слизи, крахмал, краситель.

Определение энергии разрушения для мускатного ореха при низких температурах было вызвано перспективностью использования криоизмельчения этих материалов. Криоизмельчение позволяет значительно увеличить сохранность летучих ароматических веществ в молотом продукте. Особенно актуальны такие исследования для мускатного ореха в силу очень высокого содержания в нем плотного жирного масла, что значительно затрудняет процесс измельчения.

При низких температурах липиды переходят в твердообразное состояние, и плоды приобретают высокую упругость, разрушаются как хрупкие тела. Исследования проводились при различных температурах образцов.

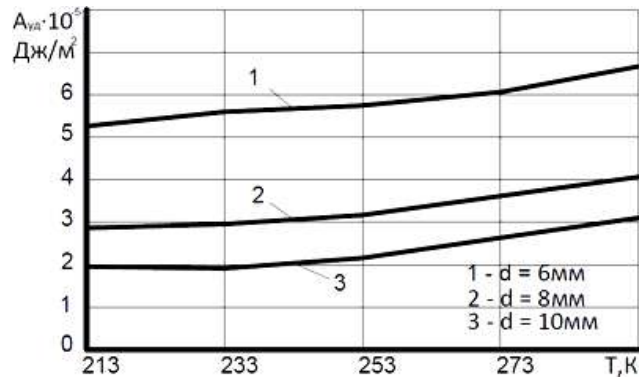


Рис. 5– Зависимость удельной работы разрушения $A_{уд}$ образцов мускатного ореха от температуры при испытаниях на вертикальном копре

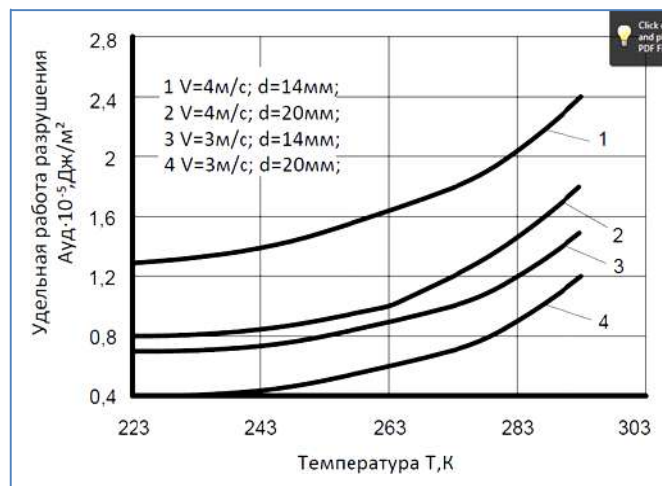


Рис 6– Зависимость удельной работы разрушения $A_{уд}$ мускатного ореха от температуры при испытаниях на маятниковом копре с различными скоростями нагружения

Для определения температуры брались две равных по величине частицы исследуемого материала, замораживались в жидком азоте. Разрушаемый образец устанавливался под падающий груз, эталонный образец – рядом вне площади, накрываемой грузом. В эталонном образце через отверстие устанавливалась термопара. Температура образцов постепенно увеличивалась и при достижении величины, при которой осуществляется испытание, груз сбрасывался на образец. Зависимость удельной энергии разрушения от температуры для образцов кубической формы из мускатного ореха, проведенные на вертикальном копре, представлены на рис. 5. Как видно по результатам эксперимента, энергия разрушения образцов при понижении их температуры уменьшает-

ся. Это легко объясняется с позиций адгезионной прочности растительной ткани разупрочнением структуры в связи с переходом влаги и масел в твердообразное состояние, снижением межклеточного поверхностного взаимодействия.

Испытания целых плодов мускатного ореха проводились динамическим срезом на маятниковом копре. Для обеспечения сдвигового характера нагрузки орех устанавливался в трубку, вторая фиксировалась в установочных плитах копра. В рабочей части (бойке) маятника закреплялась пластина с цилиндрической проточкой диаметром 14 и 17 мм по размерам испытываемых образцов.

Варьировались не только размеры образцов, но и скорость удара и температура. Температура устанавливалась способом, описанным выше. Результаты экспериментов представлены на рис. 6. Опять же наблюдается снижение удельной энергии разрушения при уменьшении температуры образцов. Увеличение скорости удара также ведет к понижению энергии разрушения. Этот факт объясняется тем, что при увеличении скорости нагружения напряжения в образце не успевают релаксировать, снижается доля пластических деформаций, разрушение становится более хрупким. Это отчетливо наблюдалось по характеру скола образцов. При высоких скоростях поверхность раскола была близка к плоскости.

2. Вопросы и задания для самоконтроля

1. Как изменяются прочностные свойства костной ткани при термической обработке?
2. Какая аналогия между прочностными свойствами растительной и животной ткани?
3. Чем объясняется упрочнение костной ткани при продолжительной термической обработке?
4. Поясните деформационное поведение мышечной ткани на примере диаграммы «напряжение – деформация»
5. На примере термограммы замораживания объясните трансформацию свойств мяса.
6. Изложите методику испытаний, замороженных образцов на маятниковом копре.

Приложение 1 Задачи

Задача №1 –7 . Рассчитайте и определите соотношение между адгезией и аутогезией частиц муки, если известен их средний диаметр (d_{cp}), пористость (Π), сила адгезии и аутогезии отдельных частиц ($F_{ад}$, $F_{аут}$.)

Таблица 1

№ Задачи	1	2	3	4	5	6	7
Средний диаметр частиц, (d_{cp}) мкм.	10	20	30	35	45	55	65
Пористость, Π .	0,23	0,27	0,31	0,34	0,37	0,39	0,41
Сила адгезии частиц $F_{ад} \cdot 10^7$ Н.	10,7	8,5	8,1	7,7	7,4	7,1	6,82
Сила аутогезии частиц $F_{аут} \cdot 10^6$ Н.	2,3	3,5	4,7	5,2	5,3	5,4	5,6

Задача №8. Определите параметры течения сыпучего материала и сделайте вывод о характере его течения. Если известна зависимость между усилием сдвига и нормальным давлением при движении внутри муки (1), по отношению к стальной поверхности (2), таблица 2.

Таблица 2

1	P_k , кПа	1,25	1,88	2,63	3,31	4,38
	$F_{орг.}^T$, кПа	1,88	2,25	2,75	3,19	3,75
2	P_k , кПа	1,13	1,88	3,25	4,38	-
	$F_{орг.}^T$, кПа	0,5	0,88	1,38	1,88	-

Задача №9. Определите параметры течения сыпучего материала и сделайте вывод о характере его течения. Если известна

зависимость между усилием сдвига и нормальным давлением при движении внутри муки (1), по отношению к полиэтилену ПВД (2), таблица 3.

Таблица 3

1	P_k , кПа	1,25	1,88	2,63	3,31	4,38
	$F_{орт.}^τ$, кПа	1,88	2,25	2,75	3,19	3,75
2	P_k , кПа	1,06	1,88	3,25	4,38	-
	$F_{орт.}^τ$, кПа	0,75	1,00	1,44	1,81	-

Задача №10. Определите параметры течения сыпучего материала сделайте вывод о характере его течения. Если известна зависимость между усилием сдвига и нормальным давлением при движении внутри муки (1), по отношению к токопроводящему ПЭ (2), таблица 4.

Таблица 4

1	P_k , кПа	1,25	1,88	2,63	3,31	4,38
	$F_{орт.}^τ$, кПа	1,88	2,25	2,75	3,19	3,75
2	P_k , кПа	1,00	1,81	2,56	3,25	4,38
	$F_{орт.}^τ$, кПа	0,38	0,625	0,94	1,13	1,5

Задача №11. В зависимости от влажности теста получены следующие значения модуля Юнга и вязкости:

Таблица 5

Влажность, W, %	Модуль Юнга E , кПа	Вязкость, $\eta \cdot 10^{-3}$, Па·с
32	22,6	1100
44	2,2	3,7
60	0,73	2,8

Используя сведения, приведенные в таблице 5, определить к какому классу структурированных систем относится тесто с различной вязкостью.

Задачи №12 –15 . Для теста в процессе брожения в зависимости от влажности (W) получены следующие данные:

Таблица 6

№ Задачи	12	13	14	15
Влажность теста W , %	39,7	41,5	43,8	44,5
Период релаксации напряжений λ , с	15	12	10	8
Вязкость, η кПа·с	370	443	45	21

Определить модуль Юнга (E) и его размерность, деформацию, если система деформируется при напряжении, равном: 0,87 кПа, время деформации 2, 7, 10, 25 (мин).

Задача №16 - 47. Определите среднюю силу сцепления между частицами муки в порошке, если его пластическая прочность на сдвиг P_c , пористость Π , структурный параметр k (см. номер задачи в таблице 8). Структурный параметр k определите по таблице 7, диаметр частиц муки равен $d=40$ мкм.

Таблица 7

Объемное содержание ϕ	0,20	0,25	0,30	0,40	0,45	0,50	0,55
Структурный коэффициент k	0,02	0,07	0,24	0,70	1,10	1,60	2,00

Таблица 8

Задача №	$P_c, \text{Па}$	$\Pi=1-\phi$	$d, \text{мкм}$
16	201	0,54	40
17	205	0,55	39
18	207	0,16	41
19	208	0,17	42
20	209	0,18	43
21	211	0,19	44
22	210	0,20	45
23	212	0,21	46
24	213	0,22	47
25	214	0,23	48
26	215	0,24	49
27	216	0,25	50
28	217	0,26	51
29	218	0,26	52
30	220	0,28	53
31	221	0,29	54
32	222	0,30	55
33	223	0,31	56
34	224	0,32	57
35	225	0,33	58
36	226	0,34	59
37	227	0,35	60
38	228	0,39	61
39	229	0,37	62
40	230	0,38	63
41	231	0,39	64
42	232	0,40	65
43	233	0,41	66
44	234	0,42	67
45	235	0,43	68
46	245	0,44	69
47	250	0,45	70

Задачи №48 – 58. Различные реологические свойства структурированных систем представлены в виде модели, состоящей из трех элементов и характеризующих зависимость между напряжением деформации и деформацией. Определить вид соединения элементов (последовательное и параллельное), суммарное напряжение деформации и деформацию при различном сочетании элементов. Изобразить, схематически, соединения элементов с указанием численных значений.

Таблица 9

Задача №	№ моделей в соответствии с номером задач	Деформация γ	Напряжение деформации, σ , кПа.
48	1	0,03	0,8
	2	0,03	0,9
	3	0,03	1,1
49	1	0,03	0,8
	2	0,06	0,8
	3	0,09	0,8
50	1	0,06	0,9
	2	0,06	2
	3	0,06	1,1
51	1	0,09	0,9

Продолжение таблицы 9

Задача №	№ моделей в соответствии с номером задач	Деформация γ	Напряжение деформации, σ , кПа.
51	2	0,11	0,9

	3	0,2	0,9
52	1	0,09	0,8
	2	0,09	1,5
	3	0,09	2,3
53	1	0,1	0,8
	2	0,1	2,6
	3	0,1	3,4
54	1	0,09	1
	2	0,11	1
	3	0,2	1
55	1	0,16	2,3
	2	0,14	2,3
	3	0,3	2,3
56	1	0,3	1,9
	2	0,3	1,5
	3	0,3	3,4
57	1	0,2	0,2
	2	0,2	0,1
	3	0,2	0,3
58	1	0,2	3,4
	2	0,1	3,4
	3	0,3	3,4

Исходные данные к задаче №48 – 58.

Таблица 10

48	σ ,кПа.	0,03	0,06	0,09	0,1	0,2	0,3
	γ	0,8	0,9	1	1,1	2,3	3,4
49	σ ,кПа.	0,18	0,18	0,18	2,7	0,3	0,36
	γ	0,8	1,6	2,4	3,2	4	5,6
50	σ ,кПа.	0,06	0,12	0,18	0,18	0,24	0,3
	γ	4,9	2	4	2	2	4,8
51	σ ,кПа.	0,4	0,6	0,6	0,8	0,8	0,2
	γ	0,9	0,9	1,8	1,8	2,7	1,8

52	σ ,кПа.	0,09	0,09	0,18	0,18	0,18	0,27
	γ	4,6	5,1	4,6	3,3	3,8	6,1
53	σ ,кПа.	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2
	γ	6,8	9,4	7,6	10,2	3,4	6,8
54	σ ,кПа.	0,4	0,2	0,2	0,4	0,4	0,4
	γ	1	2	4	2	4	3
55	σ ,кПа.	0,6	0,3	0,3	0,6	0,6	0,3
	γ	2,3	4,6	6,9	4,6	6,9	13,8
56	σ ,кПа.	0,3	0,6	0,6	0,3	1,2	0,6
	γ	6,8	3,4	6,8	8,7	3,1	10,2
57	σ ,кПа.	0,2	0,4	0,6	0,8	0,6	0,8
	γ	0,6	0,3	0,3	0,3	0,6	0,6
58	σ ,кПа.	0,6	0,3	0,3	0,6	0,8	0,9
	γ	3,4	6,8	10,2	6,8	3,4	3,4

Задачи №58– 67. Для теста с различным содержанием влаги ($W, \%$) получены следующие данные изменения напряжения (σ , кПа) от времени (t). Определите время релаксации напряжения (λ), считая, что в данном случае напряжения релаксируют также как в механической модели Максвелла.

Таблица 11

Задача №	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67
$W, \%$	25	30	35	40	45	50	55	60	63	65
$t, \text{мин}$	$\sigma, \text{кПа}$	$\sigma, \text{кПа}$	$\sigma, \text{кПа}$	$\sigma, \text{кПа}$	$\sigma, \text{кПа}$	$\sigma, \text{кПа}$	$\sigma, \text{кПа}$	$\sigma, \text{кПа}$	$\sigma, \text{кПа}$	$\sigma, \text{кПа}$
10	8782,5 24	7713,3 73	6878,0 04	6240,3 83	5310,7 87	5030,0 41	4724,97	4369,45	4040,1 84	3686,1 52
20	6292,9 54	5170,4 28	4365,72	3686,6 78	2726,6 49	2462,4 14	2189,41	1898,9 55	1627,7 51	1356,0 6
30	4509,0 98	3465,8 42	2771,0 81	2178,0 06	1399,908	1205,4 55	1014,5 05	825,28 26	655,8 052	498,86 64
40	3230,91	2323,2 23	1758,9 06	1286,7 17	718,7368	590,1 202	470,0 908	358,6 663	264,2 176	183,5 227
50	2315,0 48	1557,3 03	1116,4 42	760,1636	369,0 118	288,8 884	217,82 57	155,8 757	106,4 507	67,51 423

60	1658,8 05	1043,8 91	708,6 463	449,0 876	189,4 57	141,4 229	100,9 337	67,74 332	42,88 795	24,83 71
70	1188,5 85	699,7 414	449,8 036	265,3 108	97,2 7045	69,2 3241	46,76 96	29,44 113	17,27 914	9,137 057
80	851,6 587	469,0 507	285,5 067	156,7 397	49,9 403	33,8 9215	21,67 16	12,79 506	6,961 599	3,361 336
90	610,2 401	314,4 141	181,2 215	92,5 9827	25,6 4021	16,5 9162	10,04 196	5,56 071	2,80 4761	1,236 566
100	437,2 561	210,7 581	115,0279	54,7 0498	13,1 6412	8,1 22288	4,65 3135	2,41 6675	1,13 0011	0,45 4907
110	313,3 077	141,2 754	73,0 1239	32,3 1847	6,7 58687	3,97 6198	2,15 612	1,05 0283	0,45 527	0,167 351
120	224,4 948	94,6 997	46,3 4363	19,0 93	3,4 70025	1,94 6515	0,99 908	0,45 6451	0,18 3424	0,061 565
140	115,2 595	42,5 5132	18,6 714	6,6 63811	0,9 14689	0,466 484	0,214 514	0,08 621	0,02 9774	0,008 332

Список рекомендуемой литературы

1. Мусина, О. Н. Реология [Электронный ресурс]: учебное пособие / О. Н. Мусина. - М.; Берлин: Директ-Медиа, 2015. - 146 с.: - ISBN 978-5-4475-4615-1- Режим доступа: <http://biblioclub.ru/>
2. Авроров В. А. Основы реологии пищевых продуктов: [Текст]: учебное пособие / Валерий Александрович Авроров, Николай Дмитриевич Туттов. - Старый Оскол: ТНТ, 2014. - 268 с.
3. Арет, В. А. Реологические основы расчета оборудования производства жиросодержащих пищевых продуктов [Электронный ресурс]: учебное пособие / В. А. Арет, Б. Л. Николаев, Л. К. Николаев. - СПб.: ИЦ "Интермедия", 2012. - 536 с.: - ISBN 978-5-4383-0011-3 - Режим доступа: <http://biblioclub.ru/>
4. Кузнецов О. А., Волошин Е. В., Сагитов Р. Ф. Реология пищевых масс [Электронный ресурс]: учебное пособие. - Оренбург: ГОУ ОГУ, 2005. - 106 с. - Режим доступа: <http://window.edu.ru/>
5. Косой В. Д. Инженерная реология биотехнологических сред [Текст]: учебное пособие / В. Д. Косой, Я. И. Виноградов, А. Д. Малышев. - СПб.: ГИОРД, 2005. - 648 с.
6. Реометрия пищевого сырья и продуктов [Текст]: справочник / Под ред. Ю. А. Мачихина. - М.: ВО Агропромиздат, 1990. - 269 с.

Практическое занятие №15 Напряжение сдвига пищевых материалов. Расчет уравнений, описывающих кривые течения.

Цель занятия: изучить принципы работы ротационных вискозиметров, порядок расчета напряжения сдвига; построить кривые течения, оценить, как напряжение сдвига зависит от скорости деформации, определить к какой модели относится среда и подобрать уравнение, описывающее ее поведение.

Материальное обеспечение работы. Калькулятор, транспор- тир, миллиметровая бумага.

Теоретическая часть

Ротационные вискозиметры служат для контроля качества исходного сырья, полуфабрикатов и готового продукта, а также для контроля технологических процессов.

Идея ротационных вискозиметров заключается в том, что мере сопротивления сдвиговому течению можно определить, измеряя крутящий момент и угловую скорость при относительном вращении,

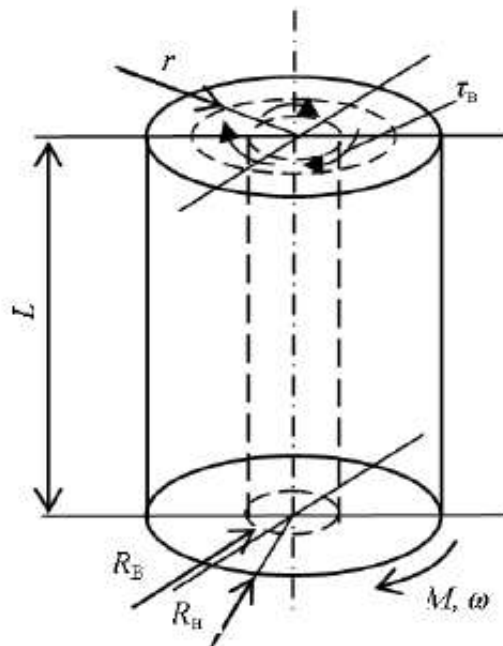


Рис. 1. Схема течения в ротационном вискозиметре коаксиальными

например,

цилиндрами

коаксиальных

(соосных) цилиндров, в зазоре между которыми находится вязкая жидкость.

Схема ротационного вискозиметра с коаксиальными цилиндрами изображена на рис. 1, где для определенности внутренний цилиндр неподвижен, а наружный вращается с угловой скоростью ω . В вискозиметрах с вращающимися цилиндрами, в особенности при малом зазоре между ними, характер течения продукта близок к простому сдвигу, что упрощает обработку опытных данных. Диапазон материалов, свойства которых контролируются на ротационных вискозиметрах, достаточно широк: сиропы, молоко, молочные консервы, творожные массы, бражки, кремы, шоколад и конфетные массы при повышенной температуре, фарши и др.

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

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

где R_B – радиус внутреннего цилиндра, м;

R_H – радиус внешнего цилиндра, м;

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

ω – угловая скорость наружного цилиндра, рад^{-1} ;

L – высота слоя между цилиндрами, м.

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

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

где α – геометрический симплекс.

$$\alpha = \frac{R_B}{R_H}. \quad (3)$$

Между формулами (1 и 2) существует следующая связь:

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}. \quad (4)$$

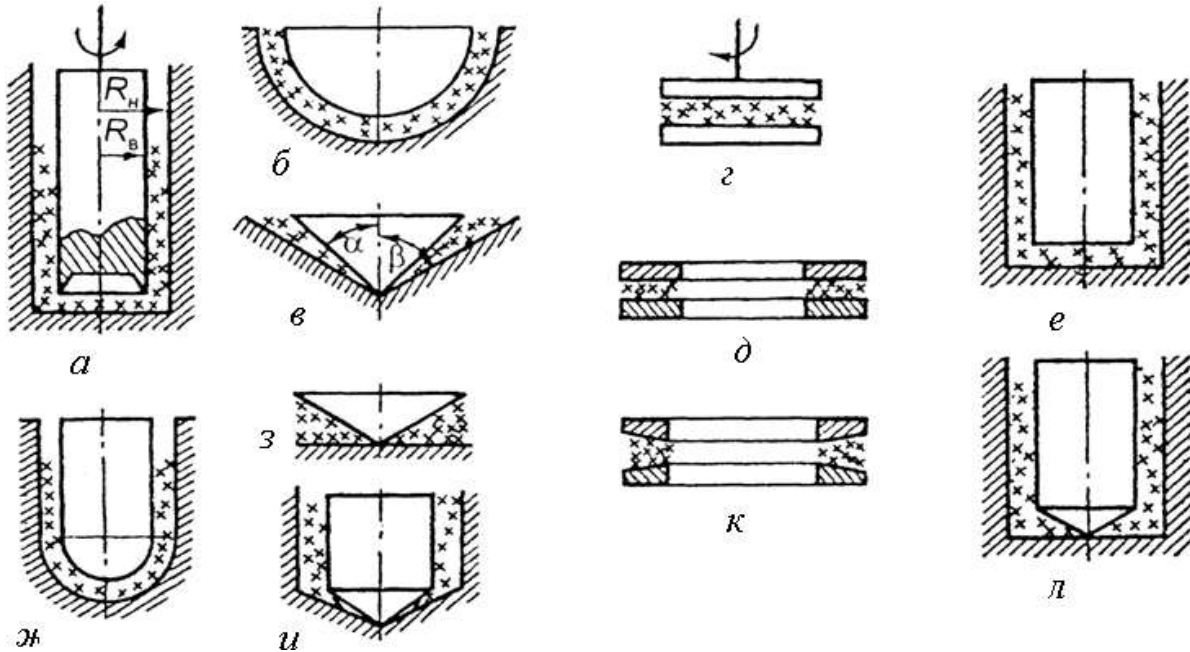


Рис. 2. Схемы измерительных поверхностей ротационных вискозиметров: а) коаксиальные цилиндры; б) две полусферы; в) два конуса; г) две плоскопараллельные пластины; д) два плоских кольца; е) цилиндр – диск; ж) цилиндр – полусфера; з) конус – диск; и) цилиндр – конус; л) цилиндр – конус – диск

По форме измерительных поверхностей различают ротационные приборы с системами (рис. 2): коаксиальные цилиндры, сферы или полусферы; два конуса, две плоскопараллельные пластины, два плоских кольца или два конических кольца; цилиндр – диск; цилиндр – полусфера; конус – диск; цилиндр – конус; цилиндр – конус – диск.

Форма воспринимающего органа (ротора) зависит от вида исследуемого материала (ньютоновской или неньютоновской) и диапазона измеряемых значений вязкости.

Известны два основных варианта прибора с коаксиальными цилиндрами. Первый из них заключается в следующем: подвижный цилиндр (ротор) приводится во вращение под действием постоян-

ного крутящего момента ($M = \text{const}$). Замеряется угловая скорость цилиндра ω , зависящая от вязкости жидкости (вискозиметр РВ-8).

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

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

- а) метод постоянства крутящего момента $M = \text{const}$ (рис. 3);
- б) метод постоянства скорости деформации $\gamma = \text{const}$ (рис. 4).

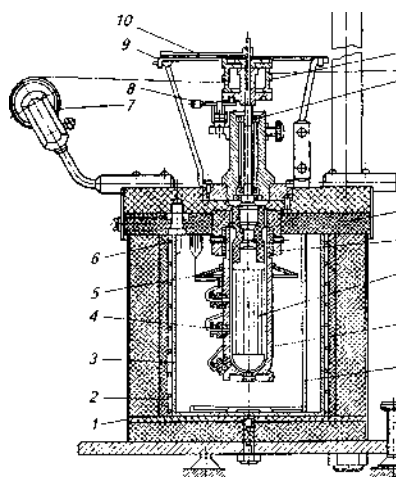


Рис. 3. Ротационный вискозиметр РВ-8 системы Воларовича: 1 – корпус со станиной; 2 – асбестовый сосуд; 3 – сосуд для термостатирующей жидкости; 4 – термopара; 5 – отражательное кольцо; 6 – нагревательный элемент; 7 – шкив; 8 – тормозное приспособление; 9 – шкала; 10 – стрелка; 11 – барабан; 12 – подшипник;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

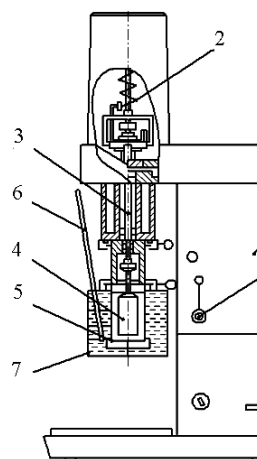


Рис. 4. Измерительный блок ротационного вискозиметра «Reotest-2»: 1 – станина; 2 – динамометр; 3 – приводной вал; 4 – измерительный цилиндр (внутренний); 5 – измерительная емкость (наружный цилиндр); 6 – термометр; 7 – термостатирующая емкость; 8 – рычаг переключения коробки передач

К основным недостаткам вискозиметров первой группы можно отнести недостаточную точность измерений реологических

свойств за счет неточности фиксации частоты вращения ротора и определения высоты соприкосновения продукта с ротором вискозиметра. Работа на этих вискозиметрах трудоемка и требует большого внимания от работника.

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

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

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

В области неразрушенной структуры определяют модули упругости, наибольшую вязкость и характер развития деформаций. Измерения начинают после тиксотропного восстановления структуры. Величины деформаций отсчитывают по показаниям прибора. Опыт проводят при усилиях, меньших, чем предельное напряжение сдвига, с интервалом записи деформаций 10–20 с.

При переходе к области лавинного разрушения структуры по кривой течения определяют статическое τ_c и динамическое θ_0 предельное напряжения сдвига, пластическую вязкость $\eta_{\text{пл}}$ и зависимость эффективной вязкости $\eta_{\text{эф}}$ от градиента скорости $\dot{\gamma}$ или напряжения сдвига τ .

Обсчет результатов проводят по равновесной кривой течения, проходящей через все точки. Вращение ротора вызывает появление внутренних напряжений в продукте, который находится между ротором и стаканом. Эти касательные напряжения пропорциональны сдвигающим усилиям, поэтому графическую и математическую об-

работку опытов можно проводить в консистентных переменных (τ), или пользуясь первичными зависимостями, полученными непосредственно из опыта.

Наиболее распространенным ротационным вискозиметром, работающим с использованием метода $\dot{\gamma} = \text{const}$, является вискозиметр «Reotest» (Германия) и его модификации. Помимо основного набора цилиндрических измерительных элементов, этот прибор снабжен устройством типа конус–плоскость, предназначенным для измерения вязкости при повышенных скоростях сдвига для средне- и высоковязких продуктов. Угол между плоскостью и образующей конуса составляет $0,3^\circ$. Прибор позволяет измерять скорость сдвига $\dot{\gamma}$ от $0,56$ до 4860 с^{-1} , напряжение сдвига τ – от 40 до $2,2 \cdot 10^5$ Па. Величина измеряемой вязкости η находится в пределах от 8 до $40 \cdot 10^7$ МПа·с. Вискозиметр «Reotest-2» представлен на рис. 4. Внутри станины 1 прибора установлен синхронный электродвигатель, соединенный с 12-ступенчатой коробкой передач, которая позволяет изменять частоту вращения внутреннего цилиндра 4 от 0 до 1500 с^{-1} . Крутящий момент от коробки передач передается ведущему валу и далее через спиральную пружину 2 – ведомому валу 3, соединенному с внутренним цилиндром 4 муфтой. Наружный цилиндр 5 крепится к корпусу вискозиметра специальным зажимом. В приборе имеется термостатирующий сосуд. Величина крутящего момента отсчитывается по шкале прибора, а скорость сдвига – по указателю 8. Измеритель моментов торсионного типа с омическими датчиками работает на принципе превращения механических усилий в электрические импульсы. Показания прибора 8 прямо пропорциональны крутящему моменту, а также напряжению сдвига и вязкости исследуемого материала. Скорость вращения синхронного электродвигателя и, следовательно, внутреннего цилиндра 4, зависит от частоты тока в сети. Отклонения от нормальной частоты 50 Гц фиксируются и учитываются специальным расчетным коэффициентом.

Величины реологических характеристик, получаемых с помощью ротационных вискозиметров, могут иметь значительные колебания из-за неправильного выбора зазора между измерительными цилиндрами. Для получения более точных результатов измерений

рабочий зазор между измерительными цилиндрами должен быть минимальным, с учетом дисперсности измеряемого продукта. В этом случае поле скоростей деформаций и напряжений должно приближаться к однородному. Однако с уменьшением зазора между измерительными поверхностями до определенного предела (более двух максимальных частиц дисперсной фазы продукта), трудно заполнить узкий рабочий зазор вискозиметра.

Порядок работы на ротационном вискозиметре «Rheotest–2».

Перед началом опыта порцию исследуемой массы помещают в наружный цилиндр 5 (при этом внутренний цилиндр 4 уже должен быть закреплен на ведущем валу 3) и устанавливают его в рабочее положение коаксиально цилиндру 4. При этом происходит заполнение исследуемой массой кольцевого зазора. После установки цилиндров при необходимости проводят термостатирование материала и коаксиальных цилиндров, для чего в конструкции прибора предусмотрен ультратермостат, сосуд которого надевается поверх наружного цилиндра и крепится при помощи специального замка. Термостатирование необходимо проводить не менее 20 мин., что позволяет равномерно прогреть не только исследуемый материал, но и рабочие цилиндры 4 и 5.

После выполнения приведенных выше операций начинают снимать показания, для чего устанавливают рукоятку переключения скоростей на первую скорость, выбирают жесткость измерительной пружины, переведя переключатель на отметку I или II (начинают обычно с I диапазона). После включения прибора внутренний цилиндр начинает вращение.

Вращение на данной скорости проводят до стабилизации положения показаний вторичного прибора, измеряющего угол α относительного поворота цилиндров 4 и 5. Показания прибора записывают в табл. 1. Включают последовательно следующие скорости сдвига (их 12) и получают соответствующие данные, которые также записывают в табл. 1.

После измерений выключают привод, снимают с прибора термостатирующий сосуд, а затем цилиндры. Рабочие цилиндры тщательно моют, сушат, а их поверхности обезжиривают.

Таблица 1. Экспериментальные данные

Исследуемый продукт	Измерительный цилиндр	Степень скорости	Постоянная цилиндра, Z	Градиент скорости деформации, γ	Показания измерительного прибора, a	Напряжение сдвига, τ

По показателям измерений вычисляются реологические характеристики. Напряжение сдвига τ_0 и градиент скорости деформации γ пересчитываются на радиус внутреннего цилиндра.

$$\tau = Z \cdot a, \quad (5)$$

где τ – напряжение сдвига, Па;

Z – постоянная цилиндра, Па / дел.;

a – показание измерительного прибора.

Постоянная цилиндра Z , зависящая от размеров системы цилиндров и постоянной пружины динамометра, указана для каждого измерительного устройства отдельно в пределах напряжения сдвига областей I и II дана в табл. 2.

Градиент скорости деформации γ (с^{-1}) показывает изменение скорости в кольцевой щели. Она зависит от размеров системы цилиндров, а также пропорциональна частоте вращения (числу оборотов) вращающегося цилиндра. Градиент скорости деформации для всех ступеней числа оборотов и измерительных устройств указан в табл. 2.

Таблица 2. Константы вискозиметра «Rheotest-2»

Измерительный цилиндр	Соотношение радиусов цилиндров	Константы цилиндров, Па на ед. шкалы		Пределы измерения градиента скорости
		диапазон I	диапазон II	
N / NI	0,99	0,338	3,44	1,5 – 1310
S / SI	0,98	0,586	5,88	1,5 – 1310
$S / S2$	0,94	0,616	6,15	0,5 – 437
$S / S3$	0,81	0,816	8,25	1/6 – 146
H / H	0,81	3,07	29,29	1/6 – 146

Практическая часть

Возможные кривые течения пищевых материалов показаны на рис. 5. Кривые течения (реограммы) *ньютоновских жидкостей* представляют собой прямую линию 1, проходящую через начало координат. Для таких жидкостей применимо реологическое уравнение *Ньютона* (см. пример выполнения задания).

Все кривые течения (2–5), которые отклоняются от прямой линии, называют *неньютоновскими (аномально-вязкими)* жидкостями, т. е. у таких пищевых материалов вязкость изменяется от скорости деформирования. Такие жидкости описываются реологическим уравнением *Оствальда-де-Вилля*

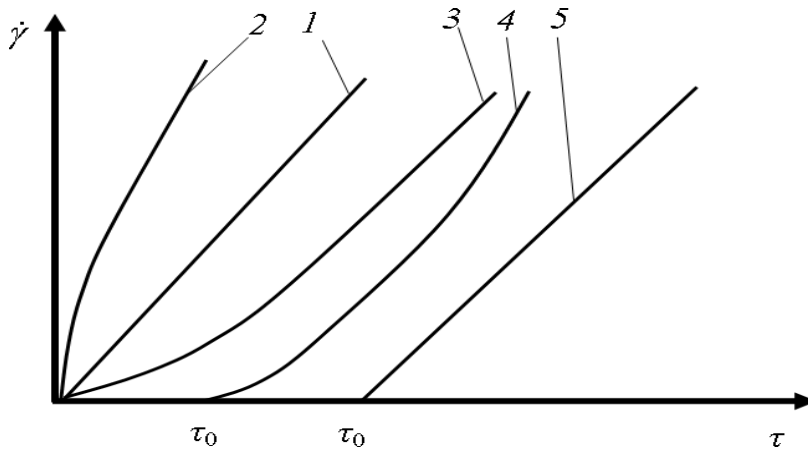


Рис. 5. Кривые течения: 1 – ньютоновской жидкости; 2 – дилатантной жидкости; 3 – структурно-вязкая жидкость; 4 – нелинейного пластичного тела; 5 – линейного пластичного тела

Кривая 2 характеризует *дилатантное течение*, характерное в основном для концентрированных дисперсных систем, при котором с увеличением скорости деформации наступает «затруднение сдвига», т. е. происходит повышение вязкости.

Кривая 3 описывает *псевдопластическое течение*, что характерно для «сдвигового размягчения» вследствие разрушения структуры с увеличением скорости деформации;

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

$$\tau = \tau_0 + B_0^* \dot{\gamma}^n. \quad (6)$$

где A_0^* – коэффициент, пропорциональный вязкости при градиенте скорости, равном единице, Па·сⁿ;
n – индекс течения.

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

$$\tau = \tau_0 + \eta_{пл} \dot{\gamma} \quad (7)$$

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

Задание 1. Изучить и законспектировать теоретическую часть работы.

Задание 2. Получить вариант задания с данными (табл. 3) и построить в масштабе кривые течения в координатах напряжение сдвига – градиент скорости деформации ($\tau - \dot{\gamma}$) для структурированных жидкостей.

Задание 3. Определить к какому типу (модели) относится изучаемая среда (ньютоновская, Бингама, Оствальда-де-Виле и т. д.).

Задание 4. Подобрать подходящее уравнение, описывающее ее поведение.

Таблица 3. Варианты с данными, полученными на ротационном вискозиметре

Вариант	Напряжения сдвига τ , Па, при скоростях сдвига $\dot{\gamma}$, с ⁻¹											
	1,0	1,8	3,0	5,4	9,0	16,2	27,0	48,6	81,0	145,7	243,0	437,4
1	29,0	30,0	31,0	32,0	33,0	35,0	39,0	43,0	47,0	55,0	65,0	80,0
	4,0	6,0	7,0	9,0	12,0	15,0	20,0	23,0	32,0	42,0	49,0	66,0
2	18,0	19,0	20,0	22,0	23,0	24,0	25,0	26,0	28,0	31,0	36,0	47,0
	1,0	3,0	4,0	8,0	11,0	23,0	38,0	77,0	120,0	210,0	350,0	670,0
3	4,4	4,6	5,0	5,2	5,7	7,0	9,0	12,0	19,0	29,0	44,0	79,0
	12,0	15,0	16,0	19,0	20,0	23,0	28,0	31,0	32,0	34,0	37,0	45,0
4	1,0	1,0	2,0	2,0	3,0	6,0	15,0	29,0	70,0	150,0	350,0	820,0
	5,0	7,0	9,0	11,0	15,0	21,0	28,0	37,0	45,0	60,0	81,0	104,0
5	8,5	8,7	8,9	9,1	9,3	9,8	11,0	13,0	16,0	21,0	32,0	49,0
	15,0	19,0	21,0	26,0	29,0	36,0	42,0	50,0	55,0	67,0	79,0	95,0
6	2,9	3,0	3,1	3,1	3,2	3,3	3,4	3,6	4,8	9,3	19,0	55,0
	2,0	5,0	7,0	12,0	20,0	38,0	60,0	110,0	200,0	340,0	540,0	990,0
7	1,0	1,0	2,0	2,0	3,0	5,0	12,0	31,0	70,0	180,0	380,0	1000
	12,0	17,0	23,0	39,0	50,0	78,0	100,0	160,0	200,0	300,0	450,0	640,0
8	24,0	30,0	35,0	43,0	52,0	59,0	72,0	87,0	100,0	110,0	130,0	180,0
	3,3	3,4	3,4	3,5	3,5	3,6	3,8	4,1	4,5	5,5	7,1	9,7
9	8,8	8,9	9,0	9,0	9,2	9,5	9,7	12,0	15,0	23,0	43,0	97,0
	0,0	1,0	1,0	2,0	2,0	5,0	11,0	32,0	70,0	160,0	390,0	950,0
10	3,3	3,3	3,4	3,4	3,5	3,6	4,1	5,3	8,5	17,0	38,0	96,0
	5,0	6,0	8,0	11,0	13,0	18,0	24,0	29,0	31,0	37,0	45,0	61,0
11	20,3	21	21,7	22,4	23,1	24,5	27,3	30,1	32,9	38,5	45,5	56

2.

Вариант	Напряжения свига τ , Па, при скоростях свига $\dot{\gamma}$, с ⁻¹												
	1,0	1,8	3,0	5,4	9,0	16,2	27,0	48,6	81,0	145,7	243,0	437,4	
12	2,8	4,2	4,9	6,3	8,4	10,5	14	16,1	22,4	29,4	34,3	46,2	
	12,6	13,3	14	15,4	16,1	16,8	17,5	18,2	19,6	21,7	25,2	32,9	
13	0,7	2,1	2,8	5,6	7,7	16,1	26,6	53,9	84	147	245	469	
	3,08	3,22	3,5	3,64	3,99	4,9	6,3	8,4	13,3	20,3	30,8	55,3	
14	8,4	10,5	11,2	13,3	14	16,1	19,6	21,7	22,4	23,8	25,9	31,5	
	0,7	0,7	1,4	1,4	2,1	4,2	10,5	20,3	49	105	245	574	
15	3,5	4,9	6,3	7,7	10,5	14,7	19,6	25,9	31,5	42	56,7	72,8	
	5,95	6,09	6,23	6,37	6,51	6,86	7,7	9,1	11,2	14,7	22,4	34,3	
16	10,5	13,3	14,7	18,2	20,3	25,2	29,4	35	38,5	46,9	55,3	66,5	
	2,03	2,1	2,17	2,17	2,24	2,31	2,38	2,52	3,36	6,51	13,3	38,5	
17	1,4	3,5	4,9	8,4	14	26,6	42	77	140	238	378	693	
	0,7	0,7	1,4	1,4	2,1	3,5	8,4	21,7	49	126	266	700	
18	8,4	11,9	16,1	27,3	35	54,6	70	112	140	210	315	448	
	16,8	21	24,5	30,1	36,4	41,3	50,4	60,9	70	77	91	126	
19	2,31	2,38	2,38	2,45	2,45	2,52	2,66	2,87	3,15	3,85	4,97	6,79	
	14,21	14,7	15,19	15,68	16,17	17,15	19,11	21,07	23,03	26,95	31,85	39,2	
20	1,96	2,94	3,43	4,41	5,88	7,35	9,8	11,27	15,68	20,58	24,01	32,34	
	8,82	9,31	9,8	10,78	11,27	11,76	12,25	12,74	13,72	15,19	17,64	23,03	
	0,49	1,47	1,96	3,92	5,39	11,27	18,62	37,73	58,8	102,9	171,5	328,3	

Строим координатную сетку в координатах напряжение сдвига – градиент скорости деформации ($\tau - \dot{\gamma}$) и наносим экспериментальные точки как представлено в примере на рис. 6. Затем аппроксимируем полученные ряды точек в две кривые течения как показано на рис. 6.

Из курса математики известны три способа задания функциональных зависимостей: аналитический (уравнение кривой), табличный (таблица с данными) и графический. На практике часто приходится сталкиваться с задачей *сглаживания* экспериментальных данных – задачей аппроксимации. Основная задача аппроксимации – построение приближенной (аппроксимирующей) функции наиболее близко проходящей около данных точек. Аппроксимация – процесс подбора эмпирической функции $\varphi(x)$ для установления из опыта функциональной зависимости $y = \varphi(x)$.

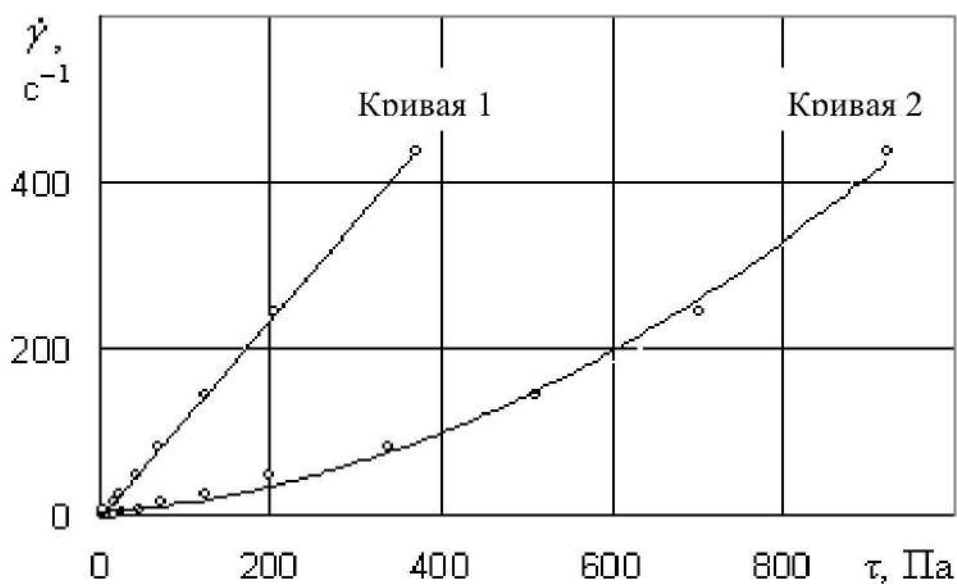


Рис. 6. Пример построения кривых течения

3. После построения кривых течения определяем к какому типу (модели) относится данная среда (см. рис. 5).

4. Находим уравнения, которыми описываются исследуемые среды и записываем их в общем виде.

Для рассмотренного примера (рис. 6) можно заключить, что кривая течения 1 является практически прямой линией проходящей через начало координат. В таком случае течение данного материала может быть описано уравнением Ньютона:

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma}, \quad (8)$$

где η – динамическая (ньютоновская) вязкость, $\text{Па}\cdot\text{с}$.

Из характеристики кривой течения 2 видно, что течение жидкости можно описать степенным уравнением Оствальда-де-Виле для аномально-вязких жидкостей:

$$\tau = m \cdot \gamma^n, \quad (9)$$

где m – консистентная переменная, $\text{Па}\cdot\text{с}$;
 n – индекс течения.

Далее необходимо определить коэффициенты реологических уравнений, которыми описывается течение заданных сред.

В уравнении 8 необходимо определить коэффициент динамической вязкости η , для чего нужно замерить угол наклона кривой к оси абсцисс. Тангенс полученного угла наклона будет равен значению коэффициента динамической вязкости η .

Пусть, например, получен угол наклона кривой к оси абсцисс 48° . Находит тангенс этого угла с помощью калькулятора и получаем ответ 1,1.

Для получения коэффициентов уравнения 9, необходимо прологарифмировать исходные данные рис. 6 (кривая 2) с помощью калькулятора. Получим табл. 3.

Таблица 3. Прологарифмированные данные для построения кривой 2

$\frac{\tau}{\text{с}^{-1}}$	0,4	0,5	0,7	0,8	0,7	1,2	1,4	1,6	1,8	2,1	2,3	2,6
$\frac{\tau}{\text{Па}}$	0,8	1,0	1,2	1,4	1,7	1,9	2,1	2,3	2,5	2,7	2,8	2,9

По результатам логарифмирования строим логарифмическую кривую течения в координатах $\lg \tau - \lg \gamma$ (рис. 7).

В результате логарифмирования получаем прямую линию, которая пересекается с осью ординат (значение коэффициента m). Значение коэффициента n находится как тангенс угла наклона к оси абсцисс.

Например, тангенс угла в 42° равен 0,9.

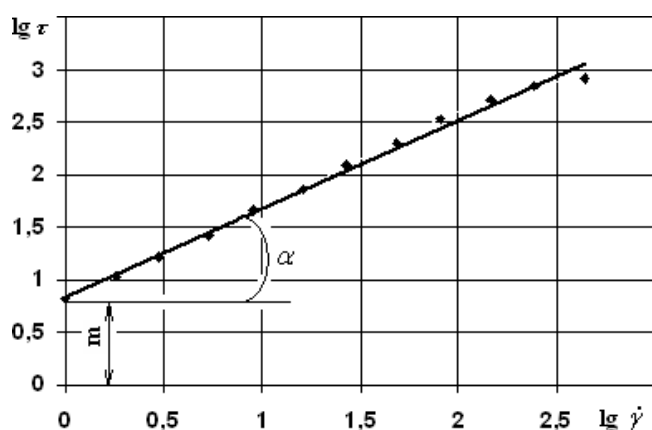


Рис. 7. Логарифмическая кривая течения

После определения всех коэффициентов записываем уравнения, которыми описывается течение исследуемых сред, используя найденные коэффициенты: для кривой 1 $\tau = 1,1 \cdot \gamma$; для кривой 2 $\tau = 0,8 \cdot \gamma^{0,9}$

Ответ. Для кривой 1: $\tau = 1,1 \cdot \gamma$; для кривой 2: $\tau = 0,8 \cdot \gamma^{0,9}$

2. Вопросы и задания для самоконтроля

1. Назовите возможные области применения ротационных вискозиметров. Приведите конкретные примеры.
2. В чем заключается принцип работы ротационных вискозиметров? Какие цилиндры называют коаксиальными?
3. Схематично нарисуйте схему течения испытуемого материала в ротационном вискозиметре. Каков характер течения продукта в таких вискозиметрах? Что это дает?
4. Как рассчитать коэффициент динамической вязкости? Как изменится эта формула при постоянном крутящем моменте, приложенном в внешнему цилиндру вискозиметра?
5. Схематично нарисуйте и опишите как различаются ротационные вискозиметры по форме измерительных поверхностей. От чего зависит форма ротора?
6. Опишите известные варианты вискозиметров с коаксиальными цилиндрами. Какие методы исследований при этом реализуются. Возможно ли сочетание методов? При каких условиях?

7. Достоинства и недостатки ротационных вискозиметров с постоянным крутящим моментом и постоянной скоростью деформации.
8. Устройство и принцип действия ротационного вискозиметра системы Воларовича.
9. Устройство и принцип действия ротационного вискозиметра «Reotest-2».
10. Методика расчета реологических характеристик в области неразрушенной структуры продукта.
11. Методика расчета реологических характеристик в области лавинного разрушения структуры продукта.
12. От чего зависит точность измерений с помощью ротационного вискозиметра и как ее повысить?
13. Порядок выполнения измерений с помощью ротационного вискозиметра «Reotest-2».
14. Как рассчитать напряжение сдвига?
15. Что показывает градиент скорости деформации и от чего он зависит?

Практическое занятие №16. Поверхностные свойства пищевых продуктов. Оценка адгезии и внешнего трения сухих молочных продуктов.

Цель занятия: изучить специфику оценки поверхностных свойств пищевых продуктов на примере адгезии и внешнего трения сухого молока. Ознакомиться с устройством приборов для измерения адгезионной прочности, а также методами измерения внешнего трения.

Материальное обеспечение работы . Калькулятор, программное обеспечение – MS Excel (при отсутствии – миллиметровая бумага, транспортир)

Теоретическая часть

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

Качественно **адгезию** можно охарактеризовать двумя способами: нарушением контакта одновременно на всех участках площади (рис. 1 а, г, д) или путем последовательного отрыва отдельных участков – расслаиванием, отдираанием (рис. 1 б, в), оба способа нашли практическое применение. При первом методе разрушающую нагрузку прилагают в направлении как перпендикулярном к плоскости контакта, так и параллельном ей и обычно относят к площади поверхности контакта. При втором методе определяют силу, необходимую для расслаивания склейки, ее относят к единице длины.

Наиболее часто в адгезиометрах для пищевых продуктов реализуется схема по рис. 1, а. Она может отличаться способами приложения силы и регистрации отрывающего усилия.

Например, в *приборе Николаева* «мгновенно» отрывается верхний диск с помощью рычажного механизма; в *приборе Кульмана* постепенно отрывается нижний диск при наполнении подвешенной к нему емкости водой. Разделение контактирующих тел может про-

исходить по трем вариантам: адгезионное – по границе раздела продукт-стенка, когезионное – по слою продукта, и смешанное.

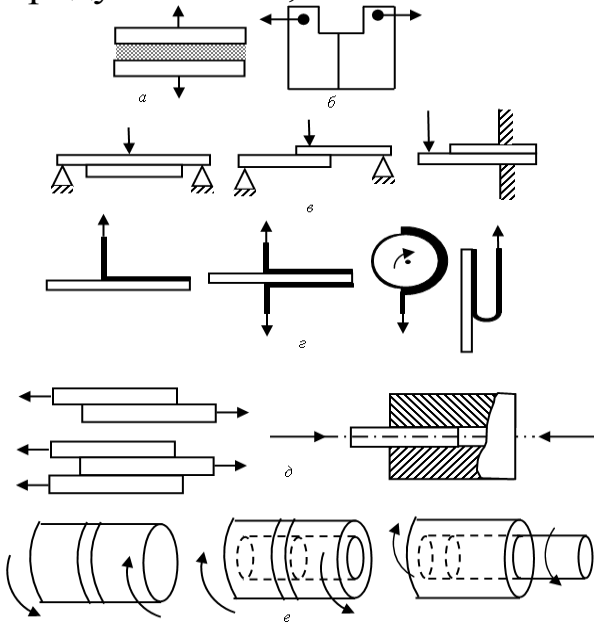


Рис. 1. Принципиальные схемы приборов для измерения адгезионной прочности: *a* – равномерный отрыв; *б* – внецентренное растяжение; *в* – изгиб листовых материалов; *г* – способы расслаивания материалов; *д* – способы сдвигового разрушения; *е* – способы сдвигового разрушения при кручении

Приборы для измерения адгезии должны удовлетворять следующим **требованиям**:

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

Классический тип прибора для измерения силы **внешнего трения** представляет собой пару тел, соприкасающихся плоскими поверхностями, площадь которых может быть от долей квадратных миллиметров до десятков квадратных миллиметров. При этом одно из тел смещается относительно другого. Сила смещения (трения)

измеряется тензометрическими, динамометрическими или какими-либо другими датчиками.

К *первой* группе **методов** определения коэффициента трения относятся такие, в которых одна плоскость поступательно перемещается относительно другой плоскости (рис. 2 а, б, в).

По схеме *а* продукт перемещается по движущейся исследуемой поверхности, при этом сила трения измеряется динамометром любого типа. Таким, наиболее распространенным методом, определяют трение твердообразных продуктов: сухарей, хлеба, зерна и т.

П

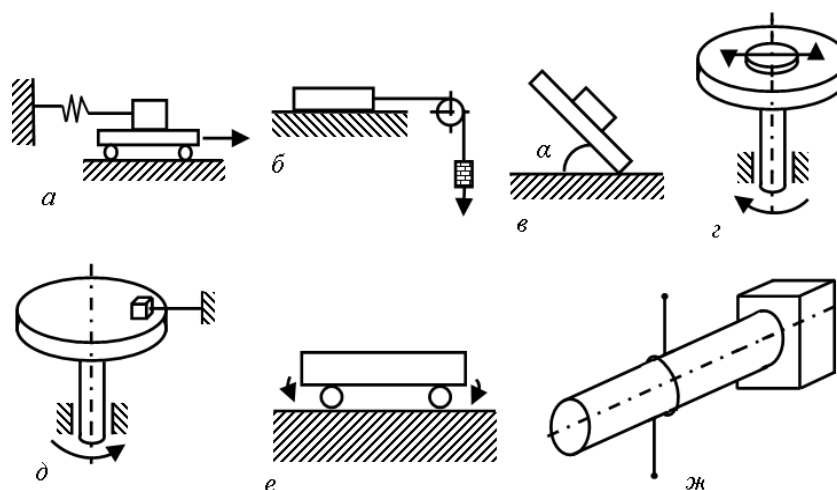


Рис. 2. Методы измерения внешнего трения

По схеме *б* продукт перемещается с помощью груза по исследуемой неподвижной поверхности. Сила трения в этом случае равна минимальной массе груза, необходимой для равномерного перемещения продукта. Этим методом определяют коэффициент трения таких твердых продуктов, как сыр, кондитерские изделия.

По схеме *в* продукт скользит по наклонной поверхности. Коэффициент трения определяют по минимальному углу наклона α поверхности исследуемого конструкционного материала, по которому скользит пищевой продукт. Такой метод позволил определить статический коэффициент трения сыра, сухарей, сыпучих продуктов. Определение коэффициента трения по углу наклона плоскости, при котором начинается движение продукта по поверхности, недостаточно точно, так как угол наклона плоскости в момент движения

определяют приблизительно, к тому же невозможно установить изменение коэффициента трения с изменением скорости скольжения.

К *второй* группе относятся такие методы, при которых одна из фрикционных пар совершает вращательное движение.

По схеме *г* определяют коэффициент трения кондитерских масс. Продукт лежит на вращающемся диске, исследуемый конструкционный материал скользит по вращающемуся продукту. Сила трения определяется по крутящему моменту, передаваемому от диска образцу.

По схеме *д* продукт, закрепленный на упругой балке, скользит по вращающейся поверхности исследуемого материала. Этим методом определяют коэффициент трения мяса, рыбы, таблеток кофе и чая, сухарных плит, формового хлеба.

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

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

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

На внешнее трение влияют те же **факторы**, что и на адгезию. При первоначальном сдвиге часть усилия расходуется на выход частиц или молекул одного тела из неровностей или молекулярных ям другого, остальное – на разрыв молекулярных и других контактов, которые во время движения не успевают полностью восстанавливаться. Достаточно малая скорость относительного движения трущихся тел может вызывать скачки, т. е. прерывистость движения: тело переходит из одного статического положения в другое, где вновь

образуются контакты с поверхностью скольжения. При больших скоростях скольжения и неизменном состоянии поверхности скольжения подобные эффекты обычно не наблюдаются.

Практическая часть

Сухое молоко *распылительной сушки* имеет круглые частицы размером около 50 мкм. Частицы представляют собой мелкий сухой

порошок или порошок, состоящий из агломерированных частиц сухого молока размером 100–250 мкм.

Молоко *пленочной (контактной) сушки* представляет собой сухой порошок из измельченных пленок. Частицы сухого молока имеют форму угловатых пластинок размером 250–470 мкм или объединены в небольшие агломераты.

Сыпучие пищевые материалы лишь в крайне редких случаях состоят из одинаковых частиц. Большая часть пищевых сыпучих материалов – это дисперсные системы, состоящие из частиц, различающихся по форме и размерам. Частицы неправильной формы характеризуют *эквивалентным диаметром*: $D_{\text{э}}=6/S_y$, где S_y – удельная поверхность частицы, равная отношению поверхности S частицы к ее объему V . Параметр S_y определяют на специальном приборе, принцип его действия основан на измерении сопротивления, которое оказывает слой определенной порции сыпучего материала потоку прокачиваемого через него газа.

Пористость – это отношение объёма порового пространства между частицами к объёму сыпучих пищевых масс. Например, пористость 0,33 означает, что

33 % объёма сухого молока занимает поровое пространство

Адгезия – (лат. *adhaesio* – прилипание, сцепление, притяжение) – связь между разнородными конденсированными телами при их контакте.

Частный случай адгезии – **аутогезия**, проявляющаяся при соприкосновении однородных тел.

При адгезии и аутогезии сохраняется граница раздела фаз между телами, в отличие от *когезии*, определяющей связь внутри тела в пределах одной фазы.

В зависимости от свойств адгезива (прилипшего тела) различают адгезию жидкости и твердых тел (частиц, пленок и структурированных упруговязкопластичных масс). Адгезия зависит от природы контактирующих тел, свойств их поверхностей и площади контакта.

Аутогезия характерна для твердых пленок в многослойных покрытиях и частиц, определяет прочность дисперсных систем и композиционных материалов.

Адгезия твердых тел измеряется величиной внешнего воздействия при отрыве адгезива, адгезия и аутогезия частиц – **силой**.

Совокупность методов определения адгезии называется адгезиометрией, а приборы их реализующие – адгезиометрами. Адгезия может быть измерена при помощи прямых (усилие при нарушении адгезионного контакта), неразрушающих (по изменению параметров ультразвуковых и электромагнитных волн вследствие поглощения, отражения или преломления) и косвенных (характеризующих адгезию в сопоставимых условиях лишь относительно, например отслаиванием пленок после надреза, наклоном поверхности для порошков и др.) методов.

Чтобы заставить сыпучий материал **течь**, необходимо осуществить сдвиг слоя частиц относительно твердой поверхности или другого слоя частиц.

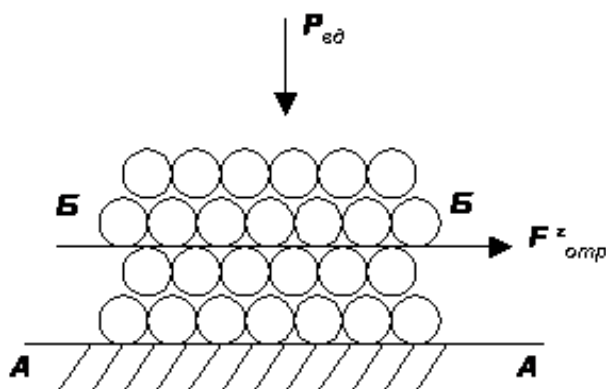


Рис. 3. Прочность на сдвиг:

$F^T_{отр}$ – сопротивление сдвига, $P_{вд}$ – сила внешнего давления (нормальное давление)

Сдвиг произойдет, если приложить внешнее воздействие, равное $F^T_{отр}$. Величина $F^T_{отр}$ называется сопротивлением сдвига и рассчитывается на единицу площади сечения сыпучего материала. Оно направлено тангенциально относительно площади перемещения сыпучего материала. Движение сыпучего материала может быть вызвано внешней силой, направленной тангенциально относительно плоскости перемещения $F^T_{отр}$ (рис. 3).

Задача 1. Дано: Медианный диаметр $d_{ср}$ частиц сухого молока распылительной сушки составляет 40 мкм, сила аутогезии $F_{аут}$ между ними равна $5,5 \cdot 10^{-6}$ Н. После слёживания пористость (Π) сухого молока уменьшилась с 0,46 до 0,2, а сила аутогезии между отдельными частицами возросла в 5 раз.

Найти: силу аутогезии слоя частиц сухого молока в обычных условиях и после слёживания. Определить, во сколько раз увеличилась сила аутогезии в результате слеживания

Решение.

Площадь (м²), приходящаяся на одну частицу сухого молока:

$$B_1 = \frac{\pi d^2}{4} \quad (1)$$

$$B_1 = \frac{3,14 \cdot (40 \cdot 10^{-6})^2}{4} = 1,256 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2$$

Число частиц на 1 м² контакта слоя сухого молока (без слёживания) с учетом пористости:

$$N = \frac{1}{B_1 \Pi} \quad (2)$$

$$N = \frac{1}{0,46 \cdot 1,256 \cdot 10^{-9}} = 1,73 \cdot 10^9 \text{ м}^{-2}$$

Сила аутогезии FN (Па) слоя сухого молока в расчете на 1 м²

$$F_{\text{аут.}}^N = F_{\text{аут.}} \cdot N \quad (3)$$

$$F_{\text{аут.}}^N = 5,5 \cdot 10^{-6} \cdot 1,73 \cdot 10^9 = 9,52 \cdot 10^3 \text{ Н / м}^2 = 9,52 \text{ кПа}$$

Число частиц на 1 м² контакта слоя сухого молока (после слёживания) с учетом пористости по формуле (2):

$$N = \frac{1}{0,2 \cdot 1,256 \cdot 10^{-9}} = 3,98 \cdot 10^9 \text{ м}^{-2}$$

Сила аутогезии (Па) слоя сухого молока с учетом того, что после слеживания сила аутогезии между отдельными частицами по условиям задачи возросла в 5 раз:

$$R = 5 \cdot F_{\text{аум}} \cdot N = 5 \cdot 5,5 \cdot 10^{-6} \cdot 1,73 \cdot 10^9 \cdot 3,98 \cdot 10^9 = \\ 109,47 \cdot 10^3 \text{ Н / м}^2 = 109,47 \text{ кПа}$$

Сила аутогезии слоя сухого молока увеличилась в результате слеживания в n раз:

$$n = \frac{R}{F_{\text{аум}}^N} \quad (4)$$

$$n = \frac{109,47}{9,52} = 11,49 \approx 11,5 \text{ раз.}$$

Задача 2. Дано: Зависимость (представленная в виде таблицы экспериментальных данных) между сопротивлением сдвига $F_{\text{отр}}^T$ и нормальным давлением $P_{\text{вд}}$ при движении сухого молока по отношению к поверхности из известного материала.

Найти: Параметры течения сухого молока. Сделать вывод о характере его течения

Решение.

Экспериментальные данные представляют, как показано на рис. 4.

Когда движение сыпучей массы происходит по поверхности, т. е. осуществляется адгезионное движение, его можно представить следующим образом:

$$F_{\text{отр}}^T = \mu \cdot (F_{\text{ад}}^N + P_{\text{вд}}), \quad (5)$$

где μ – коэффициент внешнего трения;

$P_{\text{вд}}$ – нормальное давление;

$F_{\text{ад}}^N$ – сила аутогезии в расчете на 1 м^2 поверхности.

Коэффициент внешнего трения равен тангенсу угла наклона прямой 3 (рис. 4):

$$\operatorname{tg} \alpha = \mu \quad (6)$$

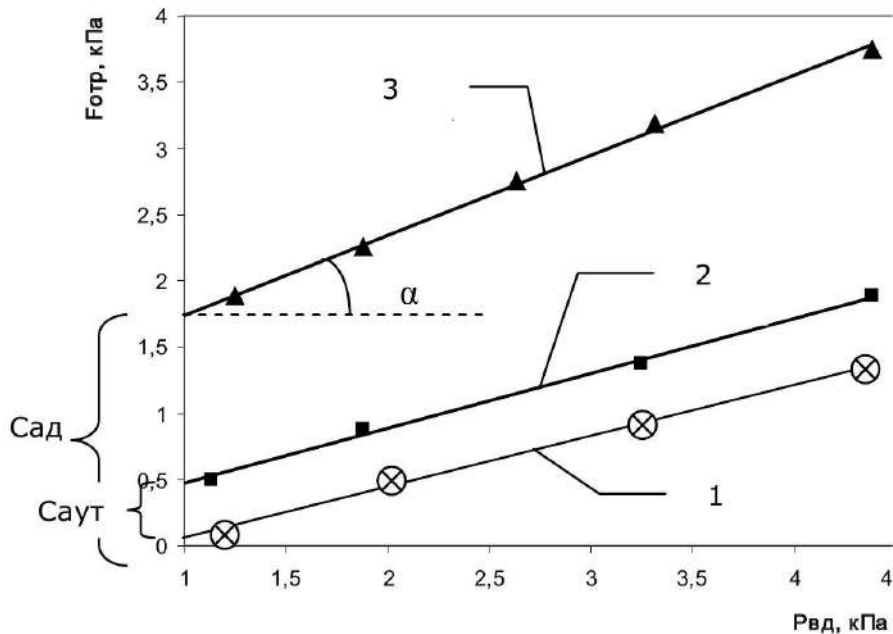


Рис. 4. Зависимость сопротивления сдвига $F^T_{отр.}$ от нормальной нагрузки $P_{вд.}$: 1 – при отсутствии адгезии или аутогезии; 2 – аутогезионный отрыв; 3 – адгезионный отрыв

Отрезок, отсекаемый на оси ординат, равен сцеплению при адгезии:

$$C_{ад} = \mu \cdot F^{N_{ад}} \quad (7)$$

Прямая 2 (рис. 4) отражает *аутогезионное* движение сыпучей массы, которое определяется уравнением:

$$F^T_{отр} = \mu \nu \cdot (F^{N_{аут.}} + P_{вд.}) \quad (8)$$

Отрезок, отсекаемый на оси ординат, в этом случае, равен **сцеплению при аутогезии**:

$$C_{аут.} = \mu \nu \cdot F^{N_{аут.}} \quad (9)$$

По тангенсу угла α определяют коэффициент внешнего трения μ

уравнения (5) и **внутреннего** трения μ_v (8) при движении сыпучей массы.

По известному коэффициенту трения и по величине отрезка, отсекаемого на оси ординат (рис. 4) в соответствии с формулами (7) и (9) определяют величины сцепления, а также рассчитывают $F^{N_{ад}}$, а также $F^{N_{аут}}$, т. е. адгезию и аутогезию в расчете на 1 м^2 поверхности.

Задание 1. Изучить и законспектировать теоретическую часть работы.

Задание 2. Получить вариант задания (табл 1). Определить в обычных условиях соотношение между адгезией и аутогезией слоя сухого молока распылительной сушки, если известен средний диаметр частиц сухого молока ($d_{ср}$), пористость (Π), сила адгезии $F_{ад}$ и аутогезии отдельных частиц $F_{аут}$

Таблица 1

Исходные данные	Номер варианта													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Средний диаметр частиц, ($d_{ср}$) мкм	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110
Пористость, Π	0,23	0,27	0,31	0,34	0,37	0,39	0,41	0,43	0,45	0,47	0,49	0,51	0,53	0,55
Сила адгезии $F_{ад} \times 10^7$, Н	10,7	8,5	8,1	7,7	7,40	7,10	6,82	6,53	6,24	5,95	5,66	5,37	5,08	4,79
Сила аутогезии частиц $F_{аут} \times 10^{-6}$, Н	2,3	3,5	4,7	5,2	5,30	5,40	5,60	5,73	5,88	6,03	6,18	6,33	6,48	6,63

Задание 3. Получить вариант задания у преподавателя (табл. 2). Определить силу аутогезии слоя частиц сухого молока распылительной сушки в обычных условиях и после слёживания, а также рассчитать во сколько раз увеличилась сила аутогезии в результате слеживания, если известен средний диаметр частиц сухого молока

(d_{cp}), сила аутогезии отдельных частиц Фаут, пористость сухого молока до и после слеживания, а сила аутогезии между отдельными частицами сухого молока после слеживания возросла в 6,3 раза.

Исходные данные	Номер варианта													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Средний диаметр частиц, (d_{cp}) мкм	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110
Пористость до слеживания, P_1	0,23	0,27	0,31	0,34	0,37	0,39	0,41	0,43	0,45	0,47	0,49	0,51	0,53	0,55
Пористость после слеживания, P_2	0,10	0,12	0,14	0,15	0,17	0,18	0,19	0,20	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25
Сила аутогезии частиц Фаут $\times 10^{-6}$, Н	2,3	3,5	4,7	5,2	5,30	5,40	5,60	5,73	5,88	6,03	6,18	6,33	6,48	6,63

Задание 4. Получить вариант задания (табл. 3). Определить параметры течения сухого молока и сделать вывод о характере его течения, если известна зависимость между сопротивлением сдвига и нормальным давлением при движении внутри сухого молока по отношению к поверхности.

Таблица 3

Параметры сухого молока	Рвд, кПа	1,25	1,88	2,63	3,31	4,38
	$F_{\tau_{отр}}$, кПа	1,88	2,25	2,75	3,19	3,75
Параметры поверхности из полиэтилена ПВД	Рвд, кПа	1,06	1,88	3,25	4,38	-
	$F_{\tau_{отр}}$, кПа	0,75	1	1,44	1,81	-
Параметры поверхности из токопроводящего полиэтилена ПЭ	Рвд, кПа	1	1,81	2,56	3,25	4,38
	$F_{\tau_{отр}}$, кПа	0,38	0,625	0,94	1,13	1,5

Пример выполнения

Определите параметры течения сыпучего материала и сделайте вывод о характере его течения, если известна зависимость между сопротивлением сдвига и нормальным давлением при движении

внутри сухого молока (1), по отношению к *стальной* поверхности (2):

1	Рк, кПа	1,25	1,88	2,63	3,31	4,38
	F _{тотр.} ,кПа	1,88	2,25	2,75	3,19	3,75
2	Рк, кПа	1,13	1,88	3,25	4,38	-
	F _{тотр.} ,кПа	0,5	0,88	1,38	1,88	-

Решение.

Представим экспериментальные данные в виде графика на рис. 5.

По углу α определяем коэффициент внешнего трения и внутреннего трения при аутогезионном движении сыпучей массы. Для облегчения расчетов используем программу Excel и модуль статистической обработки данных, позволяющий вывести параметры линейного тренда методом наименьших квадратов по точкам экспериментальных зависимостей.

Тогда: коэффициент внутреннего трения $\mu_v = 0,6061$;
коэффициент внешнего трения $\mu = 0,415$.

Величины **сцепления** определяем как отрезок, отсекаемый продолжениями линейных трендов на оси ординат: $S_{аут} = 1,1336$ кПа; $S_{ад} = 0,056$ кПа = 56 Па.

Далее по известному коэффициенту трения рассчитываем $F^{N}_{ад}$, а также $F^{N}_{аут}$, т. е. адгезию и аутогезию в расчете на 1 м² поверхности:

$$F^{N}_{ад} = S_{ад} / \mu = 0,056 / 0,415 = 0,135 \text{ кПа} = 135 \text{ Па(Н/м}^2\text{)}$$

$$F^{N}_{аут} = S_{аут} / \mu_v = 1,134 / 0,606 = 1,871 \text{ кПа (Н/м}^2\text{)}$$

5. Принцип действия приборов для измерения силы внешнего трения.
6. Методы измерения внешнего трения, в которых одна плоскость поступательно перемещается относительно другой плоскости. Схемы. Область применения.
7. Методы измерения внешнего трения, в которых одна из фрикционных пар совершает вращательное движение. Схемы. Область применения.
8. Характеристика методов измерения внешнего трения, допускающих изменение давления.
9. Характеристика методов измерения внешнего трения, допускающих изменение размера поверхности.
10. Характеристика методов измерения внешнего трения, допускающих изменение скорости скольжения.
11. Какие факторы могут вызвать прерывистость движения трущихся тел? Объясните явление.
12. Понятие пористости, адгезии, аутогезии, когезии.
13. От каких факторов зависит адгезия?
14. Адгезиометрия и адгезиометры. Методы измерения адгезии.
15. Порядок расчета силы аутогезии слоя частиц сыпучих тел.
16. К каким выводам может привести информация о зависимости между сопротивлением сдвига и нормальным движением сыпучего тела по поверхности?
17. Уравнение адгезионного движения сыпучей массы. Коэффициент внешнего трения.
18. Уравнение аутогезионного движения сыпучей массы. Коэффициент внутреннего трения.

Практическое занятие №17 Сдвиговые и компрессионные характеристики пищевых продуктов

Цель занятия: изучить специфику оценки сдвиговых и компрессионных свойств пищевых продуктов. Освоить порядок расчета времени релаксации напряжения пищевых материалов, силы сцепления между частицами сухой сыворотки, скорости истечения сливок.

Материальное обеспечение работы . Калькулятор, программное обеспечение – MS Excel (при отсутствии – миллиметровая бумага, транспортир).

На рис. 1 изображен *прибор Вейлера и Ребиндера* с вертикальным расположением зазора. Кювета 2 с исследуемым веществом установлена неподвижно, в нее помещается пластинка 1, приводимая в движение грузом 5. Между пластиной и нитью установлена микрошкала 4, по которой с помощью микроскопа 3 измеряют деформацию. Время отсчитывают по секундомеру.

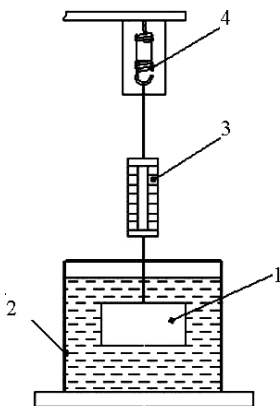


Рис. 1. Прибор Вейлера и Ребиндера:

- 1 – пластинка;
- 2 – кювета;
- 3 – микрошкала;
- 4 – пружина

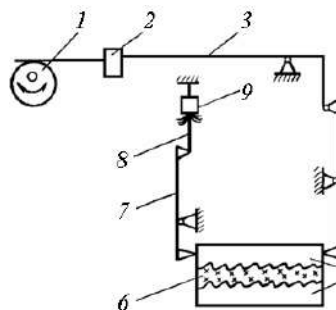


Рис. 2. Пластометр Д.М. Толстого:

- 1 – эксцентрик; 2 – гиря; 3 – неравноплечий рычаг; 4 – равноплечий рычаг;
- 5 – пластины; 6 – испытываемый образец; 7 – рычаг; 8 – балочка; 9 – тензорезисторы

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

$$\tau = F / (2A) \quad (1)$$

Предельное напряжение сдвига τ_0 определяют по наибольшей нагрузке F_{\max} , при которой происходит сдвиг пластин:

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

Пластометр Толстого с горизонтально расположенными пластинами (рис. 2) служит для нахождения констант упруго-пластично-вязких свойств масс с практически неразрушенными структурами. Модуль быстрой эластической деформации сдвига G_1 , модуль мгновенной эластической деформации G_2 , наибольшую пластическую вязкость η_0 определяют по формулам:

$$G_1 = \tau \cdot h / \Delta h_0; \quad G_2 = \tau \cdot h / (\Delta h_m - \Delta h_0); \quad \eta_0 = (\tau - \tau_T) / \dot{\gamma}, \quad (3)$$

где τ – напряжение сдвига, Па; h – толщина пластины, м;

Δh_0 – начальная

h – толщина с (условно-мгновенная) деформация, м;

Δh_m – эластическая деформация, м.

Также вычисляют условное статическое предельное напряжение сдвига $\tau_{0\text{ст}}$ по формуле (2).

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

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

риала из рабочего зазора, а также трудности обеспечения заданной температуры.

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

Двустороннее сжатие продукта (рис. 3, *г*) может происходить от двух подвижных поршней или от одного неподвижного и одного подвижного, когда цилиндр свободно подвешен, например на пружинах.

Методика измерений практически одинакова для всех приборов. Конструктивные схемы различаются по способу привода пластины: снизу и сверху, от электродвигателя или непосредственно от груза.

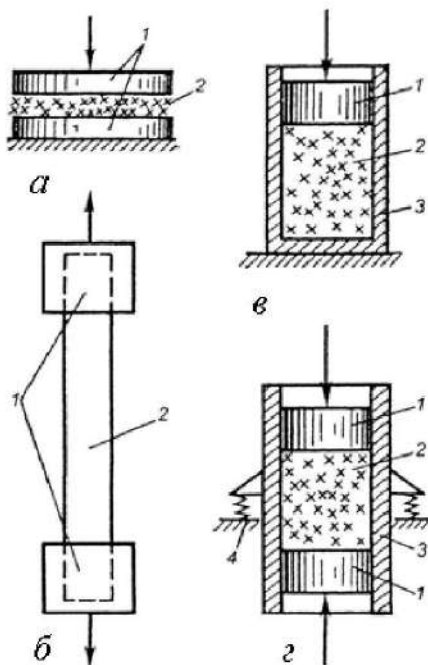


Рис. 3. Схемы измерения компрессионных характеристик

а) осевое сжатие:

- 1 – зажимы;
- 2 – продукт;

б) осевое растяжение:

- 1 – зажимы;
- 2 – продукт;

в, г) одностороннее и объемное сжатие:

- 1 – поршень;
- 2 – продукт;
- 3 – цилиндр;
- 4 – пружинные

ПОДВЕСЫ

Основные *методы* измерения этих характеристик показаны на

рис. 3. Сжатие продукта между пластинами (рис. 3, а) используют также для оценки *консистенции* продукта. При испытании на *растяжение* (рис. 3, б) для надежного крепления концов образца предложено замораживание их в жидком азоте. При сжатии продукта в цилиндре поршнем (рис. 3, в) появляются распорные усилия, в результате чего давление и плотность по высоте цилиндра изменяются. Двустороннее сжатие продукта (рис. 3, г) может происходить от двух подвижных поршней или от одного неподвижного и одного подвижного, когда цилиндр свободно подвешен, например, на пружинах.

Методика измерений практически одинакова для всех приборов. Конструктивные схемы различаются по способу привода пластины: снизу и сверху, от электродвигателя или непосредственно от груза.

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

Приборы для измерения деформации при *сжатии* применяются для определения упруго-пластичных свойств. **Прибор Николаева и Шпигельгласа** для измерения деформаций одноосного сжатия между параллельными плоскостями (рис. 5) состоит из станины 1, в которой перемещается опорная стойка столика. Испытуемый материал помещается между параллельными плоскостями дисков 2 и 3. Верхний из них может перемещаться под действием груза 4, в то же время он связан с рейкой 8, входящей в зацепление с шестерней 7, на оси которой закреплена стрелка 6, показывающая деформации по шкале 5. Нижний диск 2 имеет возможность перемещаться в вертикальной плоскости при помощи эксцентрика 9. На описанном приборе можно определить мгновенную упругую деформацию, модуль упругого сжатия, а также вязкость и предельное напряжение сдвига.

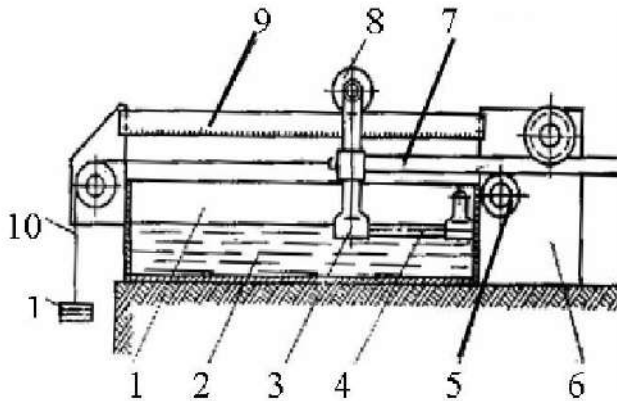


Рис. 4. Прибор для испытания образцов на растяжение: 1 – ванна; 2 – раствор; 3 – зажим; 4 – образец; 5 – ролик; 6 – кронштейн; 7 – стержень; 8 – ролик; 9 – измерительная шкала; 10 – нить; 11 – груз

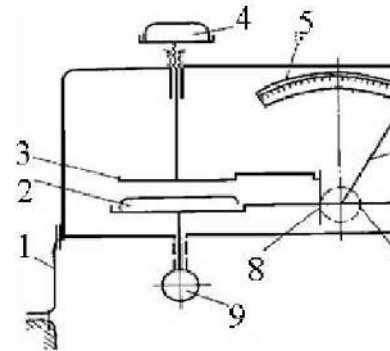


Рис. 5. Прибор для испытания на сжатие: 1 – станина; 2, 3 – диски; 4 – груз; 5 – шкала; 6 – стрелка; 7 – шестерня; 8 – рейка; 9 – эксцентрик

Практическая часть

К основным **компрессионным свойствам** пищевых 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 $\tau\sigma$; s , относительная деформация ε ; объемная относительная деформация ε_V ; плотность ρ , кг/м³.

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

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

Упругость тел при растяжении – сжатии характеризуется модулем упругости первого рода (**модуль Юнга**) E , а при сдвиге – второго рода (модуль сдвига) G . Модуль Юнга (модуль упругости) – физическая величина, характеризующая свойства материала сопротивляться растяжению/сжатию при упругой деформации.

Время релаксации напряжения (λ) представляет собой время, в течение которого начальное **напряжение** в теле σ_0 уменьшилось в e раз (e – основание натурального логарифма).

Время релаксации равно:

$$\lambda = \eta/E, \quad (1)$$

где η – вязкость, E – модуль Юнга.

$$\gamma = \sigma/E, \quad (2)$$

где σ – напряжение, кПа.

Деформация в упругом теле пропорциональна напряжению сдвига:

Таблица 1. Классификация пищевых масс по структурно-механическим свойствам

Тип структурированных систем	Модуль Юнга E , Па	Вязкость η , Па·с	Отношение η/E , с
Свободнодисперсные	меньше 10	меньше 10	меньше 10
Связнодисперсные	10...10 ⁴	10 ² ...10 ⁶	10...10 ²
Твердые структуры	свыше 10 ⁴	свыше 10 ⁶	свыше 10 ²

Пластическая прочность P_c структурированных дисперсных систем связана со средней силой сцепления

\bar{f}_n соотношением:

$$P_c \approx n \bar{f}_c, \quad (3)$$

где $n = \frac{k}{d^2}$ – среднее число контактов на единице по-

верхности сдвига;

d – диаметр частицы;

k – структурный параметр, определяется по табл. 2 для заданного содержания дисперсной фазы.

Таблица 2. Структурный параметр k

Объёмное содержание ϕ	0,20	0,25	0,30	0,40	0,45	0,50	0,55
Структурный коэффициент-k	0,02	0,07	0,24	0,70	1,10	1,60	2,00

Впервые понятие **релаксации** напряжений ввел Максвелл. Им было дано аналитическое выражение процесса релаксации материалов, исходя из предположения наличия прямо пропорциональной зависимости между скоростью убывания напряжений с течением времени и величинами действующих напряжений.

После Максвелла изучением явлений пластичности занимался Ф.Н. Шведов, заложивший основы реологии дисперсных систем. Шведовым было дано уравнение релаксации напряжений в виде функции:

$$\sigma = \sigma_k + (\sigma_0 - \sigma_k) e^{-t/\lambda}, \quad (4)$$

где σ – напряжение в момент времени t , Па;

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

λ – время релаксации, с.

Время релаксации – период времени, в течение которого материал из неравновесного напряженного состояния переходит практически в равновесное, установившееся.

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

Кривые релаксации имеют два отчетливо выраженных участка, первый из которых характеризуется резким падением напряжений в условиях быстро затухающей скоростью релаксации, а второй определяется замедленным падением напряжений с весьма малой скоростью релаксации. На втором участке кривая релаксации асимптотически приближается к некоторой прямой, параллельной оси

абсцисс и отстоящей от нее на величину напряжения, при котором практически не происходит релаксации

Механическая **модель** вязко-упругого релаксирующего *тела* Максвелла представляет собой последовательное соединение элементов Гука с модулем упругости G и Ньютона с вязкостью η . На оба элемента действует одинаковое напряжение. Тело Максвелла ведёт себя как упругое или вязкое в зависимости от отношения времени релаксации материала к длительности эксперимента. Если под действием мгновенного усилия пружина растягивается, а затем сразу нагрузка снята, то поршень не успевает двигаться и система ведёт себя как упругое тело. Однако, с другой стороны, если поддерживать растяжение пружины, постоянным, она постепенно релаксирует, перемещая поршень вверх, и система ведёт себя как ньютоновская жидкость.

Задание 1. Изучить и законспектировать теоретическую часть работы.

Задание 2. Получить вариант задания. Для пищевого материала в зависимости от влажности (W) были получены следующие экспериментальные данные, приведенные в табл. 3. Определить модуль Юнга (E) и его размерность, деформацию (γ) если система деформируется при напряжении σ , равном: 0,78 кПа, определить к какому классу структурированных систем относится пищевой материал.

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Влажность пищевого материала W , %	39,7	41,5	43,8	44,5	46,6	48,2	49,9	51,6	53,2	54,9	56,6	58,2	46,6	48,2
Период релаксации напряжений λ , с	15	12	10	8	7	6	8	3	1	2	4	8	6	2
Вязкость, η кПа·с	370	443	516	589	662	735	808	881	954	102	110	117	370	443

Задание 3. Получить вариант задания (табл. 4) у преподавателя. Определить среднюю силу сцепления между частицами сухой сы-воротки, если известны ее пластическая прочность на сдвиг P_c , пористость Π , структурный параметр k .

Таблица 4

Вариант	P_c , Па	Пористость Π , долей единицы ($\Pi=1-\varphi$)	Диаметр d , мкм
1	201	0,54	40
2	205	0,55	39
3	207	0,16	41
4	208	0,17	42
5	209	0,18	43
6	211	0,19	44
7	210	0,20	45
8	212	0,21	46
9	213	0,22	47
10	214	0,23	48
11	215	0,24	49
12	216	0,25	50
13	217	0,26	51
14	218	0,26	52
15	220	0,28	53
16	221	0,29	54
17	222	0,30	55

Пример выполнения

Определите среднюю силу сцепления между частицами сухой сы-воротки, если ее пластическая прочность на сдвиг $P_c = 200$ Па, пористость $\Pi=1-\varphi = 0,54$, диаметр частиц муки равен $d=40$ мкм.

Решение.

Для определения структурного параметра k нужно по табл. 2 построить график зависимости $k(\varphi)$ и аппроксимировать данные квадратической зависимостью при помощи программы Excel.

$$1-\varphi = 0,54, \text{ отсюда } \varphi = 1-0,54 = 0,46$$

$$\text{Имеем: } k(0,46) = 14,416 \cdot 0,46^2 - 5,0163 \cdot 0,46 + 0,4367 = 1,18$$

Находим среднее число контактов на единице поверхности сдвига по формуле $n=k/d^2 = 1,18/40^2$

Далее находим среднюю силу сцепления, исходя из формулы (3).

Задание 4. Получить вариант задания (табл. 5, 6) у преподавателя.

Вычислить скорость истечения сливок из капилляра, если известна его длина, радиус сечения, вязкость сливок, давление, под которым вытекают сливки.

Таблица 5

Вариант	Длина капилляра, м	Радиус сечения, м	Давление, Па	Вязкость сливок, $\eta \cdot 10^{-3}$, Па \cdot с
1	$5 \cdot 10^{-2}$	$25 \cdot 10^{-5}$	980	58,44
2	$7,3 \cdot 10^{-2}$	$10 \cdot 10^{-5}$	1000	36,92
3	$6,4 \cdot 10^{-2}$	$30 \cdot 10^{-5}$	1970	29,98
4	$4 \cdot 10^{-2}$	$15 \cdot 10^{-5}$	870	20,50

Вычислите вязкость сгущенного молока, вытекающего из капилляра, если известна его длина, радиус сечения, объёмная скорость истечения и давление.

Таблица 6

Вариант	Длина капилляра, м	Радиус сечения, м	Давление, Па	Объёмная скорость, м ³ /с
5	$6 \cdot 10^{-2}$	$25 \cdot 10^{-5}$	200	$14 \cdot 10^{-10}$
6	$6 \cdot 10^{-2}$	$25 \cdot 10^{-5}$	200	$53,6 \cdot 10^{-11}$
7	$7,2 \cdot 10^{-2}$	$11,11 \cdot 10^{-4}$	195	$17 \cdot 10^{-10}$
8	$9,4 \cdot 10^{-2}$	$80 \cdot 10^{-5}$	280	$50 \cdot 10^{-11}$

Пример выполнения

Определите среднюю силу сцепления между частицами сухой сыворотки, если ее пластическая прочность на сдвиг $P_c = 200$ Па, пористость $\Pi = 1 - \varphi = 0,54$, диаметр частиц муки равен $d = 40$ мкм.

Решение.

Для определения структурного параметра k нужно по табл. 2 построить график зависимости $k(\varphi)$ и аппроксимировать данные квадратической зависимостью при помощи программы Excel.

$$1-\varphi = 0,54, \text{ отсюда } \varphi = 1-0,54 = 0,46$$

$$\text{Имеем: } k(0,46) = 14,416 \cdot 0,462 - 5,0163 \cdot 0,46 + 0,4367 = 1,18$$

Находим среднее число контактов на единице поверхности сдвига по формуле $n = k/d^2 = 1,18/40^2$

Далее находим среднюю силу сцепления, исходя из формулы (3).

Задание 5. Получить вариант задания (табл. 7) у преподавателя. Для пищевого материала получены данные изменения напряжения (σ , кПа) от времени (t). Определить время релаксации напряжения (λ), считая, что в данном случае напряжения релаксируют также как в механической модели Максвелла.

Таблица 7

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$t_{\text{мин}}$	$\sigma, \text{кПа}$	$\sigma, \text{кПа}$	$\sigma, \text{кПа}$	$\sigma, \text{кПа}$	$\sigma, \text{кПа}$	$\sigma, \text{кПа}$	$\sigma, \text{кПа}$	$\sigma, \text{кПа}$	$\sigma, \text{кПа}$	$\sigma, \text{кПа}$
10	8782,524	7713,373	6878,004	6240,383	5310,787	5030,041	4724,977	4369,45	4040,184	3686,152
20	6292,954	5170,428	4365,72	3686,678	2726,649	2462,414	2189,41	1898,955	1627,751	1356,06
30	4509,098	3465,842	2771,081	2178,006	1399,908	1205,454	1014,505	825,2826	655,8052	498,8664
40	3230,91	2323,223	1758,906	1286,717	718,7368	590,1202	470,0908	358,6663	264,2176	183,5227
50	2315,048	1557,303	1116,442	760,1636	369,0118	288,8884	217,8257	155,8757	106,4507	67,51423
60	1658,805	1043,891	708,6463	449,0876	189,457	141,4229	100,9337	67,74332	42,88795	24,8371
70	1188,585	699,7414	449,8036	265,3108	97,27045	69,23241	46,7696	29,44113	17,27914	9,137057
80	851,6587	469,0507	285,5067	156,7397	49,94031	33,89215	21,6716	12,79506	6,961599	3,361336
90	610,2401	314,4141	181,2215	92,59827	25,64021	16,59162	10,04196	5,56071	2,804761	1,236566
100	437,2561	210,7581	115,0279	54,70498	13,16412	8,122288	4,653135	2,416675	1,130011	0,454907
110	313,3077	141,2754	73,01239	32,31847	6,758687	3,976198	2,15612	1,050283	0,45527	0,167351
120	224,4948	94,6997	46,34363	19,09303	3,470025	1,946515	0,99908	0,456451	0,183424	0,061565
140	115,2595	42,55132	18,6714	6,663811	0,914689	0,466484	0,214514	0,086212	0,029774	0,008332

Механическая модель Максвелла представляет последовательное соединение элемента жесткости и вязкости. Изменение напряжения сдвига во времени при постоянной деформации описывается уравнением:

$$\sigma_t = \sigma_0 \cdot e^{-t/\lambda}$$

где λ – время релаксации, с

e – основание натурального логарифма,

σ – напряжение в момент времени t , кПа.

В логарифмических координатах это уравнение прямой линии:

$$\ln \sigma_t = \ln \sigma_0 - \frac{1}{\lambda} \cdot t$$

Построив графическую зависимость $\ln \sigma_t$ от t , по тангенсу угла наклона прямой можно найти λ^{-1} , а затем и λ – время релаксации напряжения.

2. Вопросы и задания для самоконтроля

1. Для каких измерений пригодны приборы с плоскопараллельным смещением пластин?
2. Какие характеристики продуктов можно получить используя метод тангенциального смещения пластин? Достоинства этих приборов.
3. Устройство прибора Вейлера и Ребиндера.
4. Как вычислить напряжение сдвига и предельное напряжение сдвига?
5. Устройство пластометра Толстого.
6. Как вычислить модуль быстрой эластической деформации сдвига, модуль мгновенной эластической деформации, наибольшую пластическую вязкость, статическое предельное напряжение сдвига?

7. Недостатки приборов с плоскопараллельным смещением пластин.
8. Роль компрессионных характеристик продуктов в пищевой отрасли.
9. Схемы и характеристики основных методов измерения компрессионных свойств продуктов.
10. Устройство прибора для исследования материала на растяжение.
11. Устройство прибора для измерения деформации при сжатии материала.
12. Перечислите основные компрессионные свойства пищевых материалов. Для чего они важны?
13. Понятие упругости. Как ее можно охарактеризовать?
14. Время релаксации. Как его рассчитать?
15. Как определить деформацию в упругом теле?
16. Как классифицируют пищевые массы по структурно-механическим свойствам?
17. Как рассчитать пластическую прочность структурированных дисперсных систем?
18. Релаксация напряжений в трактовке Максвелла и Шведова.
19. Специфика кривых релаксации.
20. Физический смысл модели вязкоупругого релаксирующего тела Максвелла.

Практическое занятие №18. Реологические модели реальных тел.

Цель занятия: изучить методы математического описания реологических моделей реальных тел по их механическим моделям

Материальное обеспечение работы . Карандаш, бумага, ластик, калькулятор.

Теоретическая часть

Реология – это наука, занимающаяся изучением закономерностей поведения различных материалов при самом разнообразном их деформировании. Главное внимание при этом уделяется деформациям сдвига, причем таким деформациям, которые нельзя считать бесконечно малыми.

Иллюстрация деформации сдвига показана на рисунке 1.

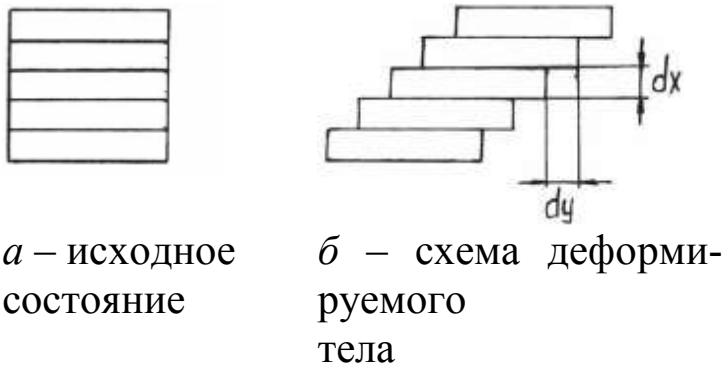


Рис. 1. Деформация сдвига

Относительная деформация сдвига двух элементарных слоев деформируемого тела определяется зависимостью:

$$\gamma = \frac{dy}{dx}, \quad (1)$$

где γ – деформация;
 dx – толщина элементарного слоя, м

Есть также понятие скорости сдвига (скорость сдвиговых деформаций), с^{-1} :

$$\dot{\gamma} = \frac{dV}{dx}, \quad (2)$$

где dV – скорость сдвига элементарного слоя относительно соседнего слоя, м/с.

Моделью упругого твердого тела является пружина, или тело Гука, в соответствии с рис. 2.

Для *идеального упругого* тела (тела Гука) связь напряжений и деформаций при простом сдвиге описывается следующим реологическим уравнением:

$$\tau = G \cdot \gamma, \quad (3)$$

где τ – напряжение сдвига, Па;

G – модуль сдвига.

Тело Гука идеально, так как оно восстанавливает свою исходную форму после снятия приложенных нагрузок, какими бы они не были.

Кроме тела Гука существует еще две простейшие идеальные модели реальных тел – Сен-Венана и Ньютона.

Модель идеально пластичного тела изображается в виде пары трения или **тело Сен-Венана**, в соответствии с рис. 2. Для тела Сен-Венана деформации начинаются после достижения напряжениями предельного значения, например, при чистом сдвиге τ_0 . До этого тело идеально твердое. Причем величина γ и γ не связана с τ_0 . Такое тело называется *идеально пластичным*.

Механической моделью вязкой жидкости является гидравлический поршень, в соответствии с рис. 2, или **тело Ньютона**. Тело Ньютона – это *идеально вязкая* жидкость, у него скорость сдвиговых деформаций $\dot{\gamma}$ определяет возникающие касательные напряжения:

$$\tau = \mu \cdot \dot{\gamma}, \quad (4)$$

где μ – постоянный коэффициент, называемый коэффициентом вязкости, Па·с.

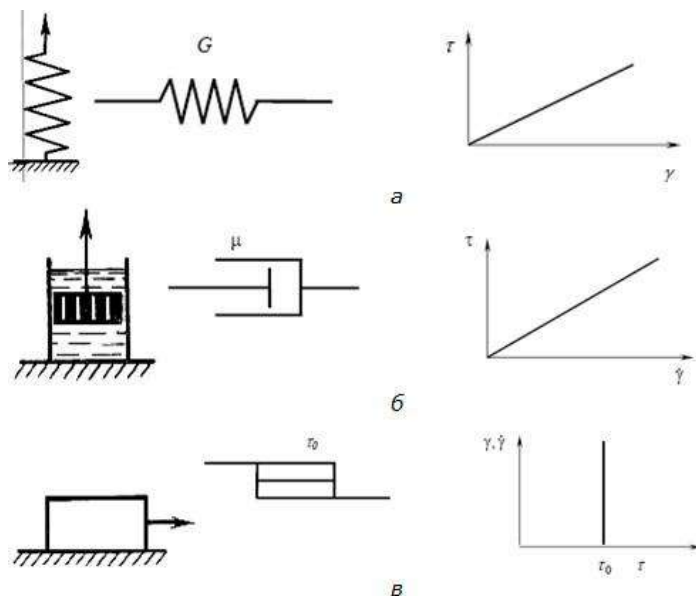


Рис. 2. Механические модели реальных тел:

a – механическая модель тела Гука; *б* – механическая модель тела Ньютона, *в* – механическая модель тела Сен-Венана

Течение реальных материалов, перерабатываемых в пищевой промышленности, плохо описывается уравнением (4). Реальные тела отличаются от идеальных тем, что в них одновременно присутствуют и упругие и пластические и вязкие свойства.

Выразить реологические свойства *реальных* тел можно **механическими моделями**. При составлении механических моделей исходят из положения, что деформация сложного тела является результатом наложения деформаций элементарных механических моделей идеализированных тел, отражающих основные реологические свойства. Для тела Гука это пружина, для тела Ньютона – это гидравлический амортизатор (поршень), для тела Сен-Венана поступательная кинематическая пара сухого трения. Из формул (3) и (4) и рис. 2 следует, что тело Гука характеризуется жесткостью пружины G , а тело Ньютона вязкостью μ .

Из элементов на рис. 2 можно составить более сложные модели, например, **тело Кельвина**, изображенное на рисунке 3. В 1890 году Уильям Томпсон (он же лорд Кельвин) ввел понятие вязкости твердого тела. Механическая модель тела Кельвина представляет собой параллельно соединенные элементы Гука и Ньюто-

на, в соответствии с рис. 3, с реологическими характеристиками G и μ .

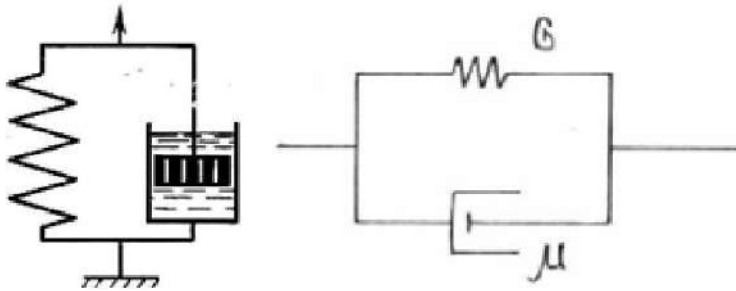


Рис. 3. Механическая модель тела Кельвина

Наличие механической модели позволяет несложными рассуждениями перейти к математической. Для написания математической модели тела Кельвина используем то обстоятельство, что при параллельном соединении элементов деформация сложного тела γ_k равна деформации каждого элемента, а напряжение суммарного элемента τ_k равно сумме напряжений в отдельных элементах τ_r и τ_i . Эти соображения позволяют записать систему уравнений:

$$\begin{aligned}\gamma_k &= \gamma_r = \gamma_i \\ \tau_k &= \tau_r + \tau_i\end{aligned}\quad (5)$$

Воспользуемся реологическими уравнениями элементов Гука и Ньютона, получаем:

$$\begin{aligned}\tau_r &= G \cdot \gamma_r \\ \dot{\tau}_i &= \mu \cdot \dot{\gamma}_i\end{aligned}\quad (6)$$

Рассмотрев две совокупности уравнений (5) и (6), получаем математическую модель тела Кельвина:

$$\tau = G \cdot \gamma + \mu \cdot \dot{\gamma}\quad (7)$$

Кельвин ввел это идеальное тело для того, чтобы иметь возможность показать свойство вязкого трения для «твердого» тела, то

есть явление ползучести, когда деформация развивается при постоянной величине приложенных напряжений.

В 1920 году Гесс наблюдал необычное поведение вязкой жидкости. 1,5 % раствор крахмала, внешне вполне напоминает вязкую жидкость, помещался в сосуд. Сосуд вращали вокруг оси и резко останавливали. Жидкость в нем продолжала вращаться со все уменьшающейся, в силу наличия вязкости, скоростью. Аналогичный опыт проделывали с раствором глицерина в воде. Обнаружилось, что в случае затухания вращения раствора глицерина с водой, имевшего, как казалось, ту же вязкость, что и раствор крахмала, – смесь глицерина с водой, все более медленно вращаясь, наконец, останавливалась. В случае же 1,5 % раствора крахмала затухание вращения происходило так: вращение (допустим по часовой стрелке) постепенно затухало и, прекратившись, вновь начиналось самопроизвольно, но уже в обратном (против часовой стрелки) направлении.

Затем, вновь остановка и вращение по часовой стрелке. Иными словами, вязкая жидкость обнаруживала наличие упругих свойств (вспомним, как затухают упругие колебания стальной пружины – тела Гука).

Для описания такого явления в качестве первого приближения можно взять другую реологическую модель – тело Максвелла (рис. 4).

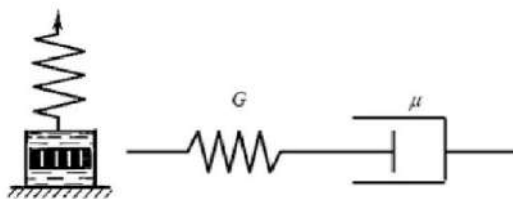


Рис. 4. Механическая модель тела Максвелла

В самом деле, рассматривая механическую модель, можно убедиться, что она «течет» как жидкость за счет движения элементов амортизатора. Она же обладает упругими свойствами: например, при мгновенном приложении напряжений – мгновенно деформируется как упругое тело на какую-то величину, за счет деформации пружины. После упругой мгновенной деформации, при продолжающемся действии напряжении, продолжается вязкое течение.

На механической модели тела Максвелла можно

«проиграть» вариант приложения напряжения и фиксации возникших деформаций, что приведет к исчезновению напряжений. Три состояния модели, в соответствии с рис. 5, показывают, что со временем приложенные напряжения будут уменьшаться и исчезнут вообще.

Такое явление самопроизвольного уменьшения напряжений при постоянной деформации носит название *релаксации* напряжений, что является характерной особенностью тела Максвелла.

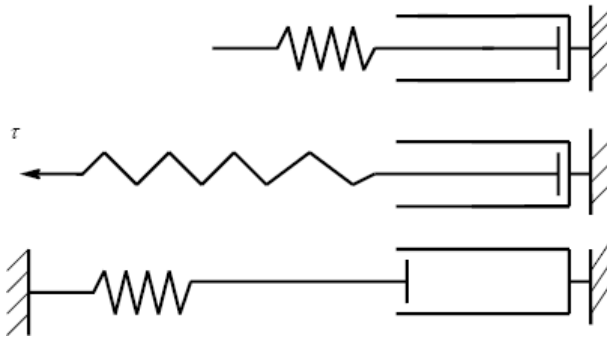


Рис. 5. Релаксация напряжений в теле Максвелла

Аналогично тому, как делали это для тела Кельвина, можно, анализируя механическую модель тела Максвелла, получить реологическое уравнение тела Максвелла:

$$\tau + \frac{\mu}{G} \cdot \dot{\tau} = \mu \cdot \dot{\gamma}, \quad (8)$$

где t – время, с.

Один из путей уточнения описания реологическими уравнениями поведения реальных материалов под нагрузками – это путь описания свойств реального материала, как комбинации тех или иных идеальных свойств.

Пример. Есть вязкий материал – идеальный ньютоновский. Есть пластичный – тоже идеальный Сен-Венановский. А есть реальный – вязкопластичный, сочетающий свойства вязкости и пластичности. Прикладываем напряжения – нет течения даже с малой скоростью. Увеличиваем напряжения – все еще нет. И вот, по достижении определенной величины τ_0 начинается вязкое течение с

неким значением вязкости, называемым в данном случае пластической вязкостью. Реологическая модель такого поведения, называемая телом Шведова-Бингама, в соответствии с рис. 6, имеет реологическим уравнением зависимость при $\tau > \tau_0$:

$$\tau = \tau_0 + \mu_{\text{в}} \cdot \dot{\gamma} \quad (9)$$

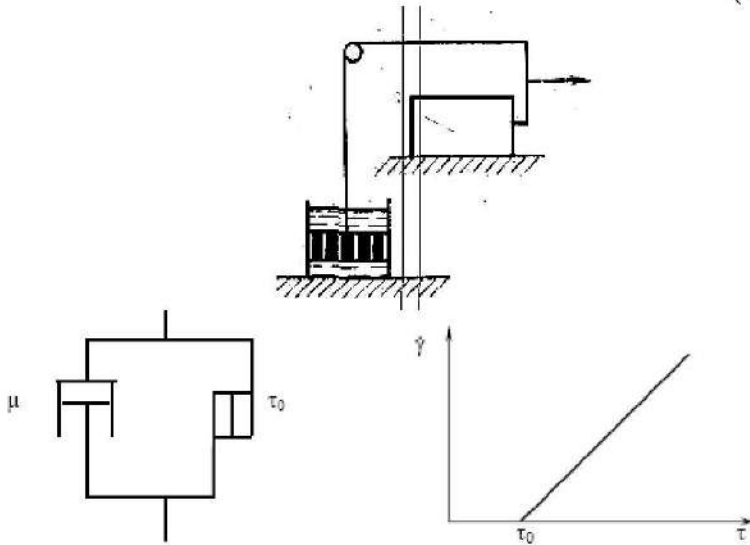


Рис. 6. Механическая модель тела Шведова-Бингама

Эта модель также чрезвычайно распространена в инженерной практике и позволяет во многих случаях решать реальные инженерные задачи. Модель упруго-пластического тела, в соответствии с рис. 7, получается при последовательном соединении упругого элемента Гука и пластического элемента Сен-Венана. При небольших напряжениях это тело ведет как упругое, а при превышении определенной величины τ_0 начинается пластическое течение.

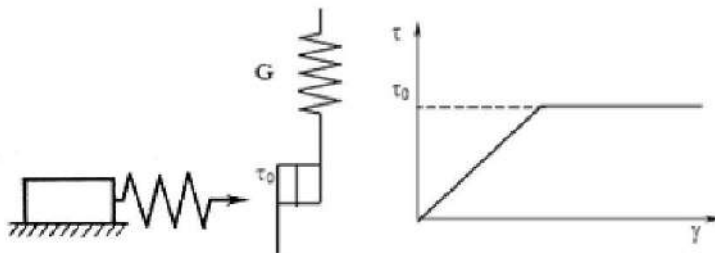


Рис. 7. Механическая модель упруго-пластического тела

Для более точного описания свойств реальных тел нужно использовать модели трехэлементные (составленные из 3-х элементов), четырехэлементные, и даже более сложные модели. На рис. 8 изображены трехэлементная модель Максвелла-Томсона и четырехэлементная модель Бюргерса.

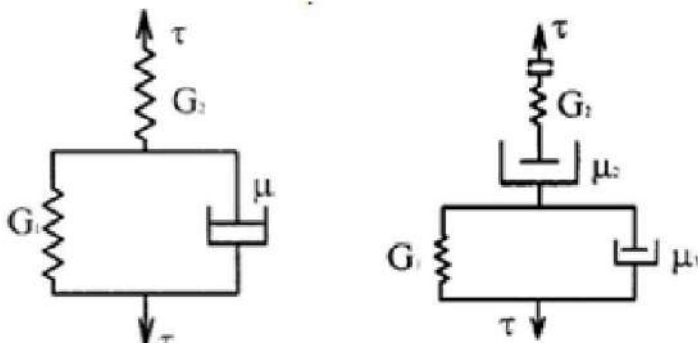


Рис. 8. Примеры сложных моделей реальных тел

Механическая модель Бингама (рис. 9) состоит из трех элементов. В природе имеются материалы, которые в первом приближении можно рассматривать как тело Сен-Венана. Они начинают течь, когда напряжение сдвига достигнет предельного значения. Если нет вязкого сопротивления, то скорость течения материала станет сколь угодно большой. Это показывает, что такие материалы могут только в первом приближении рассматриваться как тела Сен-Венана. Во втором приближении они должны обладать еще вязкостью. Все это приводит к построению тела Бингама, сочетающего упругость, вязкость и пластичность.

Механическая модель Бингама (рис. 9) состоит из трех элементов. В природе имеются материалы, которые в первом приближении можно рассматривать как тело Сен-Венана. Они начинают течь, когда напряжение сдвига достигнет предельного значения. Если нет вязкого сопротивления, то скорость течения материала станет сколь угодно большой. Это показывает, что такие материалы могут только в первом приближении рассматриваться как тела Сен-Венана. Во втором приближении они должны обладать еще вязкостью. Все это приводит к построению тела Бингама, сочетающего упругость, вязкость и пластичность.

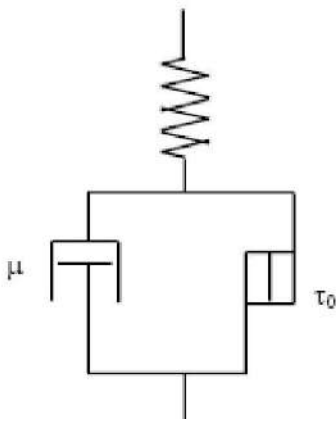


Рис. 9. Механическая модель Бингама

Механическая модель Бингама, в соответствии с рис. 9, состоит из элементов Гука с модулем упругости G , Ньютона с вязкостью μ и Сен-Венана с пределом текучести τ_0 . Элементы Ньютона и Сен-Венана соединены взаимно параллельно, а вместе – последовательно с элементом Гука. Под действием напряжения $\tau < \tau_0$ модель Бингама имеет только упругую деформацию. Реологическое уравнение этой модели при $\tau > \tau_0$:

$$\dot{\gamma} = \frac{\dot{\tau}}{G} + \frac{\tau - \tau_0}{\mu} \quad (10)$$

Ф.Н. Шведов изучил релаксационные процессы в коллоидных растворах и впервые обнаружил у них упругость и вязкость. Механическая модель Шведова отличается от модели Бингама тем, что параллельно модели Сен-Венана присоединена модель Максвелла, а у модели Бингама – элемент Ньютона.

Практическая часть

Методы реологии находят все большее применение в различных областях производства пищевых продуктов. Определение структурно-механических свойств пищевых масс связано с необходимостью технологического контроля производства. Стремление более точно отобразить поведение пищевых материалов под нагрузкой привело к появлению новых, все более сложных, моделей.

Так, деформация свежего хлеба при резании может быть описана реологической моделью Шоффилда – Скотт-Блера с элементом, отражающим потерю прочности хлеба при срезе (рис. 10).

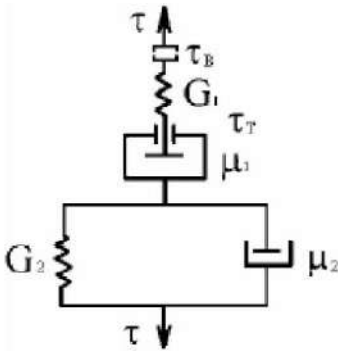


Рис. 10. Реологическая модель деформации свежего хлеба при резании

При резании хлеба давление через нож передается хлебу, который вначале испытывает мгновенную эластическую G_1 и замедленную вязко-упругую (G_2 , μ_2) деформации, затем при напряжении, превышающем предел текучести τ_T , материал пластически деформируется (τ_T , μ_1). При напряжении, равном пределу прочности при срезе (τ_B), происходит разделение материала (резание). Реологическое уравнение этой модели имеет вид:

$$\dot{\gamma} = \frac{t}{G_1} + \left(\frac{\tau}{\mu_2}\right)e^{-\frac{G_2 t}{\mu_2}} + \frac{\tau - \tau_T}{\mu_1} \quad (11)$$

Резание хлеба начинается при $\tau > \tau_B$. Для создания небольшой пластической деформации хлеба необходимо, чтобы время приложения нагрузки (резания) было как можно меньше, т. е. скорость деформации должна быть такой, чтобы было быстро достигнуто предельное напряжение на срез, а пластическая деформация была бы незначительной. Модель пшеничного теста при растяжении имеет более сложный вид (рис. 11). Здесь σ – нормальное напряжение, E – модуль упругости.

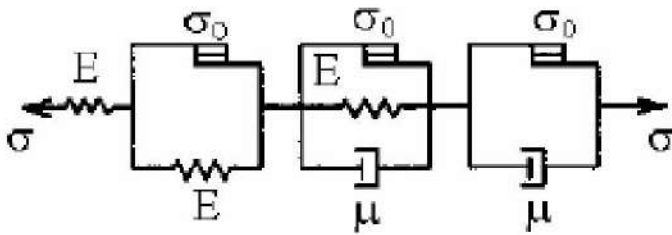


Рис. 11. Реологическая модель пшеничного теста при растяжении

Для описания поведения материалов, обладающих одновременно упруго-пластично-вязкими свойствами, предлагается механическая модель, состоящая из двух упругих тел, пластичного и вязкого, которая представлена на рис. 12 а. Данная модель более точно описывает поведение материалов типа мясные фарши, тесто и подобных, обладающих одновременно тремя свойствами — упругими, пластичными и вязкими.

Для более точного описания поведения неразрушенной мышечной ткани мяса предлагается механическая модель, представленная на рис. 12 б. Структура неразрушенной мышечной ткани мяса, сложная по своему строению, представлена в виде мышечных волокон, связанных пространственной соединительной пленкой. Все промежутки структуры заполнены тканевой жидкостью: слабо- и сильносвязанной влагой. По характеру и прочности связи между частицами мышечную ткань можно отнести частично к конденсационно-кристаллизационным структурам. Подобные структуры обладают рядом свойств твердых тел, но в то же время эластичны, пластичны и т. д., что необходимо учитывать при выборе наиболее целесообразных способов и режимов технологической обработки.

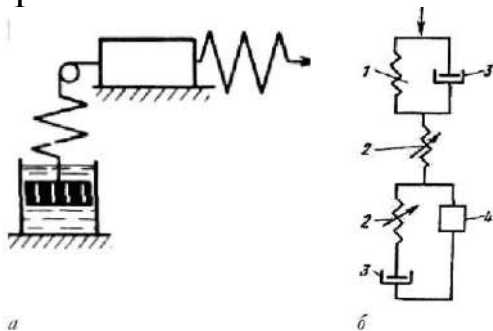


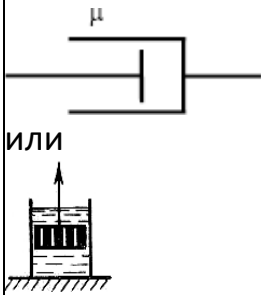
Рис. 12. Механические модели реальных пищевых материалов: а — механическая модель продуктов типа мясных фаршей, б — механическая модель неразрушенной мышечной ткани мяса: 1 — линейно-упругий элемент; 2 — нелинейно-упругий элемент; 3 — вязкий элемент; 4 — элемент, фиксирующий определенное значение деформации

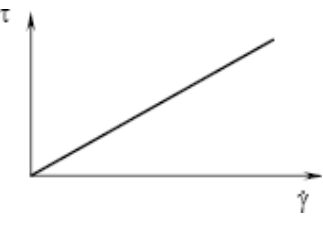
Общая деформация механической модели складывается из нелинейно-упругой с модулем упругости $E_1(\sigma)$ (последовательно включенный элемент 2), эластичной с модулем упругости E_1 и вязкостью η_1 (параллельно соединенные элементы 1 и 3) и пластической с нелинейным модулем упругости $E_2(\sigma)$, вязкостью η_2 и фиксатором (последовательно соединенные элементы 2, 3 и параллельно с ними фиксатор – элемент 4). Данная механическая модель позволяет моделировать деформационные изменения мяса при осевом сжатии. Модель описывается нелинейным дифференциальным реологическим уравнением второго порядка.

Задания

Задание 1. Изучить и законспектировать теоретическую часть работы. Заполнить табл. 1 (в качестве примера заполнена строка для тела Ньютона) для следующих моделей: вязкое тело (по Ньютону); упругое тело (по Гуку); пластичное тело (по Сен-Венану); упруго-вязкое тело (по Максвеллу); вязко-упругое тело (по Кельвину); вязко-пластическое тело (по Бингаму); вязко-пластическое тело (по Шведову).

Таблица 1. Реологические модели

Модель	Вязкое тело (по Ньютону)	Упругое тело (по Гуку)	...
Вид модели			

Реологическая кривая			
	при уменьшении сил снижается, а при исчезновении обращается в нуль		
Реологическое уравнение	Напряжения пропорциональны скорости деформации: $\tau = \mu \cdot \dot{\gamma}$, где τ – напряжения сдвига, Па; μ – коэффициент вязкости, Па·с; $\dot{\gamma}$ – скорость деформации, с ⁻¹ .		
Характеристика модели	Модель представляют цилиндром, в котором находится поршень с отверстиями. Вязкое течение происходит под действием любых сил, как бы малы они ни были, однако скорость деформации		

Задание 2. Получить вариант задания (табл. 2). Для различных реологических свойств пищевого материала, представленных в виде модели, состоящей из элементов, и характеризующих зависимость между напряжением деформации σ и деформацией γ , определить порядок следования элементов в модели (последовательное и параллельное), суммарное напряжение деформации и деформацию.

Таблица 2. Исходные данные

Вариант	Элемент	Деформация, γ	Напряжение деформации, σ , кПа	Вариант	Элемент	Деформация, γ	Напряжение деформации, σ , кПа
1	1	0,03	0,8	7	1	0,09	1,0
	2	0,03	0,9		2	0,11	1,0
	3	0,03	1,10		3	0,2	1,0
2	1	0,03	0,8	8	1	0,16	2,3
	2	0,06	0,8		2	0,14	2,3
	3	0,09	0,8		3	0,3	2,3
3	1	0,06	0,9	9	1	0,3	1,9
	2	0,06	2,0		2	0,3	1,5
	3	0,06	1,1		3	0,3	3,4
4	1	0,09	0,9	10	1	0,2	0,2
	2	0,11	0,9		2	0,2	0,1
	3	0,2	0,9		3	0,2	0,3
5	1	0,09	0,8	11	1	0,2	3,4
	2	0,09	1,5		2	0,1	3,4
	3	0,09	2,3		3	0,3	3,4
6	1	0,1	0,8	12	1	0,09	0,9
	2	0,1	2,6		2	0,11	0,9
	3	0,1	3,4		3	0,2	0,9

Пример выполнения

Дано:

Элемент	Деформация, γ	Напряжение деформации, σ , кПа.
1	0,09	0,9
2	0,11	0,9
3	0,2	0,9

Решение.

При последовательном соединении элементов (рис. 13 а) полная нагрузка P приходится на каждый элемент, а полная деформация γ или ее скорость $\dot{\gamma}$ складываются из деформаций и скоростей составляющих элементов:

$$P = P_1 = P_2 = \dots = P_n$$

$$\gamma = \gamma_1 + \gamma_2 + \dots + \gamma_n \text{ и } \dot{\gamma} = \dot{\gamma}_1 + \dot{\gamma}_2 + \dots + \dot{\gamma}_n$$

При параллельном соединении элементов (рис. 13 б) деформации γ и их скорости $\dot{\gamma}$ одинаковы для всех элементов, а полная нагрузка P складывается из нагрузок отдельных элементов:

$$P = P_1 + P_2 + \dots + P_n$$

$$\gamma = \gamma_1 = \gamma_2 = \dots = \gamma_n \text{ и } \dot{\gamma} = \dot{\gamma}_1 = \dot{\gamma}_2 = \dots = \dot{\gamma}_n$$

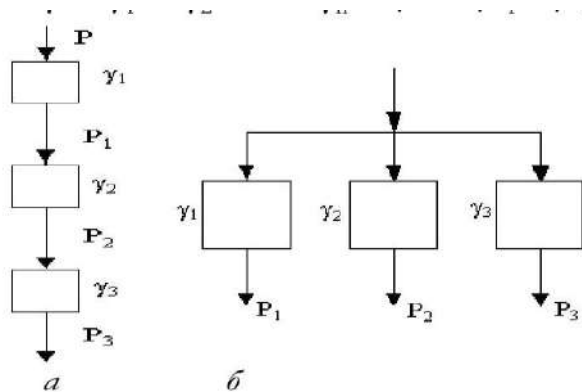


Рис. 13. Последовательное (а) и параллельное (б) соединение элементов реологических моделей

Так как напряжение деформации одинаково для всех элементов, то подходящая модель – последовательное соединение моделей (рис. 13а).

При последовательном соединении элементов полная нагрузка P приходится на каждый элемент, а полная деформация γ или ее скорость $\dot{\gamma}$ складываются из деформаций и скоростей составляющих элементов:

$$P = P_1 = P_2 = \dots = P_n$$

$$\gamma = \gamma_1 + \gamma_2 + \dots + \gamma_n \text{ и } \dot{\gamma} = \dot{\gamma}_1 + \dot{\gamma}_2 + \dots + \dot{\gamma}_n$$

Имеем: $P = P_1 = P_2 = P_3 = 0,9 \text{ кПа}$.

$$\gamma = \gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 = 0,09 + 0,11 + 0,2 = 0,40.$$

Ответ.

$P = P_1 = P_2 = P_3 = 0,9 \text{ кПа}$ – суммарное напряжение;

$\gamma = \gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 = 0,09 + 0,11 + 0,2 = 0,40$ – суммарная деформация.

Задание 3. Получить вариант задания (рис. 14, а-ж). Дать реологическую характеристику механической модели; привести примеры тел, которые могут быть описаны предлагаемой моделью.

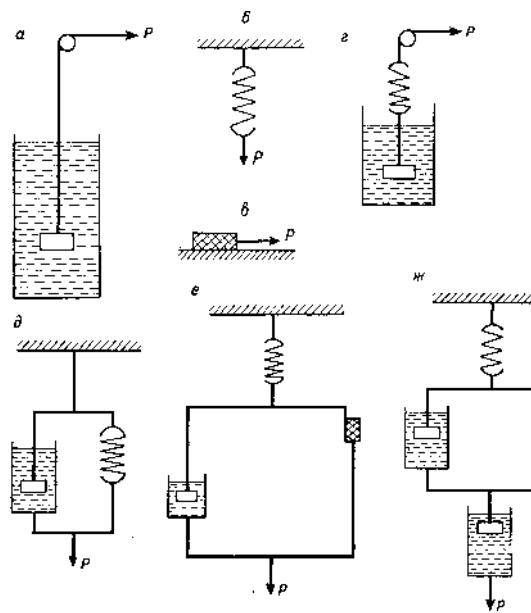


Рис. 14. Механические модели тел

Пример выполнения

Для описания поведения колбасного фарша при механической обработке может быть предложена механическая модель, которая состоит из модели Бингама с элементом, отражающим потерю прочности фарша при резании (рис. 15).

При измельчении давление через нож передается фаршу, который измельчается при напряжении, превышающем предельное напряжение резания (τ_p). Время приложения силы резания настолько мало, что мгновенно достигается предельное напряжение резания. Измельченные частицы фарша вначале испытывают вязко-упругую деформацию (G, μ), затем при напряжении, превышающем предельное напряжение сдвига (τ_0), фарш пластически деформируется и начинает течь.

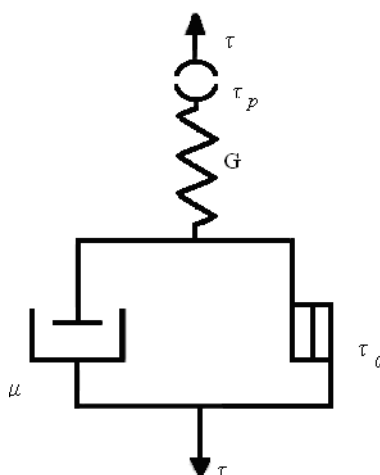


Рис. 15. Механическая модель фарша при механической обработке

При перемешивании и формовании фарш ведет себя подобно телу Бингама, сочетающего упругость, вязкость и пластичность.

2. Вопросы и задания для самоконтроля

1. Понятие деформации сдвига. Как оценить относительную деформацию сдвига? Скорость сдвига?
2. Охарактеризуйте тело Гука.
3. Охарактеризуйте тело Сен-Венана.
4. Охарактеризуйте тело Ньютона.

5. Чем отличаются реальные тела от моделей?
6. Как описать реологические свойства реальных тел с помощью механических моделей?
7. Охарактеризуйте тело Кельвина. Какие свойства тел оно описывает?
8. Математическая модель тела Кельвина.
9. Какой опыт обнаруживает наличие упругих свойств у вязкой жидкости?
10. Охарактеризуйте тело Максвелла.
11. Что такое релаксация напряжений?
12. Математическая модель тела Максвелла.
13. Охарактеризуйте тело Шведова-Бингама.
14. Модель упруго-пластичного тела.
15. Приведите примеры сложных моделей.
16. Модель Бингама.
17. Сравните модель Бингама и модель Шведова. Приведите рисунок.
18. Приведите примеры механических моделей реальных пищевых материалов
19. Чему равна деформация сложного тела при параллельном соединении элементов? Напряжение суммарного элемента? При последовательном?

Практическое занятие №19 Оптимизация, совершенствование и автоматизация процесса созревания (посола) биотехнологического сырья

План занятий

1. Теоретическая часть
2. Вопросы и задания для самоконтроля

1. Теоретическая часть

Целью посола мясного, рыбного и молочного сырья при выработке колбасных изделий, в том числе и колбасного сыра, является введение определенного количества соли, необходимого для придания готовым изделиям соответствующих вкусовых качеств, а также частичную подавления развития микроорганизмов. Посол и последующая выдержка мяса обеспечивают повышение влагоемкости, липкости, пластичности и т.д.

Увеличение влагосмкости сырья изменяет структурно-механические свойства. Процесс посола можно разделить на три операции: измельчение (например, мелкое измельчение мяса на волчке), смешивание измельченного сырья (мяса) с солью и выдержка посоленного сырья (мяса). Продолжительность посола во многом зависит от степени измельчения сырья: чем выше степень измельчения, тем быстрее и равномернее распределяется соль по всему объему и соответственно сокращается выдержка.

Мелкое измельчение сырья

Для ускорения посола и получения однородной массы при производстве колбас, сосисок и сарделек жалованное мясо, а также твердый сыр при приготовлении колбасного сыра, обычно пропускают через волчок, диаметр решетки которого 2...3 мм. Работоспособным считается то оборудование (например, волчок), значение параметров которого находится в пределах, установленных нормативами.

Входные параметры волчка, заданные в технической документации, следующие: зазор между направляющими ребрами цилиндра и шнеком должен быть не более 0.9 мм, температура продукта при измельчении не должна повышаться более чем на 5°C, температура нагрева корпусов подшипников не должна превышать 60°C. Для

определения рационального режима работы волчков необходимо рассмотреть входные воздействия на выходные параметры волчка.

К входным воздействиям относятся параметры обрабатываемого сырья (вид, сорт, масса кусков, температура), режущего инструмента (диаметр отверстий выходной решетки, комплектность, степень затупления и затяжки). Кинематические (частота вращения шнеков, скорость подачи сырья), а также условия эксплуатации (качество технического обслуживания). К основным выходным параметрам, характеризующим параметрическую надежность волчка, относятся качество продукции, производительность и энергозатраты.

К важным входным воздействиям относятся параметры режущего инструмента, особенно его заточка и затяжка. Часто недостатки заточки комплекта пытаются устранить чрезмерной затяжкой гайки цилиндра, что приводит к более интенсивному износу и поломке ножей либо предохранительных деталей в цепи передачи крутящего момента от электродвигателя к шнеку, к повышению температуры продукта, ухудшению качества измельчения, увеличению расхода электроэнергии.

Рассмотрим методику определения оптимальных параметров работы волчков, на примере измельчения мясного сырья, при которых перечисленные выше недостатки сведены к минимуму. Это необходимо знать студенту, как будущему специалисту для определения оптимальных режимов работы другого оборудования на различных видах сырья. Рассмотрим измельчение мясного сырья на распространенном на предприятиях отрасли типе мясо резательных машин для среднего измельчения — волчок Кб-ФВЗП-200.

Температура сырья 0...4 С. масса кусков. мяса 3...5 кг. В этих условиях волчок работает до параметрического отказа. Под отказом понимали работу машины до затупления режущего комплекта, определяемого выходными параметрами.

Предельное состояние режущего комплекта для говядины наступает при измельчении 40 т, для рыбного сырья — 50т, для свинины — 60т. Затупление режущего инструмента контролировали по предельному значению радиуса кривизны режущей кромки ножа (г-50...60мкм). Затупление режущей кромки определяли методом отпечатков, качество сырья — по структурно-механическим свойствам, усилие затяжки режущего инструмента — по динамометриче-

скому устройству. Перед замером предельного напряжения сдвига сырье подвергали подпрессовке давлением, равным $4 \cdot 10^4$ Па. в течение 180 с. Методика исследования следующая: после переработки на волчке Ют говядины и 20тсвинины отобрали пробы для определения предельного напряжения сдвига (θ_0 , Па) и других величин выходных параметров. После каждого цикла Проводили дополнительную затяжку режущего комплекта до начального значения.

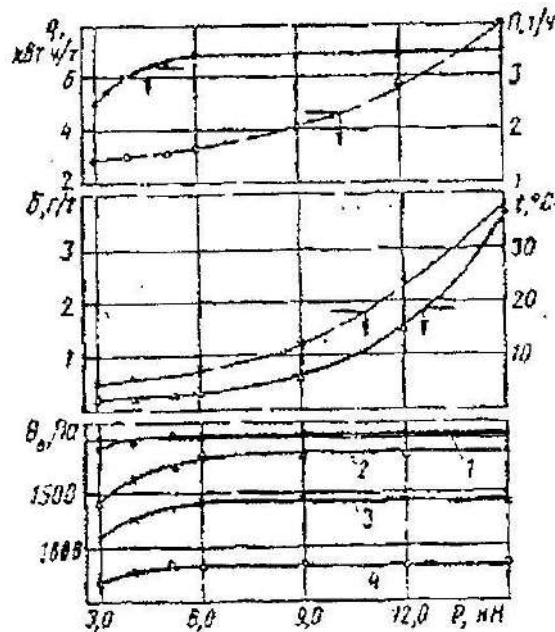


Рис. 1 Кривые зависимости изменения выходных параметров волчка К6-ФВЗП-200 от усилия затяжки:

1 — говядина ($W = 69\%$, $\varphi = 11\%$); 2 — говядина ($W = 61\%$, $\varphi = 20\%$); 3 — свинина полужирная ($W = 60\%$, $\varphi = 25\%$); 4 — свинина жирная ($W = 31\%$, $\varphi = 61\%$)

Из рис. 1 видно, что изменение предельного напряжения сдвига сырья в зависимости от усилия затяжки аналогично характеру изменения производительности. При этом значение θ_0 увеличивается прямо пропорционально усилию затяжки в пределах от 3 до 6 кН. Это объясняется тем, что при слабой затяжке режущего комплекта происходит помимо резания мятие продукта, при этом выделяется сок из мышечной ткани, увеличивая тем самым размер водно-белковой прослойки. Отсюда снижение предельного напряжения сдвига сырья. При увеличении затяжки свыше 9 кН резко возросли износ режущего комплекта, удельные энергозатраты и темпера-

тура мясосырья, что приводило к параметрическому отказу машины в зоне контакта ножей и решеток достигала $90...100^{\circ}\text{C}$, причем создавался высокий градиент температур (до 30 град/мм) в тонком-поверхностном слое металла, что приводило к снижению пищевой-ценности продукта. Таким образом, усилие затяжки, равное 6кН, можно считать оптимальным, обеспечивающим наилучшие параметры процесса резания.

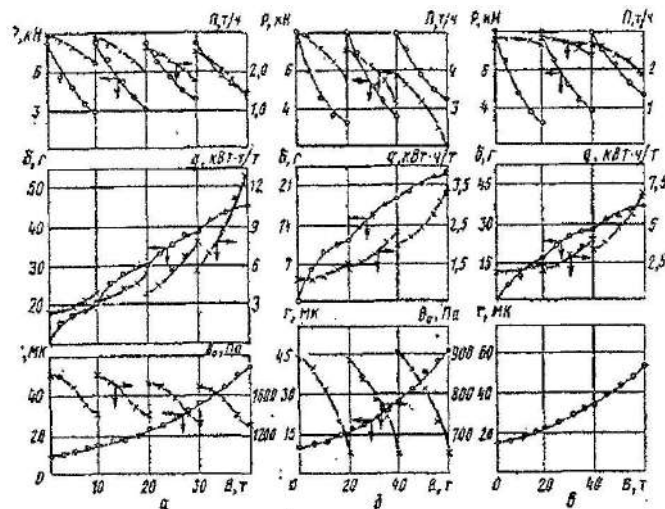


Рис. 2 Кривые зависимости изменения выходных параметров волчка К6-ФВЗП-200 от выработки:
a — говядины I сорта; *b* — свинины полужирной; *в* — измельченной размороженной свинины

На рис. 2 представлены кривые изменения выходных параметров волчка при измельчении сырья, по которым можно сделать следующий вывод: при установке нового режущего комплекта в каждом первом цикле работы волчка рабочие органы притираются, что вызывает более резкий износ режущего комплекта. Начальное усилие затяжки составляет 8кН, что выше рационального. После притирки режущего комплекта оно должно быть около 6кН. При дальнейшем измельчении сырья износ режущего комплекта стабилизируется, оставаясь почти постоянным. По мере износа усилие затяжки уменьшается, что вызывает снижение производительности волчка. Причем по мере увеличения количества циклов дополнительной затяжки уменьшается максимальная производительность волчка за счет увеличения радиуса кривизны режущих кромок. Это ухудшает процесс резания. Расход удельной электроэнергии имеет обратную зависимость.

Экспериментальные данные были получены для разного сырья, измельченного на волчках с диаметром отверстий решеток 3 мм при рациональной затяжке, равной 6 кН. После обработки данных вывели зависимость изменения предельного напряжения сдвига для говядины с определенным содержанием влаги и жира

$$\theta_0 = 4000 \cdot \exp[4 - (0,31 + 21\varphi^2) U].$$

Формула (1) действительна при следующих значениях переменных: жирность 0...0,25 и влагосодержание 1,6...2,6 долей единицы. При жирности сырья более 0,25 после соответствующей подпрессовки частицы слипаются, что вызывает резкое увеличение предельного напряжения сдвига. Кроме усилия затяжки режущего комплекта на производительность волчка влияет износ шнека. Исследование динамики образования зазора в результате износа шнека и направляющих ребер цилиндра показало, что зазоры 0,003 м и более приводят к потерям производительности с 4...4,5 до 1,5 т/ч и менее, причем энергозатраты возрастают с 3 до 12 кВт-ч/т и более (рис. 3).

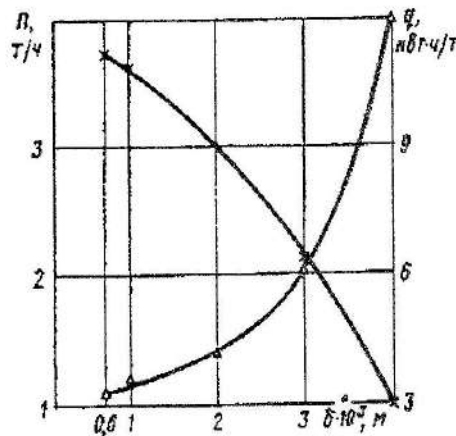


Рис. 3 Изменение выходных параметров волчка К6-ФВЗП-200 от увеличения зазора между шнеком и горловиной

С увеличением величины зазора резко возрастает перепуск сырья, вызывая его мятие и перетираание, тем самым уменьшается величина предельного напряжения сдвига и ухудшается качество. Процесс развития зазора связан главным образом с износом подшипника скольжения, в результате чего происходит контакт ребер цилиндра и шнека. Средний срок службы подшипника скольжения 800ч.

По истечении его начинается интенсивная выработка горловины и шнека.

Модернизация и усовершенствование конструкций волчков

В настоящее время применяют различные конструкции волчков, отличающиеся в основном производительностью и блоком подачи сырья. Они состоят из корпуса с загрузочным бункером, питателя, режущего инструмента и привода. Эти устройства имеют следующие недостатки. Несовершенство конструкции корпуса, рабочий цилиндр которого выполнен под прижимную резьбовую гайку, резьбовое соединение корпуса и гайки истирается и подвергается коррозии.

При эксплуатации режущий механизм часто приходится разбирать для переточки и удаления соединительной ткани. Сборка и разборка его при наличии гайки затруднительны, при этом затяжка требует значительного физического усилия. Собственная масса гайки на промышленных типах волчков достигает значительных величин (на МП-1-160 21 кг, наК6-ФВЗП-200 34 кг), что является травмирующим фактором при несчастных случаях, связанных с эксплуатацией и ремонтом оборудования. Существующие конструкции волчков практически можно запустить в работу при полном или частичном отсутствии режущего механизма, или без зажимной гайки. Это обусловлено отсутствием современной защитной блокировки привода, что может явиться причиной несчастных случаев.

Другими недостатками, снижающие качество получаемого фарша, существующих волчков, является отсутствие автоматического контроля степени износа подшипников валов шнека и автоматического регулирования усилия затяжки режущего механизма.

Отсутствие автоматического контроля состояния подшипников, вызывает износ рабочего цилиндра и шнеков, увеличивая рабочий зазор, а следовательно и перепуск сырья, его смятие и перетирание, а самое главное попадание металла в продукт, что в целом резко снижает качество. Для автоматического контроля состояния подшипников необходимы специальные контролирующие системы, которые имели бы обратную связь к приводу волчка.

Например, как только наступает момент соприкосновения вращающихся шнеков с корпусом рабочего цилиндра, должна за-

мыкаться электрическая цепь, включающая световую и звуковую сигнализацию и отключающая электропривод волчка.

Другим недостатком существующих волчков является отсутствие регулирования усилия затяжки режущего механизма. Бесконтрольность затяжки приводит к повышенному износу режущих пар и привода, работающего при перегрузке, увеличению расхода электроэнергии снижению качества продукта (см. выше).

В МГУ 11Б разработаны новые конструкции волчков, в результате чего улучшаются качество измельченного сырья, условия труда обслуживающего персонала, снижается износ режущего механизма и привода.

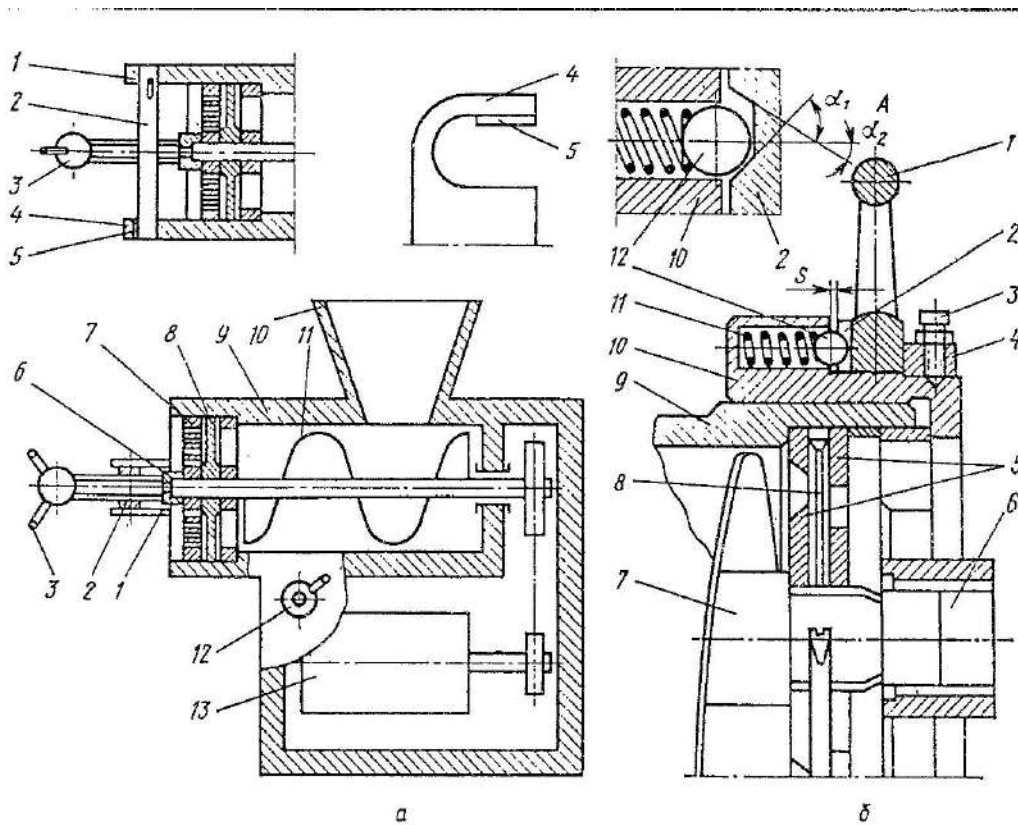


Рис. 4 Конструкции волчков:

а — с датчиком давления: 1 — опорный кронштейн; 2 — откидная планка; 3 — зажим; 4 — опорная скоба; 5 — датчик давления; 6 — стакан; 7 — решетка; 8 — нож; 9 — корпус; 10 — загрузочный бункер; 11 — питатель; 12 — рычаг; 13 — привод;

б — с пружинным рабочим элементом: 1 — штурвал; 2 — сменные кольца; 3 — винты; 4 — стопорное кольцо; 5 — набор решеток; 6 — вал; 7 — шнек; 8 — нож; 9 — корпус; 10 — гайка; 11 — пружина; 12 — рабочие элементы

Волчок (рис. 4, а) работает следующим образом. После сборки режущего механизма откидная планка свободным концом ставится в опорную скобу. Зажим упирается в стакан, фиксирующий решетку

и нож на хвостовике питателя. При вращении зажима режущий механизм предварительно затягивается.

Поворотом рычага управления замыкается цепь питания привода, но машина не включается, так как отсутствует необходимое усилие затяжки режущего механизма, что фиксируется датчиками давления. Вращением зажима обеспечивается необходимое удельное давление в зоне контакта решетки и ножа, о чем свидетельствует включение волчка в работу. В случае превышения давления работа привода блокируется сигналом датчика, и волчок отключается. Для включения его необходимо вращением зажима в обратную сторону ослабить давление в зоне контакта режущих пар до оптимальной величины. Система блокировки исключает самовключение или ошибочное включение волчка в нерабочем состоянии, так как отсутствует усилие прижима откидной планки на датчик.

На рис. 4, 6 показан волчок, позволяющий оптимизировать усилие затягивания. При закручивании гайки на корпусе волчка пропалочи штурвала (для затягивания режущего инструмента) создастся крутящий момент, который передается через боковую стенку сменного кольца на подпружиненные рабочие элементы. При возрастании крутящего момента до требуемой величины подпружиненные рабочие элементы, преодолевая упругие силы пружины, выходят из выемок, и сменное кольцо и штурвал проскальзывают относительно корпуса гайки до следующей выемки, о чем сигнализирует щелчок. При вращении гайки волчка в обратном направлении сменное кольцо воздействует на корпус гайки противоположной стороной выемки через промежуточные рабочие элементы, и она отвинчивается. Причем, угол наклона рабочих сторон выемки различен. Уменьшение угла наклона боковых граней выемок ($\alpha_1 < \alpha_2$) позволяет увеличить усилие отвинчивания ($T_2 > T_1$) при заклинивании гайки во время работы механизма.

Перемешивание сырья с солью

Измельченное мясо на волчках солят в мешалках вместимостью до 600...1000л и выше. Для ускорения взаимодействия соли с белками, а следовательно, и сокращения продолжительности выдержки вместо соли добавляют рассол плотностью 1175 или 1200 кг/м³. В настоящее время на мясокомбинатах применяют различные непрерывные линии посола, мяса, состоящие из волчков, насосов-

дозаторов для сырья, смесителей, солерастворителя и дозаторов рассола. Иногда при выработке вареных колбас для ускорения процесса посола предварительно измельченное мясо на волчке солят в машинах тонкого измельчения, например куперах. При этом продолжительность выдержки составляет не менее 6 ч.

Основная цель перемешивания мелкоизмельченного сырья с солью является равномерное распределение дисперсной фазы (соль или рассол) в дисперсионной среде (фарш). Решение данной задачи можно осуществить с помощью устройства для контроля процесса перемешивания мясного фарша со шпиком основанное на разности величин проводимости электрического тока между компонентами фарша и шпика, а в нашем случае соли. При этом электропроводимость соли гораздо больше, а шпика — меньше по сравнению с фаршем.

Выдержка (созревание) биотехнологического сырья

Продолжительность выдержки мяса в посоле зависит не только от быстроты и равномерного распределения соли по всему объему, но и от скорости протекания последующих физико-химических и биохимических процессов. В результате прохождения этих процессов увеличивается влагопоглощающая способность продукта, что приводит к изменению структурно-механических свойств. Приобретенные при посоле новые свойства мяса делают его наиболее пригодным для производства колбасных изделий, способствуют большему удержанию влаги в процессе термообработки, т. е. уменьшению потери бульона, а следовательно, и увеличению выхода, при этом колбаса получается приятного вкуса и аромата, сочная и хорошей консистенции.

Л. П. Лаврова и В. П. Воловнская исследовали влияние длительности посола, степени измельчения и перемешивания фарша с солью на структурно-механические свойства. Установлено, что посол тонкоизмельченного мяса продолжается в течение 6... 12 ч. причем структурно-механические свойства имеют экстремальные значения, влагоудерживаемость при обжарке и варке наилучшая (рис. 5). Кроме того, посол сглаживает различия в свойствах мяса, вызванные биологическими индивидуальностями животного.

Одной из важных задач является сокращение продолжительности выдержки при посоле мяса. Это позволит уменьшить площа-

ди охлаждаемых помещений, увеличить объем производства, ускорить оборачиваемость тары, создает условия для дальнейшей механизации производственного процесса.

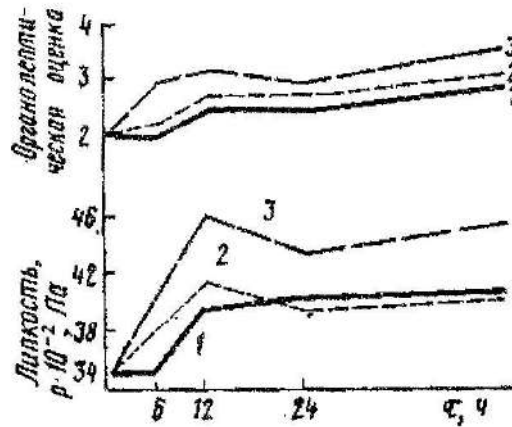


Рис. 5 Зависимость свойств фарша от продолжительности выдержки мяса в посоле:

1 — мясо посоленное в кусках размером 16...25 мм;
2 — мясо после измельчения на волчке с диаметром решетки 2...3 мм; 3 — после измельчения на куттере

Для уменьшения сроков выдержки мяса в настоящее время применяют тонкое измельчение, обработку фосфатами, которые влияют на гидрофильность белков, повышают температуру выдержки. Однако повышение температуры выше 10°C вызывает резкий рост микроорганизмов.

Поэтому температуру необходимо выбирать в зависимости от сроков выдержки. Например, при тонком измельчении (продолжительность выдержки 6...8ч) для дальнейшего сокращения выдержки можно повысить температуру.

Продолжительность выдержки мяса в посоле зависит также от его состояния. Наименьшее время требуется для парного мяса, у которого наибольшая влагопоглощаемость, а готовый продукт получается наилучшего качества. Охлажденное мясо требует большего времени и обладает меньшими величинами структурно-механических свойств. Мороженое мясо имеет еще меньшую влаг поглощаемость, чем охлажденное. Мясо после посмертного окоченения не рекомендуется направлять для посола, так как у него минимальная влагопоглощаемость, готовый продукт получается жестким и плохого качества при минимальном выходе.

Установить точно продолжительность выдержки для определенного вида мяса невозможно. Колебания продолжительности выдержки в технологической инструкции находятся в больших пределах.

Например, при измельчении мяса на волчке, диаметр отверстий решетки которой 3 мм, продолжительность выдержки 6...24 ч, которая зависит от физико-химических свойств сырья. Степень готовности мяса определяет органолептически мастер. Основная цель выдержки мяса — получить максимальную влагопоглощаемость и влагоудержание при тепловой обработке, что изменяет значения структурно-механических свойств мяса, которое вполне пригодно для инструментальных методов контроля. Экстремальные значения величин реологических свойств свидетельствуют о законченности процесса созревания мяса и упрочнении его структуры. Например, в результате исследований, выполненных Л. П. Лавровой и В. П. Воловинской, установлено, что оптимальная продолжительность выдержки соответствует максимальной липкости сырья.

Для интенсификации процесса посола применяют вакуумные и вибрационные установки. Академиком П. А. Ребиндером установлено, что использование низкочастотной вибрации в сочетании с механическим перемешиванием позволяет изменить физико-химические и физико-механические свойства веществ, имеющих коллоидную структуру, и, в частности, пищевых продуктов. При вибрировании по круговой или эллиптической траектории обрабатываемое вещество совершает вынужденные колебания, которые способствуют интенсификации диффузионных процессов и диспергированию сырья. В связи с диспергированием увеличивается общая поверхность мицелл коллоидов, связывающих рассол путем адсорбции, усиливается диффузия и соответственно увеличивается количество осмотически связанной влаги. Во ВНИММПе Г. Е. Лимоновым и др. для посола измельченных на волчке говядины и свинины разработаны вибрационные смесители периодического и непрерывного действия (частота колебаний 25 Гц, амплитуда колебаний 9 мм, скорость перемешивания 0,83 м/с). Изучали влияние различных способов виброперемешивания сырья на качественные характеристики готовой вареной колбасы, минуя операцию выдержки. По мнению Г. Е. Лимонова и др. применение вибрационного перемешивания, а тем более перемешивания под вакуумом создает предпосылки для исключения выдержки сырья в посоле,

что позволит комплексно механизировать и автоматизировать производство вареных колбас.

Автоматизация контроля процесса выдержки

Во время выдержки протекают физико-химические и биохимические процессы, которые можно контролировать реологическими методами.

Контроль можно осуществить, по экстремальным значениям реологических свойств биотехнологического сырья.

В настоящее время созревания, например, мелкого измельченного мясного сырья осуществляется в основном в специальных камерах, которые находятся в тазиках, высотой 0.20...0.25 м. Тазики с сырьем располагаются на стеллажах.

Рассмотрим один из возможных вариантов автоматизации процесса выдержки сырья. Для осуществления поставленной задачи путем периодического экспресс-контроля за состоянием сырья в каждом тазике, необходимо использовать в камерах, вместо стеллажей, конвейерную ленточную систему, движущиеся сверху вниз по спирали соответствующей скоростью. Время движения тазиков на конвейере должно соответствовать максимально возможной продолжительности выдержки соответствующего выбранного вида сырья. Величину продолжительности нахождения газиков на конвейере, можно регулировать путем изменения скоростей движения. Ее можно регулировать, зная длину ленточного конвейера, которая зависит от объема и геометрии камеры, и максимальную продолжительность выдержки сырья. Контроль за состоянием сырья в процессе выдержки можно осуществлять, как было сказано выше, по величине липкости, замеряемой адгезиометром периодически с определенным интервалом времени. Для получения достоверных и надежных показаний липкости, адгезиометр должен се определять при строго постоянных рациональных параметрах и условиях измерения: давления и продолжительности контактирования соответственно 3500 Па и 180 с контактирующая пластина из алюминия площадью $1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ и шероховатостью 40 мкм, скорость отрыв;» 0,003...0,01 м/с. Время контактирования 180с, соответствует процессу заполнения микро- и макро неровностей, релаксации и молекулярного взаимодействия. Высота выступов шероховатостей контактирующей пластины, соизмерима с размерами фарша.

Временной интервал измерения липкости задается в зависимости от требуемой точности определения оптимальной продолжительности выдержки. Если выдержка мясного сырья в зависимости от его состояния химического состава изменяется от 6 до 24 ч, то интервал можно выбрать в пределах от 1 до 2 ч; если от 6 до 12 — 0,5... 1 ч.

Тогда каждый тазик с сырьем и определенным номером, при движении по конвейеру в определенный момент времени, будет останавливаться и автоматически определится величина липкости на данный период времени. Величина липкости сырья находящегося в газике с определённым напором, заносится в компьютер или электронный блок памяти. В дальнейшем с помощью логического устройства полученные показания сравниваются с Предыдущими. Если последние два показания совпадают по абсолютной величине, т. е. зависимость липкости от времени выходит на прямолинейный участок, или происходит незначительный спад, т. с. образуется экстремальная точка, подается сигнал об окончании процесса выработки. При этом данный тазик с сырьем отводится на вторичный конвейер и подается в камеру готовности.

Таким образом, предложенная схема позволяет не только в автоматическом режиме контролировать процесс выдержки и качества сырья, но и оптимизировать. Оптимизация процесса заключается в том, что наилучшее, стабильное качество сырья получаем при минимальной продолжительности процесса. Данный вопрос на настоящее время еще полностью не изучен. Поэтому студенту; как будущему специалисту, предоставляется возможность для проведения дополнительных исследований по различным видам биотехнологических систем, определения других наиболее чувствительных реологических характеристик, (например, вязкости, предельного напряжения сдвига и др.) разработки конструктивных решений по автоматизации процесса выдержки.

2. Вопросы и задания для самоконтроля

1. Из каких трех операций состоит процесс созревания биотехнологического сырья?
2. Для чего нужен процесс мелкого измельчения сырья на волчках?

3. Что относится к входным и выходным параметрам волчка и как они связаны с качеством перерабатываемого сырья?
4. Как влияет усилие затяжки режущего инструмента волчка на его производительность и энергозатраты, а также на реологические и качественные характеристики измельченного сырья?
5. По какой зависимости можно рассчитать предельное напряжение сдвига измельченного на волчке мясного сырья с различной влажностью и жирностью?
6. Как влияет на качество измельченного сырья отсутствие автоматического контроля состояния подшипников на валу подающих шнеков?
7. Какие винты вы можете предложить по модернизации и усовершенствованию конструкции волчков с целью обеспечения качества измельченного сырья?
8. Какова цель перемешивания сырья с солью и возможные варианты контроля качества процесса?
9. Как изменяются реологические свойства мясного сырья в процессе выдержки?
10. Какие варианты интенсификации процесса созревания (посола) вы знаете?
11. Какие варианты вы можете предложить для автоматизации процесса выдержки?

Практическое занятие №20 Оптимизация и автоматизация процесса перемешивания биотехнологических систем

План занятий

1. Теоретическая часть
2. Вопросы и задания для самоконтроля

1. Теоретическая часть

Оптимизация и автоматизация процесса перемешивания биотехнологических систем

Перемешивание колбасных фаршей — это процесс обработки не-однородной системы с целью равномерного распределения компонентов и целенаправленного изменения ее свойств.

В процессе перемешивания дисперсных биотехнологических систем, состоящих из дисперсной среды (гомогенно однородные системы в виде мясного и рыбного фарша, молочной структурированной и вязко-пластичной основы: йогурт, пудинги, творожно-сырковая и сырная масса и др.) и дисперсной фазы в твердом, жидком и газообразном состоянии (шпик, соль, орехи, изюм, вишня, чернослив, различные виды сиропов и др.), должны получить продукт с равномерным распределением в нем компонентов. Использование газовой фазы способствует уменьшению плотности, созданию пышной воздушной консистенции продукта.

Для создания определенного цвета и аромата используют в основном жидкообразную дисперсную фазу в виде соков и сиропов из различных ягод и фруктов. Путем изменения количества добавляемой дисперсной фазы и выбора ее вида, можно создавать продукт с определенным качеством, минеральным и витаминным составом, т. е. создавать продукт лечебно-профилактического назначения с заданной консистенцией.

Рассмотрим наиболее сложный процесс перемешивания на примере колбасного фарша со шпиком, в котором необходимо дополнительно учитывать степень предварительного измельчения дисперсной среды. При производстве вареных колбасных изделий без шпика перемешивание можно осуществлять в машинах тонкого измельчения. При выработке вареных колбасных изделий со шпи-

ком необходимо дополнительно смеси ватт, фарш со шпиком. Если фарш достиг своих оптимальных значений при тонком измельчении, то в процессе перемешивания вследствие дополнительного механического воздействия могут произойти нежелательные изменения свойств, выходящие за пределы рациональных и оптимальных значений. Это обуславливает необходимость постоянного контроля за изменением структурно-механических свойств, обеспечивая их оптимальные значения на последней стадии механической обработки. Для перемешивания фарша со шпиком применяют фаршемешалки и смесители, которые при помощи различных рабочих органов (лопасти, спирали и др.) равномерно распределяют шпик по всему объему мешалки (дежи). Конструкции перемешивающих устройств должны удовлетворять следующим требованиям: не иметь зон застоя («мертвых зон») продукта в емкости; иметь минимальные зазоры между лопастями и емкостью (дежой); остальные требования аналогичны требованиям, предъявляемым к машинам для тонкого измельчения.

Процессы тонкого измельчения и перемешивания неотделимы друг от друга при приготовлении фарша для шпиковых колбас. Универсальные машины позволяют осуществлять оба процесса. В машинах и аппаратах, предназначенных для перемешивания фарша с компонентами, не контролируют структурно-механические свойства и степень равномерности распределения компонентов по всей массе продукта.

Процесс перемешивания дисперсионной среды (фарш без шпика) с дисперсной фазой (шпик) колбасного фарша

Куттирование и перемешивание с точки зрения физико-механических изменений — процессы аналогичные. Отличие состоит только в различной продолжительности воздействия рабочих органов на фарш.

Это утверждение исходит из анализа сил, действующих на рабочие органы. По существующей технологии процесс тонкого измельчения фарша заканчивается при рациональной степени измельчения, обеспечивающей при данных технологических характеристиках (влажности и жирности) минимальные потери в процессе термической обработки. Изменения структурно-механических свойств в процессе перемешивания и тонкого из-

мельчения аналогичны. Это объясняется тем, что в обоих процессах мышечные волокна набухают и уменьшаются в размерах в первом случае за счет резания, а во втором — перетиранья. Основной целью механической обработки является получение фарша с максимальными прочностными свойствами и равномерным распределением шпика на окончательной стадии фарше приготовления — перемешивании.

Для оптимизации процессов топкого измельчения и перемешивания необходимо решить две задачи: 1) определить минимальную продолжительность перемешивания, когда шпик равномерно распределится; 2) получить фарш с наибольшими прочностными свойствами, обеспечивающими максимальную валагопоглощаемость и минимальные потери при термообработке. Рассмотрим методику решения поставленных задач.

Влияние продолжительности перемешивания на распределение шпика в фарше.

Для решения первой задачи были поставлены эксперименты на фаршемешалке Л5-ФМБ. Шпик вначале измельчали на шпигорезке ФШМ-2 в виде кубиков размером 6х6х6мм. В предварительных экспериментах пробы отбирали в десяти точках через каждые 2 мин перемешивания. Они показали, что содержание шпика изменяется одинаково в точках, симметричных относительно поперечной оси емкости. В дальнейшем пробы отбирали в пяти точках (четыре угловые и одна центральная при рассмотрении половины емкости). Масса каждой пробы 0,1...0,12 кг. Минимальная масса пробы для фаршей чайной, любительской и московской колбас соответственно 0,022; 0,011; 0,013 кг.

Степени однородности структуры определяли по формуле

$$\beta = \frac{c - c'}{c}, \quad (6.35)$$

где β — степень однородности структуры (при условии идеального перемешивания $\beta = 1$, практического — $\beta = 0,8...0,9$); c — заданная концентрация, c' — среднеарифметическое отклонение от заданной концентрации, измеренное в нескольких точках перемешиваемого объема.

Среднеарифметическое значение отклонения от заданной концентрации, измеренное в нескольких точках объема, определяли по формуле

$$c' = \frac{\sum_{i=1}^n (c - c_i)}{n_i}, \quad (6.36)$$

где C_i — концентрация шпика в данной пробе; n — количество проб.

Фарш готовили по общепринятой технологии. Консистенцию варьировали различными количествами добавляемой воды и льда и характеризовали предельным напряжением сдвига, измеряемым на пенетрометре ПП-ЗМ. Из-за различия в составах и количествах шпика требуемая степень однородности фаршей достигается за разное время (**рис. 1**).

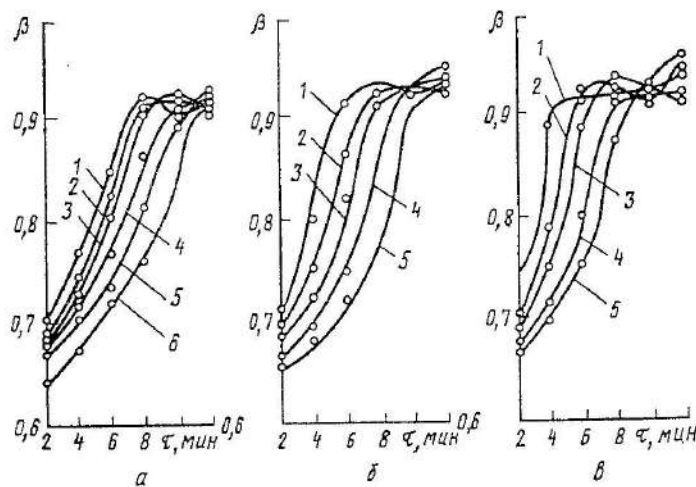


Рис. 1 Зависимость степени однородности различных видов фарша от продолжительности перемешивания и предельного напряжения сдвига:

а — фарш чайной колбасы ($c = 10\%$): 1 — 220 Па; 2 — 226 Па; 3 — 240 Па; 4 — 250 Па; 5 — 300 Па; 6 — 330 Па;

б — фарш московской колбасы ($c = 18\%$): 1 — 185 Па; 2 — 220 Па; 3 — 235 Па; 4 — 285 Па; 5 — 310 Па;

в — фарш любительской колбасы ($c = 25\%$): 1 — 170 Па; 2 — 206 Па; 3 — 225 Па; 4 — 250 Па; 5 — 280 Па

Анализ экспериментальных данных (см. **рис. 1**) показывает, что требуемая однородность распределения шпика быстрее достигается в фарше, где предельное напряжение сдвига меньше, т. е. консистенция его более жидкая. Время, при котором достигается заданная степень однородности, является минимальной технологи-

ческой продолжительностью перемешивания $\tau_{мл}$, которую можно получить из графических зависимостей (см. рис. 1).

Для выявления характера изменения $\tau_{м.т} = f_0(\theta_0, c)$ построена графическая зависимость (рис. 2), при которой в производственных условиях фарш считается практически однородным. Математическая обработка этих данных позволила получить аналитическую зависимость

$$\tau_{м.т} = \exp[a_1 \theta_0 + 2,3 \exp(a_2 c + a_3)], \quad (6.37)$$

где a_1, a_2, a_3 — эмпирические коэффициенты (при $\beta = 0,8$ — $a_1 = 6,6 \cdot 10^{-3}$; $a_2 = 9,59$; $a_3 = 1,41$; при $\beta = 0,9$ — $a_1 = 5,57 \cdot 10^{-3}$; $a_2 = 2,05$; $a_3 = 0,91$).

Данная зависимость применима при $\theta_0 = 170 \dots 310 \text{ Па}$, $c = 0,1 \dots 0,25 \text{ кг}$ шпика на 1 кг сырья. Из нее видно, что чем больше c и меньше θ_0 , тем меньше требуется времени для достижения заданной однородности, и наоборот.

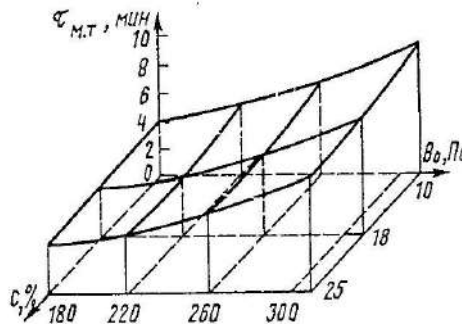


Рис. 2 Зависимость минимальной продолжительности перемешивания от предельного напряжения сдвига и содержания шпика (при $\beta = 0,8$)

Влияние продолжительности механической обработки на изменение предельного напряжения сдвига. Для решения второй задачи необходимо определять степень недоизмельчения колбасного фарша, чтобы при минимальной технологической продолжительности перемешивания он достиг экстремальных структурно-механических свойств. Тонкое измельчение фарша проводили на куттере Л5-ФКН. Степень измельчения была выбрана от начала образования первичной структуры фарша (3 мин) до его окончания, т. е. до рациональной продолжительности измельчения (5...6 мин). В результате экспериментов было установлено, что чем больше сте-

пень недоизмельчения фарша, тем больше требуется времени для достижения экстремальных значений предельного напряжения сдвига в процессе перемешивания. Изменение предельного напряжения сдвига фаршей с различным влагосодержанием и жирностью в зависимости от продолжительности перемешивания и степени тонкого измельчения представлено на **рис. 3**

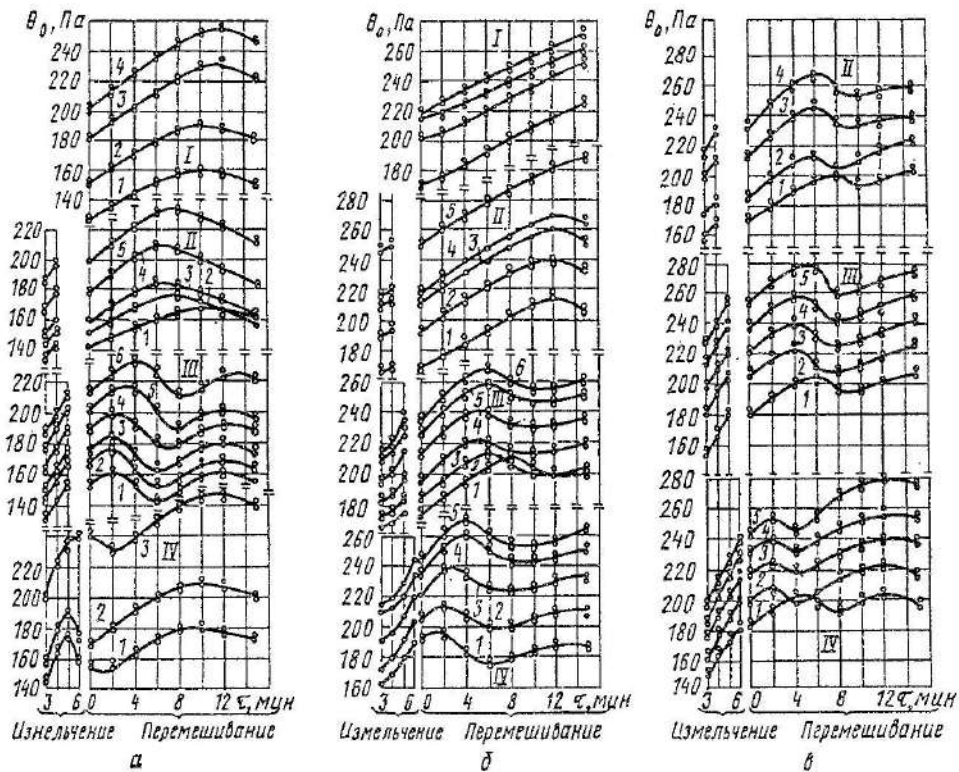


Рис. 3 Зависимость предельного напряжения сдвига от длительности механической обработки, влагосодержания и жирности фарша (номера кривых соответствуют характеристикам фарша, указанным в табл. 6.10):
а — любительский; б — московский; в — чайный

Технологические характеристики этих видов фаршей показаны в **табл. 1** При проведении экспериментов фарш куттеровали 3, 4, 5 и 6 мин. При этом фарш чайной и московской колбас не достигал своих рациональных значений (рис. 3), а фарш любительской колбасы при куттеровании в течение 6 мин получался перекуттерованным (см. **рис. 3**).

После тонкого измельчения фарш перемешивали. Процесс перемешивания фарша на основании экспериментальных данных можно разделить на четыре периода. Первый период перемешивания является как бы продолжением первого периода куттерования.

Происходит смятие частиц, влага переходит в более связанное состояние. Значения предельного напряжения сдвига возрастают до некоторого максимального значения, структура фарша упрочняется. При дальнейшем перемешивании — второй период — процесс протекает аналогично второму периоду куттерования. Температура фарша повышается. Происходит аэрирование массы и эмульгирование частиц. Однако продолжительность второго периода невелика.

Таблица 1 Технологические характеристики фарша (в долях единицы) с различной степенью предварительного куттерования для различных видов колбас

Индекс рисунка	Продолжительность предварительного тонкого из-	Номер кривой на рис. 6.34	Колбаса					
			любительская		московская		чайная	
			Влагосо- держание	Жир- ность	Влагосо- держание	Жир- ность	Влагосо- держание	Жир- ность
I	180	1	2,6206	0,1694	3,3440	0,1024	—	—
		2	1,8740	0,2149	3,1322	0,1210	—	—
		3	2,3750	0,1570	2,7188	0,1240	—	—
		4	1,9525	0,1821	2,4880	0,1225	—	—
II	240	1	2,6550	0,1675	3,8614	0,0809	3,4484	0,1107
		2	1,9647	0,2100	3,1946	0,1077	3,1771	0,1151
		3	2,3761	0,1774	3,0469	0,1100	3,0486	0,1158
		4	2,0712	0,1921	2,8139	0,1176	2,6684	0,1292
		5	2,3636	0,1564	2,6603	0,1181	—	—
III	300	1	2,6202	0,1694	3,8286	0,0862	3,4250	0,1119
		2	2,2051	0,1899	3,6062	0,0962	3,1719	0,1097
		3	2,6232	0,1572	3,4209	0,1028	3,0486	0,0116
		4	2,4246	0,1664	3,1946	0,1077	2,3711	0,0148
		5	2,3979	0,1612	3,0339	0,1146	2,3711	0,1493
		6	2,7120	0,1852	2,7908	0,1188	—	—
IV	360	1	1,9647	0,2100	4,0906	0,0806	3,4250	0,0112
		2	1,8740	0,2149	4,0487	0,0709	3,4484	0,0111
		3	1,9516	0,1923	3,2158	0,1037	3,1771	0,0115
		4	—	—	3,0429	0,1100	3,0486	0,1137
		5	—	—	2,7188	0,1236	3,0486	0,0111

В третьем периоде перемешивания происходит дальнейшее упрочнение структуры (см. рис. 3). Предельное напряжение сдвига увеличивается до некоторого максимального значения. При этом капельки жира сливаются и происходит дальнейшее аэрирование всей массы, фарша. При слиянии жировых капелек белковая фракция, вероятно, более стойко удерживает влагу, упрочняя структуру. Слияние жировых капелек можно объяснить, проводя аналогию с процессом маслообразования, с точки зрения кавитационной теории проф. В. Д. Суркова и физико-химической флотационной теории А. П. Белоусова. Отсутствие агрегатирования жировых капелек при куттеровании объясняется тем, что рабочие режущие органы измельчающей машины вращаются с очень большой скоростью (до 3000 мин^{-1}), превышающей

период релаксации фарша, постоянно разбивая и эмульгируя жировые частицы, не давая им объединяться в более крупные. Четвертый период характеризуется уменьшением значений предельного напряжения сдвига. Прочность структуры снижается. Снижение прочности можно объяснить, по-видимому, дальнейшей аэрацией фарша. Большое количество воздушных пузырьков способствует разрыхлению фарша, увеличению его объема.

Проведенные гистологические исследования по изучению изменения микроструктуры фарша в процессе перемешивания подтверждают вышесказанное.

Готовая колбаса с наилучшими качественными характеристиками получается из фарша, значения предельного напряжения сдвига которого достигли максимальных значений в конце первого периода перемешивания. Продолжительность перемешивания, когда значение предельного напряжения сдвига достигло экстремального значения, будет рациональной величиной t , и значения предельного напряжения сдвига, достигнутые к этому времени, будут рациональными. Значение рациональной продолжительности перемешивания зависит от степени предварительного куттерования, влагосодержания, жирности и состава сырья.

В различных экспериментах влагосодержание и жирность фарша значительно колебались, что вызывало изменение структурно-механических свойств. Поэтому продолжительность перемешивания фарша с различной степенью измельчения различна. При увеличении влагосодержания и жирности фарша значения предель-

ного напряжения сдвига уменьшаются по экспоненциальной зависимости, белки быстрее насыщаются влагой и занимают более устойчивое положение в результате снижения внутреннего трения между частицами.

Следовательно, при увеличении влагосодержания до оптимального значения рациональная продолжительность перемешивания фарша уменьшается. Дальнейшее повышение влагосодержания ведет к увеличению рациональной продолжительности перемешивания. Это можно объяснить утолщением водно-белковых прослоек между частицами и, следовательно, уменьшением сил сцепления между элементами структуры (**табл. 2**).

Таблица 2 Взаимосвязь рациональной продолжительности перемешивания от степени предварительного измельчения фарша для различных видов колбас

Фарш колбасы	Колебание предельного напряжения сдвига	Рациональная продолжительность перемешивания (в мин) при продолжительности предварительного измельчения, мин			
		3	4	5	6
Московской	.300	Свыше 15	12...15	6...8	.2-4
Чайной	.270		.8	.6	.1-3
Любительской	.240	10...12	.8	.4	Пере измельчение

При куттеровании фарша любительской колбасы в течение 6 мин наблюдается переизмельчение фарша (рис. 3, I, IV). Дальнейшее перемешивание приводит к образованию другой структуры, соответствующей третьему и четвертому периоду перемешивания.

Изменения значений активности воды a_w фарша при его механической обработке (рис. 4, а) аналогичны изменениям предельного напряжения сдвига, но их графические зависимости обратно пропорциональны. Экстремальных значений активность воды достигает за то же время, что и предельное напряжение сдвига.

Энергию связи влаги с материалом определяли по методике проф. А. С. Гинзбурга по зависимости

$$L_w = -RT \ln a_w,$$

где L_w — энергия связи влаги с материалом, Дж/моль; R — газовая постоянная, Дж/(моль · К) [$R = 8,31$ Дж/(моль · К)]; T — абсолютная температура, К.

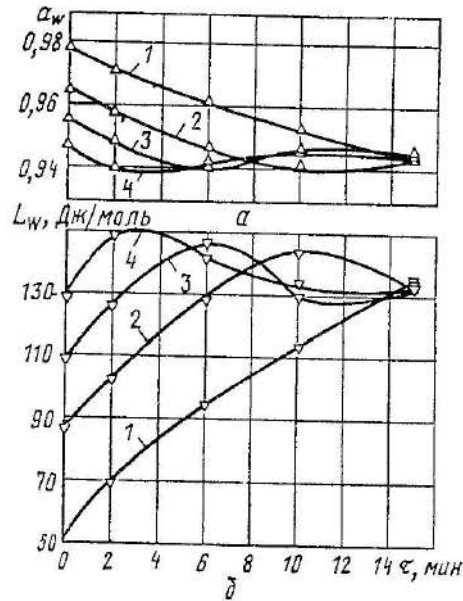


Рис. 4 — Изменение характеристик фарша московской колбасы от продолжительности перемешивания и степени предварительного куттерования:

a — активность воды; b — энергия связи влаги с материалом: 1 — 180 с; 2 — 240 с; 3 — 300 с; 4 — 360 с; $\theta_0 = 270$ Па, влажность 0,731...0,738, жирность 0,118...0,124

Значения энергии связи влаги с материалом при механической обработке изменяются (рис. 4, б) аналогично изменению предельного напряжения сдвига (см. рис. 3). Наибольшая величина энергии связи влаги с материалом наблюдается у фарша с рациональными значениями предельного напряжения сдвига. Аналогично изменяются значения предельного напряжения сдвига при перемешивании тонкоизмельченных фаршей на машинах непрерывного действия на агрегате Кб АТИМ-2 и на линии, включающей агрегат ФАД, ротационный насос, вторичный тонкий измельчитель фарша ФКО-2 (рис. 5).

Исследования изменения активности воды и энергии связи влаги с материалом, проведенные при перемешивании фарша чай-

ной колбасы на агрегате ФАД, показали, что они достигают своих рациональных (экстремальных) значений за то же время, что и предельное напряжение сдвига (см. рис. 5).

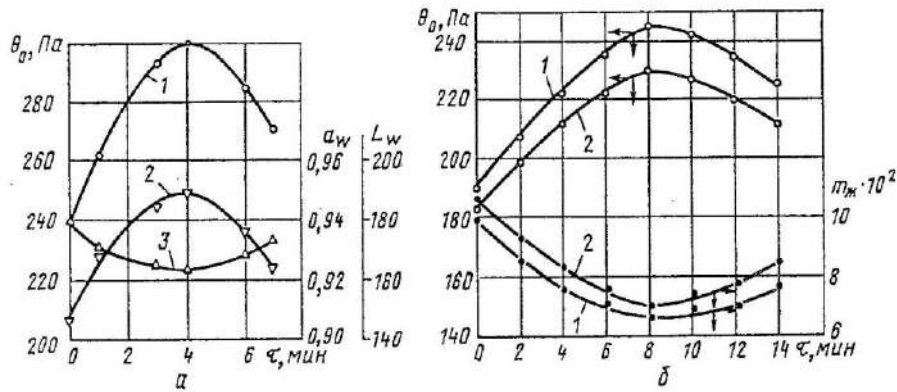


Рис. 5 Изменение характеристики фарша чайной колбасы, предварительно измельченного, от продолжительности перемешивания:

a — на линии, имеющей ФАД: 1 — θ_0 ; 2 — L_w ; 3 — a_w ($W=0,721$, $\varphi=0,118$);
b — на агрегате К6 АТИМ-2: 1 — $W=0,725$, $\varphi=0,111$; 2 — $W=0,761$, $\varphi=0,109$

Оптимальные значения предельного напряжения сдвига в зависимости от влагосодержания и содержания жира изменяются по экспоненциальному закону для любого вида фарша. Замена мясного сырья в количестве более 15% растительными добавками резко понижает консистенцию фарша, оцениваемую по величине предельного напряжения сдвига. Приведение значений предельного напряжения сдвига и продолжительности механической обработки к их рациональным значениям позволило получить обобщенную зависимость изменения относительных значений предельного напряжения сдвига от изменения относительной длительности механической обработки для фаршей, обрабатываемых на любом агрегате.

$$\frac{\theta_0}{\theta_{ор}} = 0,761 \exp \left[0,559 \frac{\tau_K^*}{\tau_{кр}^*} - 0,286 \left(\frac{\tau_K^*}{\tau_{кр}^*} \right)^2 \right] \quad (6.38)$$

ИЛИ

$$\ln \frac{\theta_0}{\theta_{ор}} = -0,273 + 0,559 \frac{\tau_K^*}{\tau_{кр}^*} - 0,286 \left(\frac{\tau_K^*}{\tau_{кр}^*} \right)^2 \quad (6.39)$$

Дробь в этих уравнениях характеризует собой безразмерную длительность механической обработки и $T^*_K/V_{кр} = (T_K - 3)/(T_{кр} - 3)$. Вычитаемое 3 — продолжительность подготовительного периода куттерования. Этот период определяет дальнейший процесс, но является неустановившимся. Его нельзя охарактеризовать объективно, так как продукт неоднороден.

Уравнение (6.39) в приведенном виде аналитически описывает два первых основных периода механической обработки. В этом уравнении второй член описывает образование первичной структуры, а третий член — разрушение первичной и образование вторичной. Оба процесса протекают одновременно, накладываясь друг на друга.

Графическое наложение кривых дает кривую с наличием экстремума, типичную для изменения предельного напряжения сдвига при механической обработке. Относительная продолжительность тонкого измельчения фарша связана с минимальной технологической продолжительностью перемешивания. Графическая зависимость показана на рис. 6

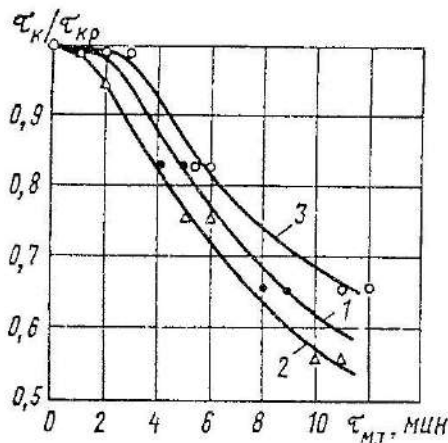


Рис. 6. Зависимость минимальной продолжительности перемешивания от степени предварительного куттерования:
 1 — фарш чайной колбасы; 2 — фарш московской колбасы; 3 — фарш любительской колбасы

Методика расчета оптимального режима приготовления фарша для колбас со шпиком

Предлагается два метода расчета оптимального режима механической обработки (тонкого измельчения и перемешивания) фарша для колбас со шпиком.

Порядок расчета по первому методу сводится к определению: оптимального влагосодержания фарша в первом приближении зная исходные технологические характеристики (влагосодержание и жирность) фарша; минимальной продолжительности перемешивания при которой достигается заданная степень однородности (0,8...0,9); величины $t_k/t_{кр}$ находим по рис. 6.37 для заданного вида фарша при известной продолжительности перемешивания; оптимальной продолжительности измельчения; продолжительности предварительного измельчения фарша перед его перемешиванием со шпиком по произведению величины (x_x/C_p) на $t_k^{0ПТ}$ при $t_{кр} = t_k^{0ПТ}$.

Таким образом, предложенная методика определения оптимального режима механической обработки (тонкого измельчения, перемешивания) фаршей для колбас со шпиком позволяет рационально организовать и сократить длительность механической обработки, получить фарш с максимальными прочностными свойствами и равномерно распределенными компонентами.

Автоматизация контроля качества колбасного фарша со шпиком при механической обработке

Целью перемешивания является получение колбасного фарша с максимальными структурно-механическими свойствами и с определенной степенью однородности распределения шпика и других компонентов по всему объему.

На основании рассмотренных исследований процесса перемешивания установлено, насколько надо недоизмельчить фарш при тонком измельчении, чтобы при минимальном времени перемешивания, необходимом для равномерного распределения шпика по всему объему фаршемешалки, получить продукт с заданными эталонными свойствами. Таким образом, для автоматизации процесса перемешивания необходимо применение как минимум двух типов приборов.

Для выполнения первой задачи — получения колбасного фарша с заданной степенью измельчения — на базе прибора по за-

меру структурно-механических свойств в потоке разработано устройство, показанное на рис. 7

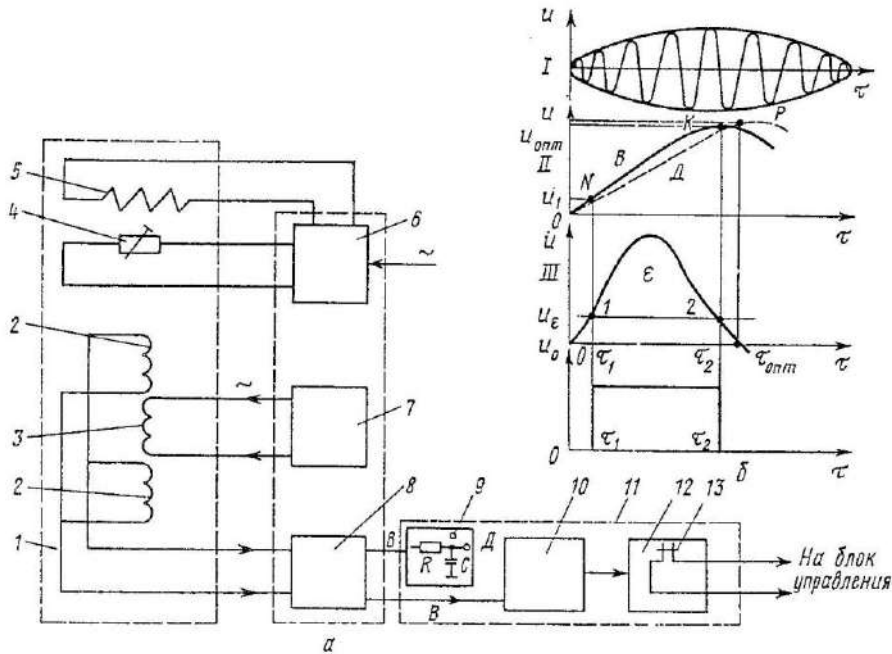


Рис. 7 Устройство для контроля процесса измельчения колбасных фаршей:
a — электрическая схема: 1 — корпус индукционного преобразователя; 2, 3 — вторичные и первичная обмотки индукционной катушки; 4 — термосопротивление; 5 — термоэлемент; 6 — терморегулятор; 7 — генератор; 8 — усилитель-преобразователь; 9 — RC-цепочка; 10 — разностный каскад; 11 — блок задания степени измельчения; 12 — пороговое устройство срабатывания; 13 — контактное реле;
б — графическая схема работы устройства

Оно снабжено счетным регулятором массы индукционного преобразователя и блоком задания степени измельчения.

Блок содержит последовательно включенные сопротивления, разностный каскад и пороговый блок срабатывания. Усилитель-преобразователь электрических сигналов имеет два выхода: один подключен к цепочке сопротивлений блока задания степени измельчения, другой — к разностному каскаду. Для повышения точности измерительного устройства рифленая контактирующая часть корпуса имеет вид сменных пластин, что позволяет (в зависимости от типа куттера) ставить пластины с дугообразными рифлениями, имеющими радиус закругления, равный радиусу средней части чаши куттера, где установлено устройство. Использование таких рифлений уменьшает погрешность измерения устройством за счет возникновения касательных напряжений. Для ликвидации проскальзывания предусмотрено регулирование силы контактирования.

Устройство работает следующим образом. Его располагают на корпусе измельчителя. Включают генератор и с помощью регулировочного винта фиксируют нулевое положение. При контроле измельчения фарша колбас со шпиком по известным характеристикам изменения реологических свойств при измельчении и перемешивании устанавливают напряжение и (порог срабатывания), соответствующее определенной степени измельчения для каждого вида продукта с учетом того, чтобы получить оптимальные свойства фарша за время перемешивания. Индукционный преобразователь помещают в чашу куттера на поверхность предварительно измельченного фарша, и куттер включают в работу.

Электрический сигнал от генератора поступает на первичную катушку индукционного преобразователя. В результате взаимодействия контактирующей части индукционного преобразователя с поверхностью контролируемого продукта при вращении куттера корпус вместе с сердечником, образованным двумя стержнями, перемещается относительно индукционной катушки. В результате такого перемещения на вход усилителя-преобразователя поступает электрический сигнал переменного напряжения. Величина этого сигнала пропорциональна перемещению сердечника внутри катушки индукционного преобразователя. Затем на выходах усилителя-преобразователя формируются два подобных сигнала постоянного напряжения; один подается на вход jRC -цепочки. С увеличением степени измельчения этот сигнал возрастает. В результате конденсатор C и jRC -цепочки заряжаются током, протекающим через сопротивление R .

Напряжение на конденсаторе C растет медленнее, чем входное напряжение jRC -цепочки, из-за ограничения тока заряда конденсатора сопротивлением R . В результате сигнал B , выходящий из LC -цепочки, имеет вид D в положении II (см. **рис. 7, б**). Оба сигнала B и D поступают на два входа разностного каскада, где формируется сигнал e , пропорциональный разности сигналов B и D (положение III). После включения куттера в работу контактное реле находится в разомкнутом состоянии, что соответствует отрезку $0-t_1$ (положение IV). По достижении напряжения u_x (положение II , точка N) в соответствии с установленным порогом срабатывания u_2 (положение III) контактное реле замыкается, находясь в таком положении на протяжении всего интервала времени (t_1-t_2). При достижении

контролируемым продуктом заданной степени измельчения (точка K , положение II) напряжение u_2 соответствует установленному порогу срабатывания m_3 , контактное реле размыкает электрическую цепь работы куттера. Если при измельчении необходимо получить фарш с оптимальными свойствами, как это требуется при измельчении фарша бесшпиковых колбасных изделий, необходимость в регулировке порога срабатывания отпадает. В таком случае его устанавливают на нуль ($и_0$ в положении III). Контактное реле срабатывает, останавливая куттер после приобретения фаршем оптимальных реологических свойств (точка K , положение II).

учетом того, чтобы получить оптимальные свойства фарша за время перемешивания. Индукционный преобразователь помещают в чашу куттера на поверхность предварительно измельченного фарша, и куттер включают в работу.

Электрический сигнал от генератора поступает на первичную катушку индукционного преобразователя. В результате взаимодействия контактирующей части индукционного преобразователя с поверхностью контролируемого продукта при вращении куттера корпус вместе с сердечником, образованным двумя стержнями, перемещается относительно индукционной катушки. В результате такого перемещения на вход усилителя-преобразователя поступает электрический сигнал переменного напряжения. Величина этого сигнала пропорциональна перемещению сердечника внутри катушки индукционного преобразователя. Затем на выходах усилителя-преобразователя формируются два подобных сигнала постоянного напряжения; один подается на вход jRC -цепочки. С увеличением степени измельчения этот сигнал возрастает. В результате конденсатор C и jRC -цепочки заряжаются током, протекающим через сопротивление R .

Напряжение на конденсаторе C растет медленнее, чем входное напряжение jRC -цепочки, из-за ограничения тока заряда конденсатора сопротивлением R . В результате сигнал B , выходящий из ЛС-цепочки, имеет вид Дв положении II (см. рис. 7, б). Оба сигнала B и D поступают на два входа разностного каскада, где формируется сигнал e , пропорциональный разности сигналов B и D (положение III). После включения куттера в работу контактное реле находится в разомкнутом состоянии, что соответствует отрезку $0—t_1$ (положение IV). По достижении напряжения u_x (положение II , точка N) в

соответствии с установленным порогом срабатывания u_2 (положение *III*) контактное реле замыкается, находясь в таком положении на протяжении всего интервала времени (t_1 — t_2). При достижении контролируемым продуктом заданной степени измельчения (точка *K*, положение *II*) напряжение u_2 соответствует установленному порогу срабатывания m_3 , контактное реле размыкает электрическую цепь работы куттера. Если при измельчении необходимо получить фарш с оптимальными свойствами, как это требуется при измельчении фарша бесшпиковых колбасных изделий, необходимость в регулировке порога срабатывания отпадает. В таком случае его устанавливают на нуль (i_0 в положении *III*). Контактное реле срабатывает, останавливая куттер после приобретения фаршем оптимальных реологических свойств (точка *K*, положение *II*).

Таким образом, устройство позволяет контролировать процесс измельчения и управлять работой измельчителей в зависимости от изменения реологических свойств при подготовке фаршей как шпиковых, так и бесшпиковых колбасных изделий. Устройство позволяет получать фарш с различной заданной степенью измельчения, регулируемой блоком задания степени измельчения. При этом экономятся энергетические затраты на измельчение за счет подбора оптимального времени измельчения. Для выполнения второй задачи — получение фарша с равномерным распределением компонентов (например, шпика) по всему объему — В. Д. Косым, А. К. Какимовым и др. разработано устройство для контроля перемешивания гетерогенных систем на основе изучения данных проводимости электрического тока компонентами колбасного фарша и шпика. Оно просто в обращении и позволяет осуществлять объективный контроль и автоматическое регулирование в процессе перемешивания. На **рис. 8** представлена электрическая схема устройства, которое снабжено четырьмя парами контактных пластин, расположенных на различном уровне в продукте и попарно включенных в четырехплечевые электрические мосты. Каждый из мостов подсоединен посредством согласующего трансформатора и диода к регистрирующему прибору. Расстояние между парами пластин одинаковое. Контактные пластины должны быть расположены в различных точках и соприкасаться всей поверхностью с перемешиваемым продуктом. При нажатии на кнопку включения переменный ток поступает на сетевой трансформатор, и вся схема оказыва-

ется под напряжением. При отсутствии разбаланса мостов, что возможно в случае одинаковой проводимости исследуемого продукта (продукт однороден) между парами контактных пластин, на выходе согласующих трансформаторов сигнала не будет — показание регистрирующего прибора равно нулю.

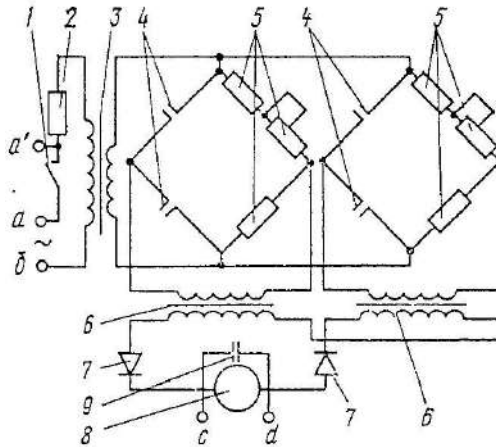


Рис. 8 Электрическая схема устройства для контроля перемешивания гетерогенных систем:

1 — кнопка включения; 2 — предохранитель; 3 — сетевой трансформатор; 4 — контактные пластины; 5 — резисторы; 6 — согласующие трансформаторы; 7 — диоды; 8 — регистрирующий прибор; 9 — конденсатор; *а*, *а'* — клеммы соответственно для подключения прибора или автоматической системы; *с*, *д* — клеммы для автоматического отключения мешалки

При неодинаковой проводимости исследуемого продукта между любыми парами контактных пластин мосты будут разбалансированы, что вызовет сигнал на вторичных обмотках согласующих трансформаторов. В результате по цепи, образованной вторичными обмотками этих трансформаторов, диодами, конденсатором и регистрирующим прибором, пройдет ток, величина которого будет зависеть от неоднородности - продукта. Данное устройство можно использовать в системах автоматического контроля степени однородности исследуемого продукта при перемешивании, например, устанавливая это на мешалке. Напряжение подается на измерительную электрическую схему устройства помимо кнопки включения к клемме *а'* от главного выключателя мешалки. К клеммам *с* и *д* должен быть подключен автоматический двухпозиционный потенциометр с отклонением стрелки в обе стороны. Когда шпик равномерно распределится ($p = 1$), т. е. при отсутствии сигнала на клеммах *с*, *д* (полный баланс мостов) или при заданной степени одно-

родности ($p = 0,8...0,9$), когда сигнал подается в определенном заданном пределе, двухпозиционный потенциометр отключает питание привода мешалки.

2. Вопросы и задания для самоконтроля

1. Как взаимосвязаны процессы перемешивания и тонкого измельчения?
2. Какая основная цель механической обработки многокомпонентных вязко-пластичных систем?
3. Как определяется степень однородности фарша со шпиком?
4. По какой зависимости можно определить минимальную продолжительность перемешивания при различной степени однородности?
5. Как влияет продолжительность тонкого измельчения и дальнейшее перемешивание на изменения консистенции фарша, оцениваемой величиной предельного напряжения сдвига?
6. Как взаимосвязаны минимальная продолжительность перемешивания со степенью измельчения дисперсионной среды?
7. Какова последовательность расчета оптимального режима механической обработки (включающей получение дисперсионной среды в процессе тонкого измельчения и перемешивание ее с твердой дисперсной фазой) дисперсных систем?
8. Каковы возможности автоматизации процесса механической обработки многокомпонентных дисперсных систем?

Практическое занятие №21 Оптимизация и автоматизация процесса тонкого измельчения биотехнологического сырья

План занятий

1. Теоретическая часть
2. Вопросы и задания для самоконтроля

1. Теоретическая часть

При тонком измельчении частицы мясного и рыбного фарша для вареных колбас должны связывать такое количество воды, которое превращает их в однородную гомогенную массу с максимальной водосвязывающей способностью, обладающую определенными структурно-механическими свойствами, в то время как фарш для полукопченых и сырокопченых колбас должен обладать минимальной водосвязывающей способностью, что способствует более быстрому удалению влаги из продукта в процессе его сушки.

От правильности выполнения этой операции и получения хорошей консистенции фарша зависят выход и качество готовой продукции. Процесс резания при тонком измельчении выполняют на высоких скоростях, режущих органов. Он сопровождается выделением большого количества тепла, что вызывает повышение температуры сырья и может привести к денатурации белков, изменению водосвязывающей способности и структурно-механических свойств продукта.

Эти обстоятельства обуславливают необходимость правильного расчета оптимальной продолжительности измельчения и соблюдения постоянства геометрических и механических характеристик режущих органов машин. Основной целью процесса тонкого измельчения является получение однородной структуры с заданной степенью измельчения колбасного фарша, обладающего максимальной или минимальной влагосвязывающей способностью и обеспечивающего наилучшее качество готовых изделий.

Машины, используемые для тонкого измельчения

При тонком измельчении на качество готовых изделий влияет тип измельчающей машины (куттер, куттер-мешалка, коллоидная мельница, эмульсификатор, агрегаты непрерывного действия и пр.). Хотя процессы во всех машинах протекают аналогично, оптимальная продолжительность измельчения, при которой физические

свойства и технологические характеристики продукта имеют экстремальные значения, различна и зависит от кинематических характеристик машин. Фаршесоставитель наблюдает за образованием структуры фарша и органолептически определяет окончание процесса. Поэтому от квалификации фаршесоставителя во многом зависит качество готовых изделий. По вместимости чаши куттеры можно подразделить на три группы: лабораторные (вместимость чаши 8...20 л), малой (вместимость чаши 80...120л) и большой (вместимость чаши 200...350л) производительности. Некоторые куттеры снабжены приспособлением для изменения частоты вращения чаши и ножей, дозатором для автоматического отмеривания воды, подаваемой в чашу, термopарами для измерения температуры фарша, а также реле времени для автоматического отключения по истечении заданного времени работы. В вакуумных куттерах чашу герметично закрывают крышкой. Воздух отсасывают вакуум-насосом. Окончание процесса устанавливается фаршесоставителем или при помощи реле времени (кулер КЗЗО Vac Kremer Grebe).

Для тонкого измельчения мяса применяют также кулер-мешалки без вращающейся чаши, вместо которой установлена двухсекционная дежа с двумя спиральями. Она обладает рядом существенных преимуществ: объединяет две машины, а следовательно, и процессы кулерования и перемешивания, сокращает затраты труда на межоперационную транспортировку, расход электроэнергии, увеличивая при этом производительность. Машина состоит из двухсекционной дежи, в которой размещены две спиральные лопасти. Одна спиральная лопасть предназначена для подачи фарша к серповидным ножам, установленным в торцевой части дежи, а другая — для отвода фарша из зоны работы ножей и подачи его вновь в зону работы первой спиральной лопасти. Сбоку дежи находится окно с лотком для выгрузки фарша, которое закрывается заслонкой. Сверху дежи имеется крышка. В данной машине можно применять блокировку, описанную выше. Куттер-мешалка может работать как мешалка, если отключить измельчающее устройство с помощью заслонки. Последняя отделяет зону работы ножей от той части дежи, где работают спиральные лопасти. Зоны работы спиралей разделены продольной перегородкой, благодаря чему фарш получает направленное движение. Данную машину можно использовать для приготовления бесшпиковых колбас и колбас со шпиком.

Для получения гомогенных продуктов с высокой дисперсностью (сосиски, паштеты, продукты детского питания и др.) целесообразно применять машины для тонкого измельчения, которые создают большие сдвиговые деформации, высокие давления, вибрацию и другие механические и физические воздействия. Наиболее тонкое измельчение, заданную дисперсность и гомогенность продукта можно получить, используя коллоидные мельницы, которые обеспечивают непрерывное измельчение (куттерование) фарша. Коллоидная мельница состоит из станины, где размещен электродвигатель, корпуса режущего механизма, приемного бункера; патрубка для выхода готовой продукции и комплекта режущего механизма, состоящего из ротора и статора. Частота вращения ротора у зубчатой коллоидной мельницы MZ-80 фирмы «Фрима» составляет 3000 с^{-1} . Вследствие конусности ротора и его центробежного действия, продукт проталкивается через регулируемый размольный зазор. Между двумя зубчатыми поверхностями (статором и ротором) масса подвергается растяжению, сжатию, кавитационным ударам и трению. В результате происходят тонкое измельчение массы, эмульгирование жира, гомогенизация.

В корундовой мельнице в отличие от зубчатой на фарш воздействует комплекс разрушающих сил между двумя корундовыми поверхностями (ротор и статор). Размольный зазор у корундовой мельницы составляет $0,01 \text{ мм}$, у зубчатой — $0,35 \text{ мм}$. Частота вращения роторов зубчатой и корундовой коллоидных мельниц одинакова.

Интерес представляют машины для тонкого измельчения мяса непрерывного действия. Измельчительные машины совмещают грубое и тонкое измельчение мяса за один проход продукта. Особенностью этих машин является установка на одном валу двух измельчающих пар нож — решетка. При прохождении продукта через первую режущую пару происходит мелкое (грубое) измельчение, а через вторую — тонкое измельчение. Степень тонкого измельчения регулируют величиной зазора между решеткой и ножом или подачей продукта на режущую пару тонкого измельчения. Однако после этих машин не получают фарш с оптимальными характеристиками свойств. В зоне нож — решетка продукт перегревается, что вызывает нежелательные изменения белков.

Агрегат для тонкого измельчения мяса К6-АТИМ2 также используют при фаршесоставлении. Фарш, предварительно измельченный на волчке, смешивают с компонентами на месильной машине К6-ФММ 150 и подают на накопитель КВ-ФИФ 200. Из накопителя ротационным насосом фарш перекачивают в измельчитель КФ-ВМ2-М. Режущий механизм представляет собой пару нож — сетка. Физико-механические свойства продукта не контролируются. Для интенсификации процесса измельчения используют давление, вакуум, вибрацию.

Измельчение фарша на куттере

Для определения оптимальных режимов измельчения мяса в куттерах с различными геометрическими и кинематическими характеристиками необходимо знать зависимость изменения реологических свойств продукта от влаго- и жиросодержания, степени измельчения, растворимости белков, дисперсного состава фарша, энергетических характеристик процесса, а также выход и качество готовых изделий от продолжительности измельчения.

Влияние продолжительности кулерования колбасного фарша на их структурно-механические свойства, рассмотрим на примере «модельного» фарша (состоящего из различных соотношений говядины, свинины и шпика) и производственных композиций фарша для различных видов колбасных изделий (например, сосиски русские, сардельки говяжьи и свиные, колбаса докторская), содержащих различные количества говядины, свинины и жира.

Рассмотрим изменение комплексных реологических характеристик фарша от продолжительности (степени) измельчения на кулерах малой (емкость чаши 80 л) и большой (емкость чаши 240 л) моделях. Мясное сырье использовали измельченное на волчке с решеткой, диаметр отверстий которой 3 мм, посоленное (2 % соли) и выдержанное в камере при 4°С. Выдержанное мясо закладывали в чашу кулера в количестве 100 кг. К говядине добавляли 50% нормы воды и льда и измельчали 0,5... 1 мин, затем добавляли свинину, специи и остальные воду и лед. В процессе измельчения отбирали пробы фарша для определения реологических и технологических характеристик.

Характер изменения структурно-механических свойств фарша в зависимости от продолжительности измельчения и влагосодержания рассмотрим на примере русских сосисок, состоящих из 50 %

говядины и 50 % свинины (рис. 6.14). Характеристика (в долях единицы) фарша приведена в табл. 6.2.

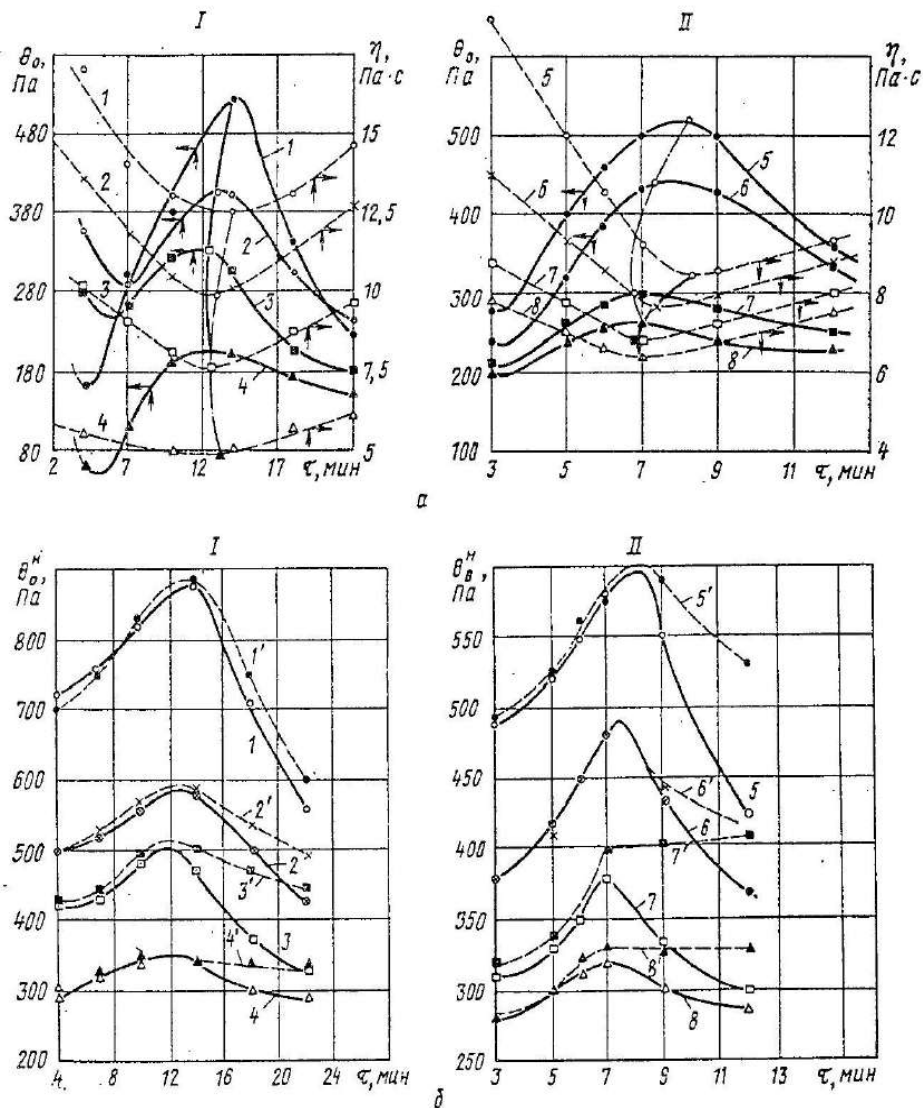


Рис. 6.14. Изменение пластической вязкости и предельного напряжения сдвига: а — для разрушенной структуры; б — для неразрушенной структуры; 1...8 — кривые, замеренные на ротационном вискозиметре; 1'...8' — кривые, замеренные на коническом пластометре; I — куттер малой модели; II — куттер большой модели. Номера кривых соответствуют технологическим параметрам, приведенным в табл. 6.2

При куттеровании фарша для вареных колбас в подготовительном периоде, когда частицы имеют размер немного меньше начального и добавленная влага образует толстые прослойки, облегчающие деформацию, величина предельного напряжения сдвига уменьшается, потери массы при термообработке возрастают.

В этот период формируется рецептура фарша вареных колбас, поэтому он и называется подготовительный.

Основная цель измельчения фарша для вареных колбас — получение однородной гомогенной массы с максимальной влагосвя-

зывающей способностью, что позволяет увеличить выход готовых изделий при заданной консистенции, т. е. снизить их себестоимость.

В противоположность фаршу для вареных колбас, основной целью для фарша сырокопченых колбас является получение массы с определенной однородной структурой, обладающей минимальной влагосвязывающей способностью, а, следовательно, и структурно-механическими свойствами. Это необходимо для ускорения процесса сушки сырокопченых колбас, что сократит продолжительность процесса, т.е. сократит затраты на теплоэнергозатраты, увеличит производительность, а, следовательно, снизит себестоимость.

В подготовительный период приготовления фарша для сырокопченых колбас измельчается мясное сырье без добавления влаги. В этот период происходит только процесс измельчения, при этом размер частиц и их поверхность вырастает, за счет чего выделяется

Таблица 6.2

Химические характеристики сырья измельченного на куттере малой (МК) и большой (БК) модели и полученного фарша

Куттер	№ образца*	Характеристика фарша			Количество воды m_n	Характеристика мяса	
		U_n	W_n	φ		U_n	W_n
МК	1	2,21	0,689	0,166	0,2	1,683	0,627
	2	2,44	0,710	0,146	0,3	1,653	0,623
	3	2,70	0,730	0,127	0,4	1,650	0,622
	4	3,01	0,753	0,111	0,5	1,677	0,627
БК	5	2,06	0,676	0,183	0,25	1,440	0,590
	6	2,30	0,697	0,158	0,3	1,540	0,606
	7	2,55	0,718	0,154	0,45	1,453	0,593
	8	2,98	0,740	0,113	0,4	1,850	0,649

дополнительно сок, который увеличивает толщину водно-белковой прослойки. Рассмотренные факторы вызывают снижение значений структурно-механических свойств и водосвязывающей способности, что удовлетворяет выше сказанным требованиям, предъявленным к фаршу сырокопченых колбас. Поэтому этот период измельчения для фарша сырокопченых колбас является основным, а его окончание, выраженное минимальной экстремальной точкой изме-

нения величины структурно-механических и других свойств, является оптимальной продолжительностью измельчения. В дальнейшем процесс измельчения происходит аналогично фаршу для вареных колбас.

При увеличении продолжительности куттерования (первый период) происходит интенсивное разрезание частиц, их общая поверхность увеличивается, влага из свободной переходит в поверхностно-связанную. В этот период величина предельного напряжения сдвига и эффективной вязкости при единичном значении скорости возрастает и достигает максимального значения, а пластическая вязкость и потери жидкости при термообработке убывают до минимальных значений. Образование первичной структуры фарша заканчивается. Во второй период куттерования (перекуттерование) происходит некоторое размочаливание мышечных волокон мяса, температура массы продолжает повышаться, увеличиваются число мельчайших частиц, аэрирование массы и эмульгирование жира, что ведет к вторичному структурообразованию, а также к уменьшению величины предельного напряжения сдвига, увеличению пластической вязкости и потерь массы при термообработке. Одновременно происходят коллоиднохимические изменения.

На рис. 6.14, б показано изменение предельного напряжения сдвига неразрушенной структуры фарша, приготовленного на различных куттерах (замерено на ротационных вискозиметрах и конических пластометрах). На рис. 6.14, б видно, что величины, определенные на различных приборах, имеют почти одинаковые значения, которые в основном лежат в пределах ошибки опыта. Исключение составляют фарши с большим влагосодержанием. Это связано с тем, что при замере предельного напряжения сдвига фаршей с малой консистенцией глубина погружения конуса увеличивалась, что уменьшало соотношение $\xi = D/d$, и было меньше 5, в результате чего получали несколько завышенные значения. При учете поправки на краевые эффекты значения стали совпадать. В противоположность изменению предельного напряжения сдвига пластическая вязкость в первый период куттерования уменьшалась, достигая минимального значения, а во втором — увеличивалась (см. рис. 6.14, а).

Подобно предельному напряжению сдвига липкость во время куттерования увеличивалась, достигая максимального значения, а

затем уменьшалась. Изменение липкости обусловлено в основном теми же причинами, что и при изменении предельного напряжения сдвига. Время, при котором все показатели фарша достигают экстремальных значений и структура его наиболее однородна, является рациональной продолжительностью измельчения (t_p). Однако определенная по адгезионным свойствам t_p несколько занижена по сравнению со сдвиговыми и составляет 86...98 % от них. Уменьшение t_p можно объяснить, рассматривая физическую сущность сдвиговых свойств и липкости фарша.

Сдвиговые свойства характеризуют энергию взаимодействия между элементами структуры, т. е. свойства всего объема системы в условиях напряженного состояния. Липкость характеризует энергию свободной поверхности системы. Сдвиговые свойства и липкость не тождественны, поэтому можно сделать вывод, что в процессе куттерования максимальное значение свойств на поверхности достигается быстрее, чем в объеме. Таким образом, несмотря на общность сдвиговых и поверхностных свойств фарша при измельчении, предпочтение необходимо отдавать первым, так как они оценивают весь объем продукта. Кроме того, поскольку цель куттерования — получение фарша с прочной структурой и наибольшей или наименьшей водосвязывающей способностью, основной характеристикой процесса из сдвиговых свойств является предельное напряжение сдвига, а не пластическая вязкость. При увеличении влажности числовые значения всех сдвиговых характеристик уменьшаются по экспоненциальному закону.

Проведенные комплексные исследования на четырех выбранных ранее видах фаршей (по четыре партии каждого) показали аналогичность изменения структурно-механических свойств с рассмотренными выше (см. рис. 6.14). В табл. 6.3 приведены данные (в долях единицы), характеризующие фарш по влагосодержанию, влажности и рациональными реологическими свойствами. Сырье в каждой серии опытов имело различную влажность: свинина 0,35...0,45 доли единицы, говядина 0,68...0,75 доли единицы. Выход готовой продукции зависит также и от влажности сырья, поэтому в экспериментальных работах более правильно определять выход по отношению к абсолютно сухому веществу, содержащемуся в продукте

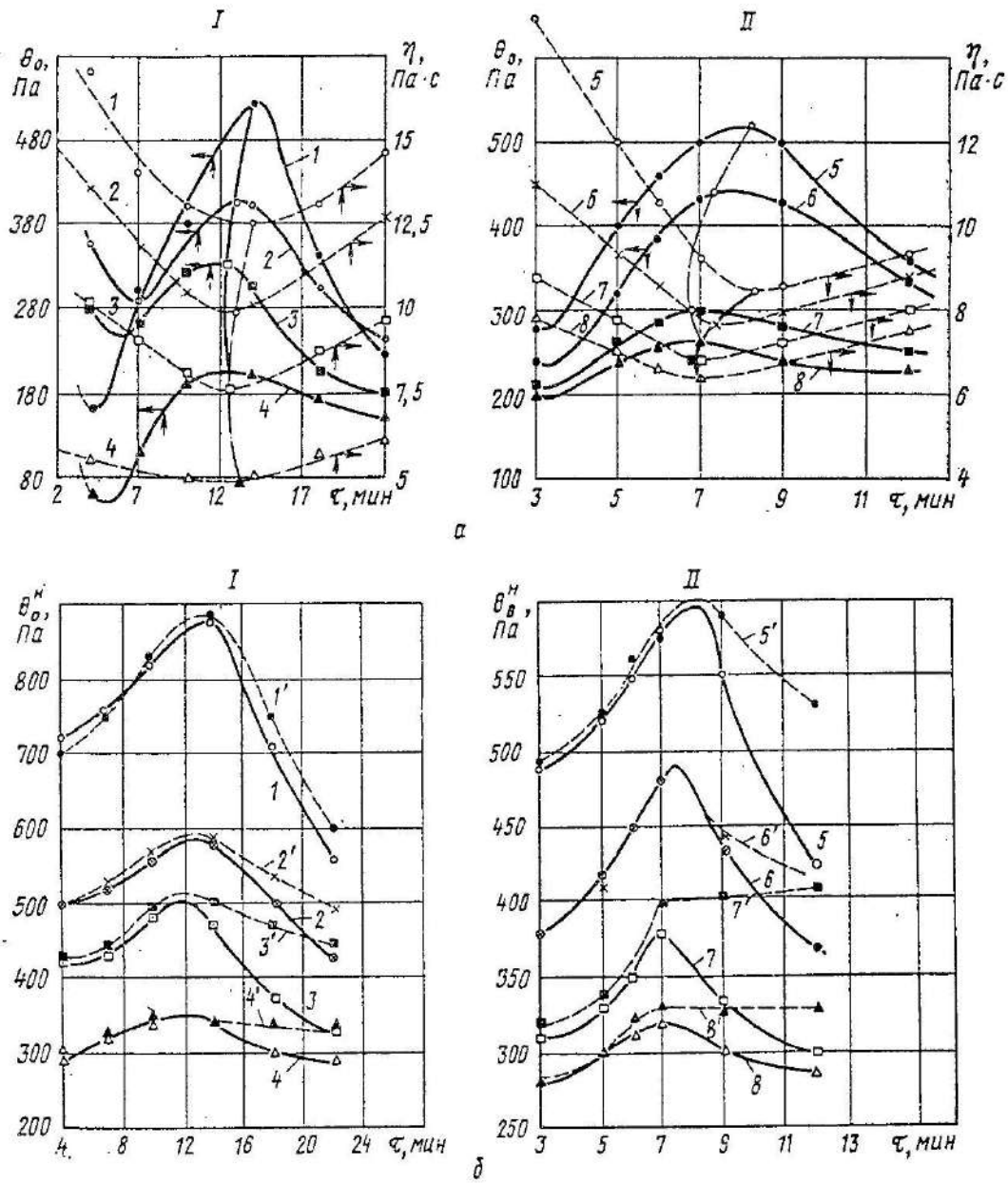


Рис. 6.14. Изменение пластической вязкости и предельного напряжения сдвига: а — для разрушенной структуры; б — для неразрушенной структуры; 1...8 — кривые, замеренные на ротационном вискозиметре; 1'...8' — кривые, замеренные на коническом пластометре; I — куттер малой модели; II — куттер большой модели. Номера кривых соответствуют технологическим параметрам, приведенным в табл. 6.2

Взаимосвязь химических и реологических характеристик фарша различных видов колбасных изделий

Фарш	№ опыта	U_H	W_H	φ	m_H	Реологическая характеристика фарша в системе МКС			
						θ_0	η	θ_0^H	η^H
Говяжьих сарделек	1	2,75	0,733	0,14	0,3	400	7,7	—	7,82
	2	3,41	0,773	0,115	0,4	340	5,2	515	5,4
	3	3,905	0,796	0,105	0,5	300	3,88	430	4,32
	4	4,075	0,803	0,103	0,6	280	3,4	380	3,7
	5	4,785	0,827	0,097	0,7	200	2	295	2,16
Русских сосисок	1	2,086	0,676	0,169	0,25	520	8,3	580	—
	2	2,215	0,689	0,17	0,29	440	7,65	500	—
	3	2,4	0,706	0,178	0,35	320	6,96	425	7,3
	4	2,546	0,718	0,172	0,4	300	6,8	380	—
	5	2,984	0,749	0,154	0,45	260	6,25	325	—
Докторской колбасы	1	1,48	0,596	0,225	0,1	600	6,35	880	7,63
	2	1,65	0,623	0,226	0,2	430	5,4	700	6,12
	3	1,8	0,643	0,234	0,25	310	4,86	450	4,7
	4	2,06	0,673	0,22	0,3	250	4,4	366	3,43
	5	2,29	0,696	0,213	0,45	200	4	300	2,33
Свинных сарделек	1	1,094	0,522	0,337	0,2	235	3,7	295	2,85
	2	1,24	0,554	0,351	0,4	195	3,2	240	2,45
	3	1,335	0,572	0,342	0,4	160	3,02	200	2
	4	1,311	0,567	0,347	0,3	165	3,01	200	2
	5	1,449	0,591	0,275	0,5	345	—	455	1,98

По приведенным реологическим зависимостям оптимальное влагосодержание $T_H^{\text{опт}}$ можно определить косвенно как точку перегиба кривых в координатах: экстремальные величины реологических характеристик и влагосодержание. С увеличением влагосодержания рациональная продолжительность измельчения уменьшается, а при $\{T_H > T_H^{\text{опт}} —$ возрастает, что объясняется увеличением толщины водно-белковых прослоек между частицами и, следовательно, уменьшением сил сцепления между элементами коагуляционной структуры. Таким образом, частицы находятся как бы в плавающем состоянии, их относительное смещение облегчено, а период релаксации с увеличением U_H уменьшается. Для измельчения наилучшие условия создаются тогда, когда продолжительность воздействия

ножа на продукт равна или меньше периода релаксации упругих деформаций, т. е. продукт можно рассматривать как упруго-твердое тело. При обводнении фарш становится менее упругим, приближаясь к пластичному состоянию.

Как было отмечено выше, при изменении продолжительности измельчения реологические свойства не остаются постоянными, что показано в уравнении

$$\frac{R}{R_3} = H + L \left(\frac{\tau_k}{\tau_{кр}} - 1 \right)^2, \quad (6.7)$$

где R — значение одного из реологических свойств (θ_0, η, ρ_0) при заданном τ_k ; R_3 — экстремальное значение реологических свойств при рациональной продолжительности измельчения $\tau_{кр}$; H, L — эмпирические коэффициенты (H соответствует отношению свойств при $\tau_k = \tau_{кр}$, L характеризует интенсивность изменения свойств при $\tau_k = \tau_{кр}$).

Уравнение (6.7) справедливо при $0,5 \leq \tau_k/\tau_{кр} \leq 1,5$, что вполне достаточно для практических расчетов. Значение коэффициентов приведено в табл. 6.4.

Таблица 6.4

Значения коэффициентов к уравнению (6.7) для расчета реологических характеристик фарша при различной продолжительности измельчения

Показатель	R/R_3	Коэффициенты		
		H	L	
			при $0,5 \leq \tau_k/\tau_{кр} \leq 1$	при $1 \leq \tau_k/\tau_{кр} \leq 1,5$
Предельное напряжение сдвига	$\theta_0/\theta_{0\max}$	1	-1,5	-0,75
Пластическая вязкость	η/η_{\min}	1	+1,0	+0,60
Липкость	$\rho_0/\rho_{0\max}$	1	-0,8	-0,5

$$C = C_0 \exp(a\tau_k^2 - b\tau_k), \quad (6.8)$$

где C_0 и C — начальная и конечная липкость фарша, Па; a и b — постоянные, зависящие от вида сырья, назначения фарша и интенсивности куттерования (для куттера с девятью ножами и частотой вращения 1960 мин^{-1} $a = -0,0122$; $b = 0,17$, а с частотой вращения 1440 мин^{-1} $a = -0,006$, $b = 0,09$); τ_k — длительность куттерования.

График, характеризующий зависимость относительного изменения свойств от относительной продолжительности измельчения, представлен на рис. 6.15. А. И. Пелеев вывел следующую зависимость между липкостью и длительностью куттерования:

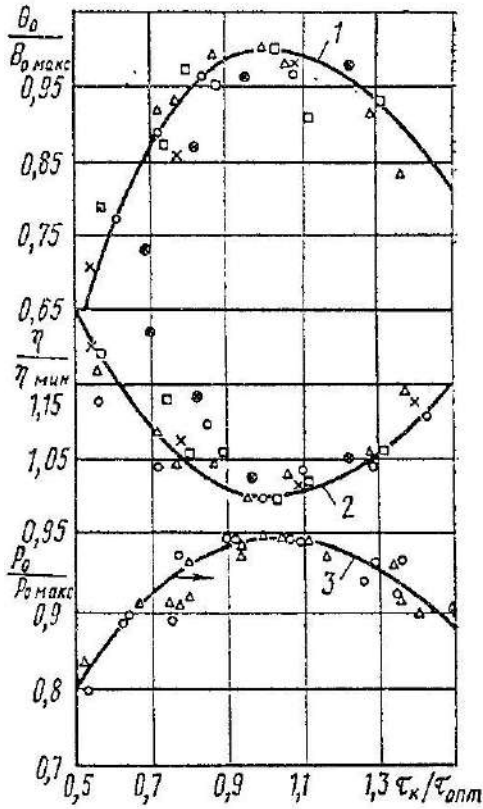


Рис. 6.15. График зависимости относительного изменения свойств фарша от относительной продолжительности куттерования:

1 — предельного напряжения сдвига; 2 — пластической вязкости; 3 — липкости

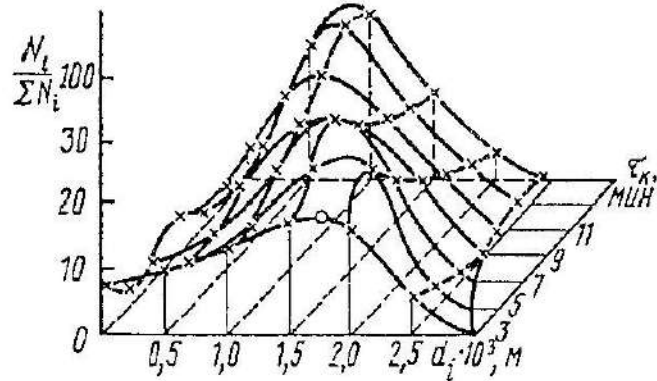


Рис. 6.16. Количественное содержание частиц фарша докторской колбасы в зависимости от их размеров и продолжительности куттерования

Уравнение (6.8) имеет одно экстремальное значение. По-видимому, этому значению соответствует $\tau_{кр}$. Однако уравнение (6.8) не учитывает технологических характеристик сырья и кинематических характеристик измельчающей машины. Для каждого вида сырья и машины значения коэффициентов будут разными.

Влияние продолжительности куттерования колбасного фарша на их дисперсный состав. Для характеристики степени измельчения фарша, выяснения сущности этого процесса и причин изменения структурно-механических свойств рассмотрим гистологические исследования и изменения эффективного диаметра частиц фарша.

Кривые распределения размеров частиц показаны на рис. 6.16. Подобные кривые получены во всех опытах. С помощью кривых можно определить зависимости (рис. 6.17) изменения эффективного диаметра частиц от продолжительности измельчения и влагосодержания фарша.

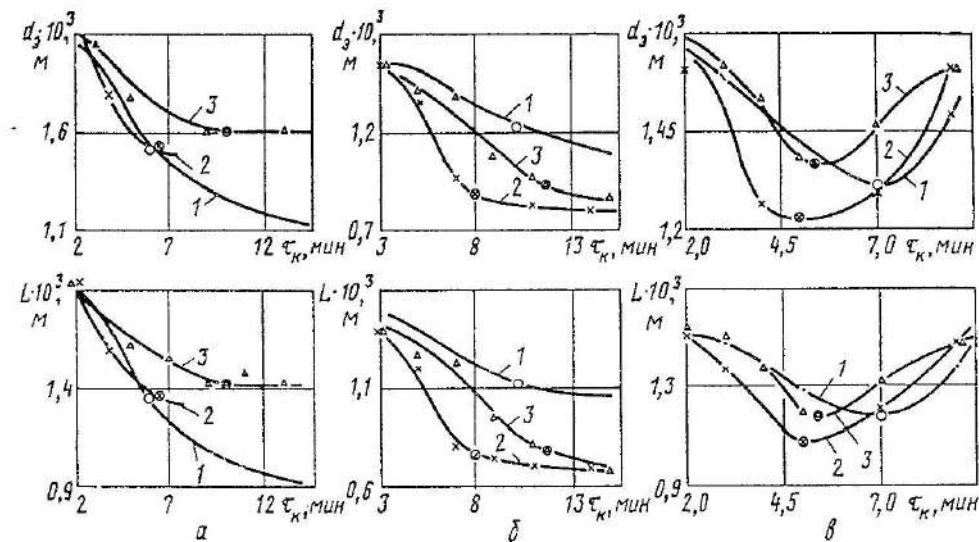


Рис. 6.17. Зависимость характерных линейных размеров частиц фарша от продолжительности куттерования и влагосодержания:

а — фарш говяжьих сарделек с влагосодержанием: 1 — 3,9 долей единицы; 2 — 4,08; 3 — 4,28;
 б — фарш докторской колбасы с влагосодержанием: 1 — 1,48 долей единицы; 2 — 2,06; 3 — 2,29;
 в — фарш свиных сарделек с влагосодержанием: 1 — 1,44 долей единицы; 2 — 1,31; 3 — 1,24

Экстремум (точка перегиба кривых) соответствует рациональной продолжительности измельчения.

При построении зависимости эффективного диаметра частиц от влагосодержания (при рациональной продолжительности измельчения) экстремумы на кривых показывают оптимальное влагосодержание фарша.

Изменения геометрических характеристик фарша различных видов колбас подобны, исключение составляют продукты с максимальным содержанием жира (свыше 30%). Размер частиц фарша достигает минимального значения при рациональной продолжительности измельчения, а затем увеличивается за счет образования капель жира.

Гистологическими исследованиями можно получить критерий общей оценки степени измельчения (рис. 6.18). Гистологические срезы показывают, что увеличение степени измельчения приводит к исчезновению поперечной исчерченности волокон. При первич-

ном измельчении мяса в поле зрения микроскопа находятся кусочки, имеющие типичную структуру мяса. При многократном измельчении фарша (в 16 и 25 раз) образец в поле зрения микроскопа имеет вкрапления структурных частиц мяса (мышечные волокна, соединительная ткань, жировая ткань). Частицы мышечной ткани незначительно меняют свои размеры. Например, после первого и третьего измельчений в поле зрения видны частицы мяса и пустоты, так как фарш лежит рыхло. После 16- и 25-кратного измельчения пустоты исчезают, т. е. фарш уплотняется, а частицы трудно отличить друг от друга.

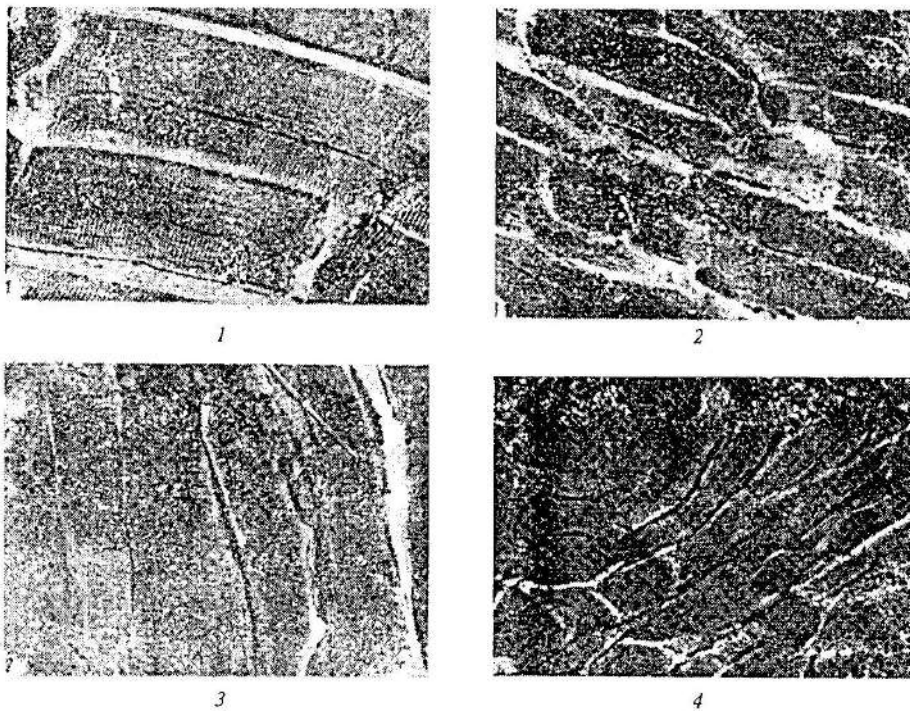


Рис. 6.18. Гистологические срезы мышечных волокон модельно-измельченной говядины высшего сорта при различной кратности измельчения:
1 — исходный образец; 2 — 6-кратное; 3 — 9-кратное; 4 — 16-кратное

Некоторые мышечные волокна сохраняют свою форму и изменяются незначительно вплоть до 16-кратного измельчения. После 25-кратного измельчения диаметр мышечного волокна уменьшается. Не остается без изменения и сама структура мышечных волокон. Эти изменения зависят от степени измельчения. В поле зрения микроскопа после измельчения находятся фарш и неразделенные мышечные волокна. Форма и Пропорции мышечных волокон различны: при однократном измельчении мало фарша, а больше кусочков мышечных волокон, по мере возрастания кратности измельчения пропорции становятся обратными. При переходе в фарш

мышечных волокон они становятся разрозненными и растрепанными. Для каждого такого мышечного волокна характерен переход к аморфной структуре. Если в классической структуре мышечная ткань имеет хорошо заметные и правильно расположенные ядра, то при аморфном состоянии исчезают продольная и поперечная исчерченности. Первое измельчение не влияет на строение жировых тканей. При дальнейшей обработке жировые ткани разбиваются на единичные частицы в массе фарша и при разрушении образуют капли, которые имеют разные размеры. Редко встречаются жировые ткани, сохраняющие свою структуру после 25-кратного измельчения.

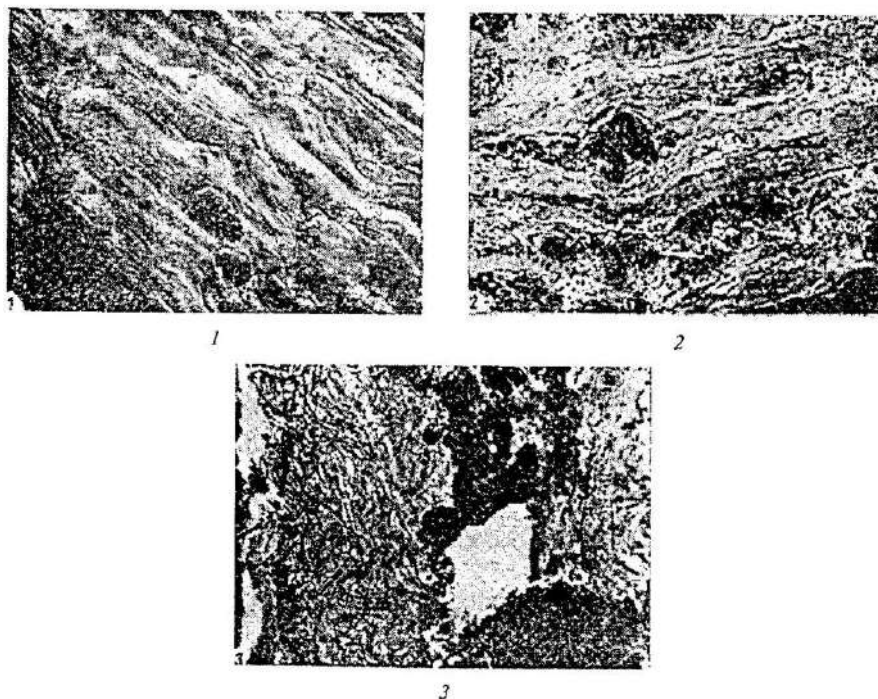


Рис. 6.19. Микросрезы соединительной ткани при различной кратности измельчения:

1 — исходный образец; 2 — 3-кратное; 3 — 16-кратное

Соединительная ткань наиболее хорошо сохраняет свою структуру при прохождении через мясорубку (рис. 6.19). С особой четкостью видны волокна и ядра в исходном образце (рис. 6.19, 1). По мере увеличения кратности измельчения, для соединительной ткани (рис. 6.19, 2, 3) характерен бесструктурный и безъядерный вид. В отдельных случаях возможно и сохранение ядер, но расположение их весьма хаотичное. Соединительная ткань не претерпевает существенных изменений и представляет собой рыхлые включения в аморфную массу фарша. Таким образом, гистологические

исследования позволяют рассмотреть внутренние изменения измельчаемого мяса при его механической обработке.

Рассмотрим основные закономерности изменения структуры фарша русских сосисок в процессе его измельчения (от 1 до 12 мин) на куттёре (ёмкость чаши 240 л), полученные при помощи гистологических исследований (рис. 6.20). В подготовительно-

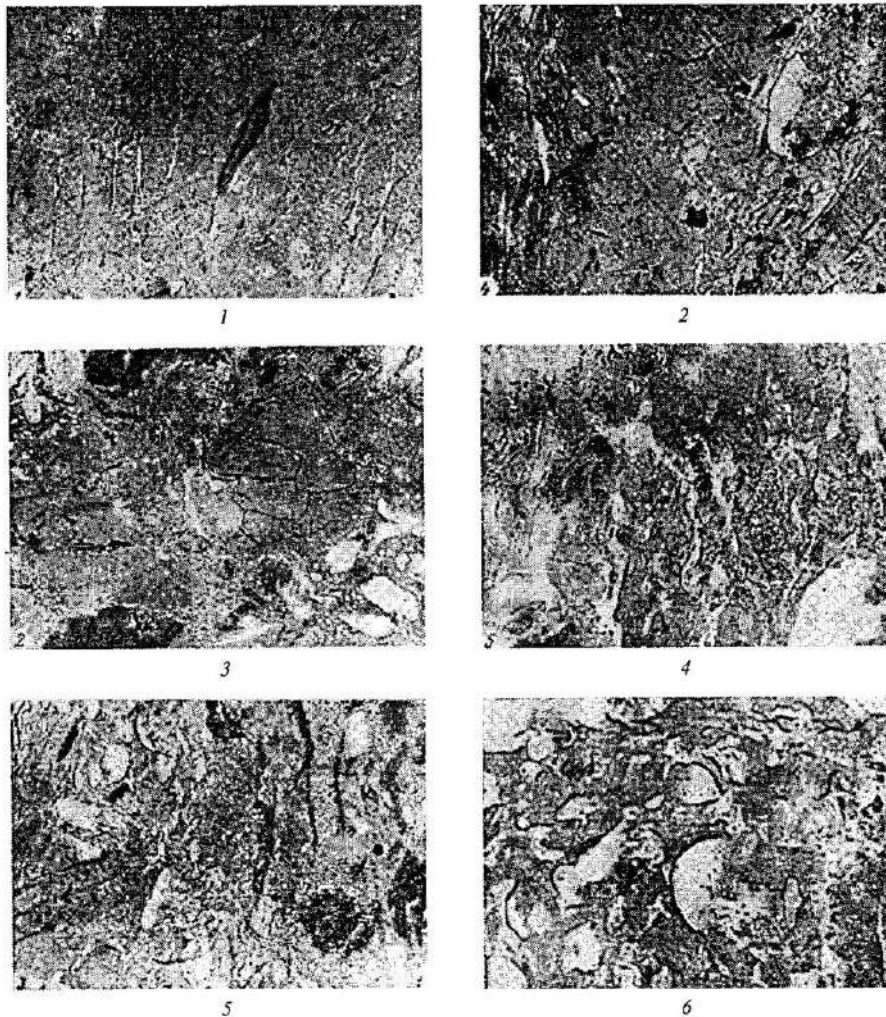


Рис. 6.20. Гистологические срезы проб фарша русских сосисок при различной продолжительности измельчения (в мин):

1 — 1; 2 — 3; 3 — 5; 4 — 6; 5 — 9; 6 — 12

период измельчения (1...3 мин) величины структурно-механических свойств уменьшаются, мышечные волокна интенсивно измельчаются. Они уменьшаются в 4...5 раз. Поверхность резко увеличивается, но добавленная влага (лед) при куттеровании не успевает связаться и находится в свободном состоянии. Это сказывается на уменьшении структурно-механических свойств. Пучки мышечной ткани распадаются на более мелкие частички с хорошо сохранившейся

исчерченностью. Встречаются участки (например, при $t_k = 3$ мин), на которых мышечные волокна переходят в аморфное вещество и видны довольно крупные воздушные пузырьки овальной или неправильной формы. Соединительная ткань в основном не разрушается, а максимальный ее размер в первые 5 мин уменьшается. Так, на срезе при $t_k = 1$ мин обнаружены соединительные элементы, достигающие размера 0,5 x 3,4 мм, а при $t_k = 3$ мин максимальный размер составляет 0,3 x 1,9 мм. В первый период измельчения продолжительностью 6 мин значение структурно-механических свойств фарша увеличивается. Размер соединительной ткани в основном не меняется. Мышечные волокна при дальнейшем куттеровании измельчаются, но некоторые из них остаются неизменными в течение 6 мин куттерования.

Размер частиц мышечных волокон уменьшается всего в 2 раза. В этот период происходят коллоидно-химические изменения. Влага полностью насыщает мышечные волокна, частички набухают и полностью переходят в бесформенное вещество фарша. На гистологических срезах можно наблюдать переход мышечных волокон в аморфное вещество. Оставшиеся мышечные волокна с сохранившейся исчерченностью почти равномерно расположены в основной аморфной массе фарша. Воздушные пузырьки уменьшаются и более равномерно распределены в фарше, что указывает на хорошо отбитый фарш при куттеровании. Все это вызывает упрочнение структуры, а следовательно, и повышение величин структурно-механических свойств фарша.

Таким образом, готовый фарш с экстремальными величинами структурно-механических свойств при $t_k = 5...6$ мин в основном состоит из разрушенной мышечной ткани. В результате набухания мышечные волокна переходят в аморфное вещество, окрашенное в розовый цвет, в котором содержатся отдельные мышечные волокна и их кусочки, а также соединительная и жировая ткани.

Во второй период (от 6 до 12 мин) величины структурно-механических свойств уменьшаются. Оставшиеся мышечные волокна измельчаются и почти полностью переходят в бесформенное аморфное вещество. Встречаются лишь незначительные мелкие оставшиеся мышечные волокна. Размеры соединительных тканей уменьшаются по сравнению с первым периодом в 8... 10 раз. Фарш состоит из бесформенной массы с некоторым включением измель-

ченной соединительной ткани и незначительными мелкими оставшимися мышечными волокнами. В бесформенной массе имеется большое количество пузырьков различных размеров и формы. Все это способствует выделению влаги, которая находится в свободном состоянии, что вызывает резкое уменьшение величин структурно-механических свойств.

Таким образом, гистологические исследования объясняют причину изменения структурно-механических свойств в процессе измельчения фарша. Степень его измельчения характеризует эффективный диаметр частиц, экстремальное значение которого совпадают с рациональной продолжительностью куттерования.

Влияние продолжительности куттерования колбасного фарша на их физико-химические свойства.

Рассмотрим данный вопрос на примере модельного фарша, приготовленного из длинейших мускулов спины говядины (50 %) и свинины (50 %). Свинину в последующих опытах заменяли шпиком из расчета 10, 20, ..., 50 %. Количество воды, добавленной к фаршу, составляло 15...40% (с интервалом 5 %). Фарш готовили из размороженного сырья на куттере. Для выяснения сущности процесса формирования структуры колбасного фарша рассмотрим изменения физико-химических характеристик, включающие: растворимость белков в растворителях с низкой и высокой ионной силой, водосвязывающую способность и реологические характеристики фарша в процессе тонкого измельчения на куттере.

Растворяемость белков определяли после четырехкратной экстракции. В начале белки экстрагировали фосфатным буфером с ионной силой $\mu = 0,15$ и рН 7,4, затем боратным буфером с ионной силой $\mu = 1$ при рН 7,4, перемешивая содержимое мешалкой в течение 5 мин. При этом прочность структуры колбасного фарша определяется в основном количеством растворенных белков и их физико-механическими превращениями в процессе технологической обработки, размером и качеством жировых частиц и капель, образующихся при эмульгировании жира. Известно, что белки под влиянием различных физических и химических реагентов легко изменяют структуру макромолекул, теряя ряд первоначальных свойств, прежде всего растворимость.

На рис. 6.21 представлены результаты изменения растворимости белковых фракций по трем сериям опытов. Кривые 1, 3, 5, 7 свидетельствуют о том, что процесс механического измельчения оказывает заметное влияние на растворимость мышечных белков в солевых растворах, так как при куттеровании наблюдаются два макроскопических эффекта: вначале увеличение выхода растворимых белков мезоплазмы миофибрилл из клеточных структур до максимального значения, затем некоторое уменьшение растворимости. По-видимому, в первой стадии процесс выхода мышечных белков превалирует над денатурацией, а во второй превалирует процесс селективного нагрева.

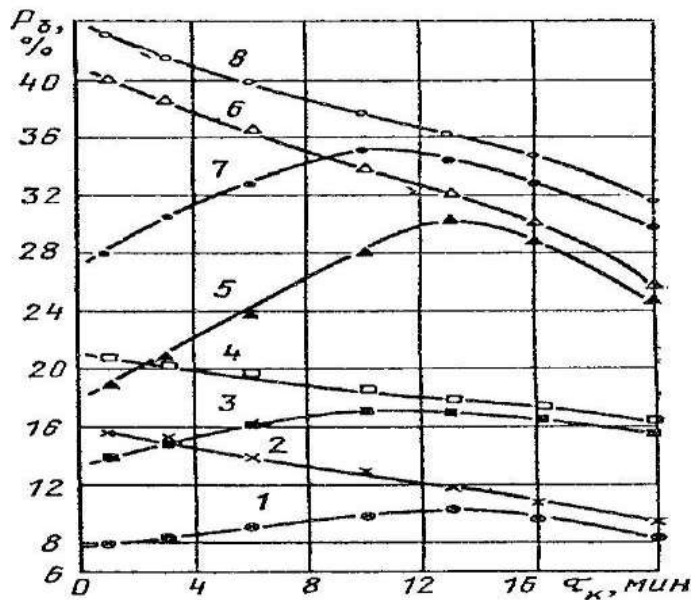


Рис. 6.21. Изменение белков, экстрагируемых буферными растворами низкой (кривые 1...4) и высокой (кривые 5...8) ионной силы при измельчении фарша:

1, 5 — кривые, показывающие изменение белков фарша (50 % говядины, 30 % свинины, 20 % шпика с добавлением 20 % воды) при его измельчении в куттере; 2, 6 — кривые, показывающие изменение белков того же фарша, но с дополнительным измельчением на РТ-2; 3, 7 — кривые, показывающие изменение белков фарша (100 % говядины с добавлением 20 % воды) при его измельчении в куттере; 4, 8 — кривые, показывающие изменение белков того же фарша, но с дополнительным измельчением на РТ-2

Следствием этих процессов является возникновение или расщепление связей между белковыми частицами или между белками и растворителем. Во второй стадии измельчения уменьшается растворимость из-за нагрева белков с последующей их агрегацией и

коагуляцией, которые развиваются тем больше, чем длительнее измельчение. Характер изменения кривых 2, 4, 6, 8 при использовании гомогенизатора (см. рис. 6.21) показывает, что с увеличением длительности измельчения равномерно

уменьшается растворимость белковых фракций, что объясняется, локальным перегревом отдельных частиц мяса и денатурацией белков. Возможно гомогенизатор оказывает более глубокое воздействие на молекулярные и надмолекулярные образования.

Результаты исследований подтверждают, что возникновение максимального количества белков, способных переходить в непрерывную фазу фарша, зависит как от продолжительности измельчения, так и от состава измельчающего сырья. Так, максимальное количество белков у говяжьего фарша переходит из клеточных структур в непрерывную фазу на 3 мин раньше, чем у многокомпонентного фарша, что хорошо согласуется с данными изменения водосвязывающей способности, размерами частиц сырья и реологических характеристик.

Значительное влияние на изменение структуры фарша оказывает вода. Исследования изменения растворимости белковых фракций фарша (50 % говядины, 30 % свинины, 20 % шпика) при разном влагосодержании показали, что максимальное количество белков, перешедших из клеточных структур в непрерывную фазу, для белков меоплазмы 81%, для белков меофибрилл — 78% их общего содержания у фарша с влагосодержанием, равным 2 долям единицы.

Из рис. 6.21 видно, что количество белков, экстрагируемых растворителем с высокой ионной силой, примерно в 3 раза больше, чем белков, экстрагируемых фосфатным буфером. Можно предположить, что прочностные свойства фарша и его водосвязывающая способность предопределяются состоянием белков и главным образом состоянием миофибриллярных белков, их способностью переходить в раствор и образовывать коагуляционную структуру.

Водосвязывающую способность как объективную силу связывания воды с фаршем устанавливали отношением неотделяемой при прессовании воды к сухому остатку. Изменение предельного напряжения сдвига, пластической вязкости и водосвязывающей способности фарша в зависимости от продолжительности измельчения и содержания влаги показано на рис. 6.22.

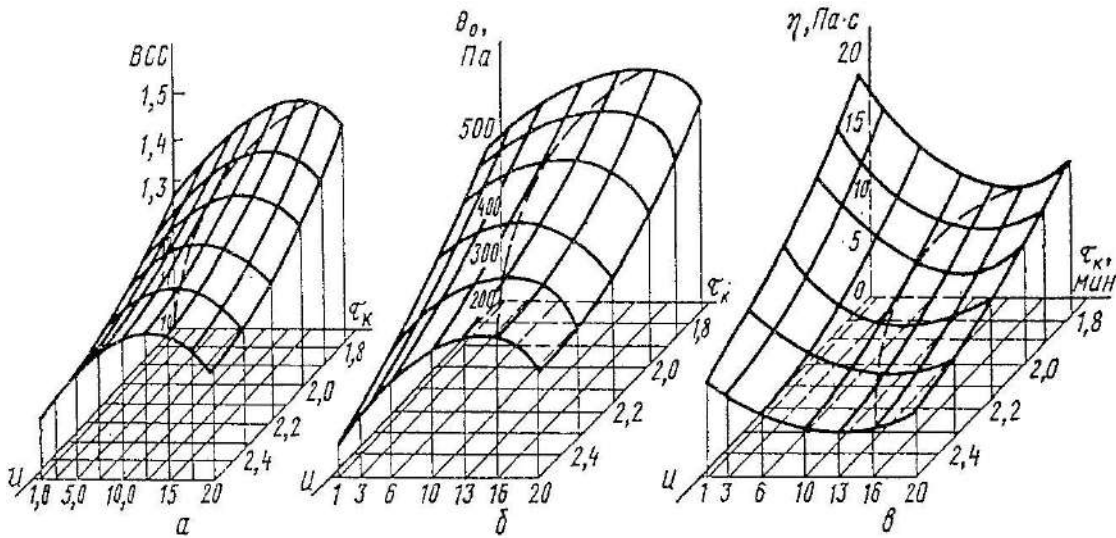


Рис. 6.22. Изменение влагосвязывающей способности и реологических свойств фарша в зависимости от влагосодержания и продолжительности куттерования:

a — влагосвязывающей способности; *б* — предельного напряжения сдвига разрушенной структуры; *в* — пластической вязкости

Водосвязывающая способность и предельное напряжение сдвига во время измельчения увеличиваются, достигают максимального значения, а затем уменьшаются. Пластическая вязкость снижается до минимума, а затем увеличивается. Таким образом, аналогия изменения реологических свойств, водосвязывающей способности и растворимости белков позволяет утверждать, что прочность структуры фарша зависит от количества белков, способных переходить из клеточных структур в непрерывную фазу.

Прочность структурной сетки фарша зависит от количества полярных групп, в первую очередь кислых и основных, которые располагаются на поверхности белковых молекул в непрерывной фазе. Чем больше этих групп на поверхности белков, тем активнее молекулы белка взаимодействуют друг с другом, лучше связывая воду и жир, тем прочнее структурная сетка фарша, меньше жидкости отделяется при нагреве. Исследования показали, что максимальное число кислых, основных и сульфидрильных групп, реагирующих с парахлор- меркурбензоатом, наблюдается при рациональной продолжительности измельчения и критическом влагосодержании, для данного фарша равном 2 кг на 1 кг сухого остатка. Следовательно, при таких условиях формируется наиболее прочная структурная сетка колбасного фарша. Белки меоплазмы эмульгируют жир и способствуют образованию наиболее стойкой эмульсии.

Приведенные данные свидетельствуют о том, что характер изменения предельного напряжения сдвига, водосвязывающей способно-

сти и количества белков, переходящих в жидкую фазу, аналогичен. Эти показатели могут быть использованы в качестве объективной характеристики при оценке фарша.

Определение энергетических характеристик процесса куттерования. Результаты реологических исследований, описанные выше, позволяют найти производительность куттера исходя из рациональной продолжительности куттерования и кинематических характеристик машин. Зная закономерности повышения температуры фарша при его измельчении на куттере и полезную мощность, расходуемую режущим механизмом, можно рассчитать энергетические характеристики процесса куттерования. За счет энергии, подводимой к ножам и расходуемой на преодоление сопротивления сил трения и перемешивания (95...97 %), значительно повышается температура фарша.

В начальный период измельчения во время загрузки компонентов фарша в 2...3 раза по сравнению с первоначальной повышается температура (мощность электродвигателя предельная). При установившемся режиме измельчения повышение температуры At ($^{\circ}\text{C}$) можно определить (с погрешностью до 15 %) по количеству подведенного тепла из уравнения теплового баланса

$$Q = cm\Delta t = 10^6 [5 - 2U_H(1 - b \ln \tau_k)], \quad (6.9)$$

где Q — количество подведенного тепла, Дж; c — удельная теплоемкость колбасного фарша, Дж/(кг· $^{\circ}\text{C}$) [$c = 3750...4050$ Дж/(кг· $^{\circ}\text{C}$)]; m — масса загружаемого мяса и воды, кг; 10^6 — коэффициент; Дж; b — коэффициент, зависящий от кинематических характеристик куттера, мощности, которую развивает режущий механизм, и упругопрочностных свойств сырья, мин^{-1} (для куттера малой модели $b = 0,217$ мин^{-1} , для куттера большой модели $b = 0,347$ мин^{-1}).

В производственных условиях при куттеровании добавляют лед, поэтому при расчете At необходимо ввести поправку на скрытую теплоту плавления льда. По количеству тепла можно определить мощность, развиваемую режущим механизмом

$$N = \frac{Q}{60\tau_k}, \quad (6.10)$$

где N — мощность, развиваемая режущим механизмом, Вт.

В этом случае поправку на скрытую теплоту плавления льда не вводят. Изменения величины мощности, рассчитанной по уравнениям (6.9) и (6.10), приведены на рис. 6.23.

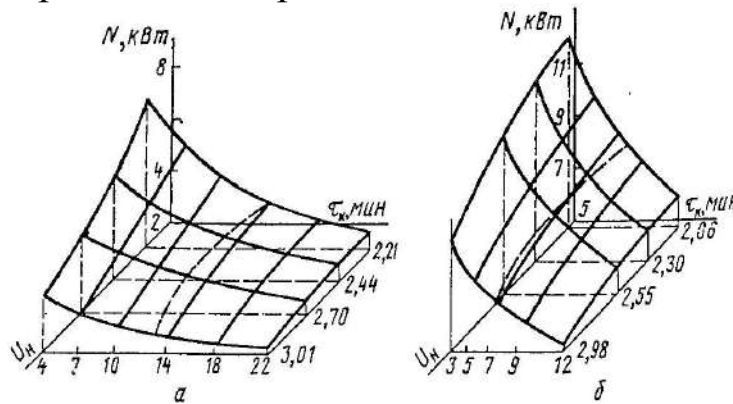


Рис. 6.23. Изменение мощности развиваемой режущим механизмом в зависимости от влагосодержания и продолжительности измельчения на куттере:

a — малой модели; *b* — большой модели

Таким образом, в результате проведенных исследований получены тайные для определения повышения температуры фарша при куттеровании, которые позволяют предварительно рассчитывать температуру фарша при $t_{кр}$ и, если она оказывается выше заданной, принять меры к ее понижению (добавление льда вместо воды, переохлаждение мяса и г. доопределение оптимального влагосодержания и продолжительности куттерования колбасного фарша. Изменение рациональной продолжительности измельчения различных видов фарша на куттере (емкость чаши 240 л) в зависимости от его влагосодержания показано на рис. 6.24. Влагосодержание фарша, при котором $t_{кр}$ имеет минимальные значения, в дальнейшем именуется оптимальным влагосодержанием U^{opt} . Минимальное значение $t_{кр}$ при оптимальном влагосодержании является оптимальной (эталонной) продолжительностью куттерования t^{opt} . Характеристики фарша и готовых изделий при этих параметрах эталонные, так как они показывают, при каких параметрах сырого фарша будет максимальный выход готовой продукции при наилучшем его качестве. При автоматическом регулировании процесса следует придерживаться оптимальных данных, приведенных для некоторых колбасных фаршей в табл. 6.5.

На основании эталонных данных, приведенных в табл. 6.5, можно сделать вывод, что оптимальное влагосодержание в первом приближении будет зависеть от содержания говядины, которая по-

глощает максимальное количество влаги. Математическая обработка этих данных позволила получить следующую зависимость:

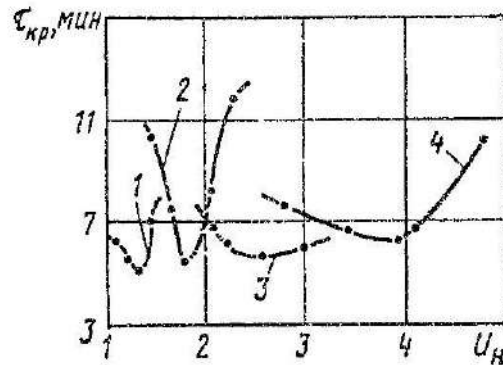


Рис. 6.24. Зависимость рациональной продолжительности измельчения от влагосодержания фарша:

1 — свиных сарделек; 2 — докторской колбасы; 3 — русских сосисок; 4 — говяжьих сарделек

$$U_{\text{н}}^{\text{опт}} = \exp(1,20 m_{\text{гов}} + 0,28), \quad (6.11)$$

где $m_{\text{гов}}$ — содержание говядины, доли единиц от общего количества сырья.

Влагопоглощаемость прямо пропорциональна количеству белков мышечной ткани и обратно пропорциональна содержанию жира. Отсюда можно выбрать комплексную характеристику фарша. Степень влагопоглощаемости продукта представляет собой отношение массы

Эталонные (оптимальные) характеристики фарша для некоторых видов колбасных изделий

Показатель	Фарш			
	говяжьих сарделек	русских сосисок	докторской колбасы	свиных сарделек
Содержание говядины, доли единицы	0,9	0,5	0,25	0
Влажность, доли единицы	0,796	0,706	0,643	0,572
Жирность, доли единицы	0,106	0,178	0,239	0,325
Комплексная химическая характеристика фарша K_B	0,925	0,651	0,493	0,317
Оптимальное влагосодержание в фарше, доли единицы:				
опытное	3,905	2,4	1,8	1,335
расчетное по (6.11)	3,896	2,411	1,786	1,323
ошибка, %	0,23	0,46	0,78	0,9
расчетное по (6.13)	3,88	2,4	1,82	1,334
ошибка, %	0,64	0	1,11	0,07
Оптимальная длительность измельчения, мин:				
опытное	6	5,4	5,2	5
расчетное по (6.14)	6	5,33	5,13	4,95
ошибка, %	0	1,3	1,35	1
расчетное по (6.16)	6	5,48	5,21	4,92
ошибка, %	0	1,48	0,19	1,6
Оптимальный эффективный диаметр частиц $d_{эф} \cdot 10^3, \text{м}^3$	1,52	0,5*	0,85	1,2

$$K_B = \frac{m_a c}{\varphi} = \frac{1 - (\varphi + W)}{\varphi} \quad (6.12)$$

Используя эту характеристику, получаем зависимость для расчета оптимального влагосодержания фарша

$$U_H^{\text{ОПТ}} = \exp(1,76 K_B - 0,27) \quad (6.13)$$

Для данного куттера оптимальную (эталонную) продолжительность измельчения можно определить из зависимости, полученной на основании экспериментальных данных,

$$\tau_k^{\text{опт}} = K \cdot \exp(0,25 m_{\text{гов}} + 1,6), \quad (6.14)$$

где K — коэффициент пропорциональности, учитывающий неравномерность усилий, необходимых для резания различных сортов говядины и свинины.

$$K = \sum K_{\text{гов}} m_{\text{гов}} + \sum K_{\text{св}} m_{\text{св}} + \sum K_{\text{п}} m_{\text{п}}; \quad (6.15)$$

$$\sum m_{\text{гов}} + \sum m_{\text{св}} + \sum m_{\text{п}} = 1,$$

где $K_{\text{гов}}$, $K_{\text{св}}$, $K_{\text{п}}$ — коэффициенты пропорциональности соответственно для говядины, свинины и пр. (для говядины высшего сорта $K_{\text{гов}} = 0,9$, для I сорта $K_{\text{гов}} = 0,95$ и II сорта $K_{\text{гов}} = 1$; для свинины полужирной $K_{\text{св}} = 1$, жирной $K_{\text{св}} = 0,95$, жира-сырца $K_{\text{св}} = 0,9$; для меланжа и сухого молока $K_{\text{п}} = 1$).

Оптимальная продолжительность куттерования ($x^{\text{опт}}$), рассчитанная по (6.14) и (6.15), имеет отклонение от экспериментальных данных, не превышающее 1,4% (см. табл. 6.5).

Используя комплексную характеристику фарша, получаем следующую зависимость:

$$\tau^{\text{опт}} = \exp(0,32 K_{\text{в}} + 1,49). \quad (6.16)$$

Используя экспериментальные данные, полученные на различных моделях куттеров, и обобщающую кинематическую характеристику куттера, которая учитывает режущую способность и кинематику движущихся узлов, для определения $x^{\text{опт}}$ любого куттера вывели зависимость

$$\Omega \approx \frac{a_F z}{60 \rho} \cdot \frac{r_n n_n}{R^2} \cdot \frac{n_n}{n_k}, \quad (6.18)$$

где Ω — обобщающая кинематическая характеристика куттера, $\text{м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с} \cdot \text{мин})$; f_0 — режущая способность, $\text{м}^2/(\text{кг} \cdot \text{мин})$; w_n , $w_{\text{ф}}$ — окружная скорость ножа по наибольшему радиусу и чаши куттера по оси вращения ножей, м/с ; F_d — площадь сечения фарша ножом за один оборот, м^2 ; z — число ножей; n_n , n_k — частота вращения ножей и чаши куттера, мин^{-1} ; $m_{\text{ф}}$ — масса фарша в куттере, кг ; r_n — радиус ножа до крайней точки, м ; R — расстояние от оси вращения чаши до оси вращения ножей, м ; a_F — коэффициент площади; ρ — плотность фарша, кг/м^3 .

2. Вопросы и задания для самоконтроля

Какие машины используются для тонкого измельчения биотехнологического сырья?

1. Какие особенности тонкого измельчения фарша для вареных и сырокопченых колбас?
2. Как изменяется структура фарша в процессе тонкого измельчения?
3. Что характеризуют экстремальные точки изменения реологических характеристик фарша в процессе измельчения?
4. Как определить оптимальное влагосодержание фарша для вареных колбас?
5. По какому уравнению можно рассчитать реологические свойства (предельное напряжение сдвига, пластичная вязкость, липкость) недокуттерованного и перекуттерованного фарша, т. е. в первой и второй зоне куттерования?
6. Как изменяется дисперсный состав, и структура фарша в процессе куттерования?
7. Как изменяется растворимость белков и водосвязывающая способность фарша в процессе тонкого измельчения и их взаимосвязь с реологическими характеристиками?
8. Как определить повышение температуры фарша в процессе куттерования?
9. Какие варианты расчета оптимальных значений влагосодержания и продолжительности измельчения фарша вы знаете?
10. Как влияет сортность сырья на продолжительность измельчения?
11. Физическая сущность обобщающей кинематической характеристики измельчающих машин и ее практическая значимость.
12. По какому виду математического уравнения изменяются сдвиговые характеристики фарша в зависимости от влагосодержания, жирности и действия на него давления?
13. Чем отличаются между собой расчеты оптимальной продолжительности измельчения для куттер-мешалки и куттера?
14. Какие воздействия на качество фарша и процесс измельчения оказывает куттерование его под вакуумом?
15. Какая последовательность расчета оптимального режима измельчения при изготовлении фарша?
16. Какие возможные варианты вы можете предложить для автоматизации и механизации процесса тонкого измельчения?

Практическое занятие №22 Теория гидродинамического (реодинамического) расчета трубопроводов

План занятий

1. Теоретическая часть
2. Вопросы и задания для самоконтроля

1. Теоретическая часть

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

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

$$p\pi r^2 = 2\pi r l \theta, \quad (5.4)$$

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

Решение уравнения (5.4) относительно θ дает

$$\theta = \frac{p}{2l} r. \quad (5.5)$$

Из уравнения (5.5) видно, что напряжение на оси трубы (при $z=0$) равно нулю, а на ее стенке θ_c при радиусе $z = R$ или диаметре d — наибольшее;

$$\theta_c = \frac{p}{2l} R = \frac{p}{4l} d, \quad (5.6)$$

где R, d — соответственно радиус и диаметр трубы.

Сопоставляя выражения (5.5) и (5.6), получаем значение напряжения на любом расстоянии от оси трубы:

$$\theta = \frac{\theta_c}{R} r. \quad (5.7)$$

Представим истинный градиент скорости $\partial u(z)/\partial z$ (где $u(z)$ — скорость слоя радиусом z) в виде функции напряжения сдвига $\dot{\gamma}(0)$:

$$-\frac{\partial u(r)}{\partial r} = \dot{\gamma}(\theta). \quad (5.8)$$

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

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

роскальзывание 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)

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

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:

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

Интегрируя по частям, получают следующее выражение:

$$V_c = u(r)\pi r^2 \Big|_0^R - \int_0^R \pi r^2 [-\dot{\gamma}(\theta) dr].$$

Так как первое слагаемое при $r = R$ и $r = 0$ обращается в нуль, то

$$V_c = \pi \int_0^R r^2 \dot{\gamma}(\theta) dr. \quad (5.9)$$

Из формулы (5.7) получаем

$$r = \frac{\theta}{\theta_c} R; \quad dr = \frac{R}{\theta_c} d\theta.$$

Тогда выражение (5.9) можно представить в самом общем виде:

$$\frac{4V_c}{\pi R^3} = \frac{4}{\theta_c^3} \int_0^{\theta_c} \theta^2 \dot{\gamma}(\theta) d\theta. \quad (5.10)$$

Уравнение (5.10) справедливо только в том случае, если закон изменения $u(0)$ выражается одной непрерывной функцией. Если функция не непрерывна, то для каждого непрерывного участка следует брать свой интеграл в соответствующих пределах. Например, по уравнению Шведова-Бингама ядро потока движется как твердый стержень, т. е. градиент скорости в нем равен нулю, и первый инте-

грал берется 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 .

Для линейной ньютоновской жидкости имеем

$$P_{\text{вязк}} = \pm \eta F \frac{du(r)}{dr} \text{ или } \theta = \frac{P_{\text{вязк}}}{F} = \eta \dot{\gamma}(\theta), \quad (5.11)$$

где $P_{\text{вязк}}$ — сила вязкого сопротивления, Н; F — площадь боковой поверхности цилиндра радиусом r , м².

Из уравнения (5.11) $u(0) = \delta/\gamma$. Элементарное интегрирование уравнения (5.10) позволяет получить уравнение Пуазейля:

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

$$\theta_c = \frac{4 V_c \cdot \eta}{\pi R^3} = \frac{32 V_c \cdot \eta}{\pi d^3}, \quad (5.12)$$

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

Имея в виду, что расход (подача) V_c (м³/с) и среднеобъемная скорость w (м/с) связаны соотношением (5.2), получаем

$$\theta_c = \frac{4w}{\eta p} = \frac{8w}{\eta d} = \frac{4 V_c \eta}{\pi R^3} = \frac{32 V_c}{\eta (\pi d^3)}. \quad (5.13)$$

В выражениях (5.12) и (5.13) по аналогии с дифференциальным законом вязкого сопротивления Ньютона (5.11) θ_c — первая консистентная переменная — «напряжение сдвига». Второй консистентной переменной является «градиент скорости» ($\dot{\gamma}$)

$$\theta_c = \frac{pR}{2l} = \frac{pd}{4l}; \quad \dot{\gamma} = \frac{32 V_c}{\pi d^3} = \frac{8w}{d}.$$

Из уравнения Пуазейля (5.12) с учетом (5.1) можно определить вязкость жидкости:

$$\eta = \frac{\pi p d^4}{128 V l} \cdot \tau. \quad (5.14)$$

Для линейной системы Шведова — Бингама дифференциальное уравнение течения имеет вид:

$$\theta_c = \theta_0 + \eta_{\text{пл}} \dot{\gamma}(\theta) \text{ или } \dot{\gamma}(\theta) = \frac{\theta - \theta_0}{\eta_{\text{пл}}}, \quad (5.15)$$

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

Подставляя выражение (5.15) в общее уравнение (5.10), получаем в правой части два интеграла:

$$\frac{4 V_c}{\pi R^3} = \frac{4}{\theta_c^3} \left[\int_0^{\theta_c} \theta^2 \dot{\gamma}(\theta) d\theta + \int_{\theta_0}^{\theta_c} \theta^2 \frac{\theta - \theta_0}{\eta_{\text{пл}}} d\theta \right], \quad (5.16)$$

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

Ниже показано интегрирование второго слагаемого правой части

$$\begin{aligned} \frac{4}{\eta_{\text{пл}} \theta_c^3} \int_{\theta_0}^{\theta_c} (\theta^3 d\theta - \theta^2 \theta_0 d\theta) &= \frac{4}{\eta_{\text{пл}} \theta_c^3} \left[\frac{\theta^4}{4} - \frac{\theta^3 \theta_0}{3} \right] = \\ &= \frac{4}{\eta_{\text{пл}} \theta_c^3} \left[\frac{\theta^4}{4} - \frac{\theta^3 \theta_0}{3} - \frac{\theta_0^4}{12} \right]. \end{aligned} \quad (5.17)$$

В выражении (5.17) за скобку можно вынести $0(1/4)$, и после сокращений получить уравнение Букингама:

$$\frac{4 V_c}{\pi R^3} = \frac{\theta_c}{\eta_{\text{пл}}} \left[1 - \frac{4\theta_0}{3\theta_c} + \frac{1}{3} \left(\frac{\theta_0}{\theta_c} \right)^4 \right]. \quad (5.18)$$

Учитывая, что

$$\theta_c = \frac{pd}{4l}; \quad \theta_0 = \frac{pd_0}{4l}$$

где $d_0 = 2Rq$ — диаметр ядра потока), уравнению (5.18) можно придать вид, подобный уравнению Пуазейля:

$$V_c = \frac{\pi p d^4}{128 \eta_{пл} l} \left[1 - \frac{4}{3} \frac{d_0}{d} + \frac{1}{3} \left(\frac{d_0}{d} \right)^4 \right] = \frac{\pi p d^4}{128 \eta_{пл} l} f\left(\frac{d_0}{d}\right). \quad (5.19)$$

В consistentных переменных уравнение (5.19) имеет вид:

$$\frac{pd}{4} = \eta_{пл} \frac{32 V_c}{\pi d^3} \cdot \frac{1}{f\left(\frac{d_0}{d}\right)}, \quad (5.20)$$

где $f(d_0/d)$ — функция ядра потока (a), ее обратные значения (b) (представлены на рис. 5.1).

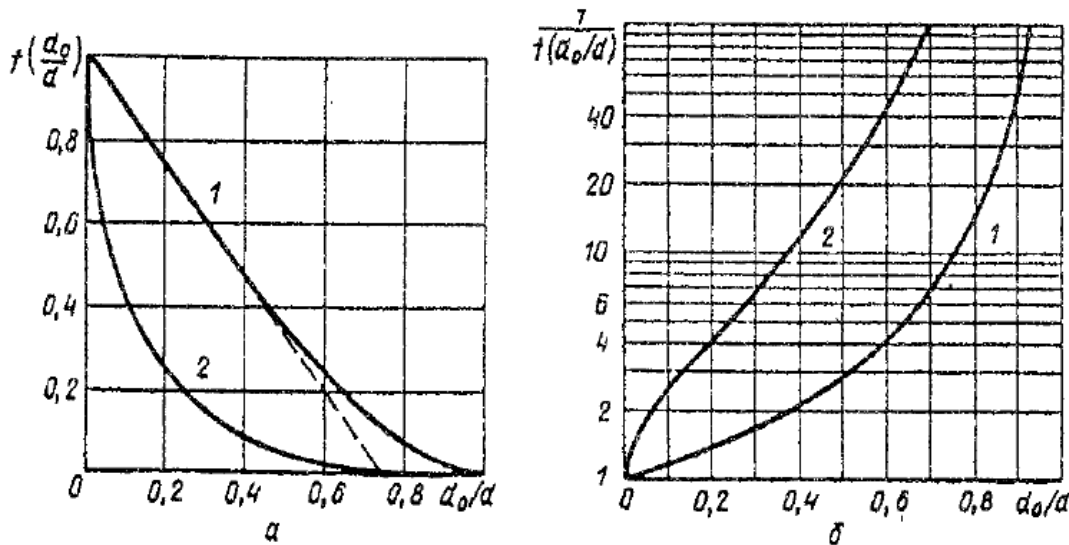


Рис. 5.1. Функция ядра потока (a) и обратная функция (b):

1 — по уравнению Букингама; 2 — по уравнению Кэссона

Для нелинейной модели Кэссона

$$\theta^{1/2} = \theta_0^{1/2} + [\eta_K \dot{\gamma}(\theta)]^{1/2} \quad \text{или} \quad \dot{\gamma}(\theta) = (\theta^{1/2} - \theta_0^{1/2})^2 \eta_K, \quad (5.21)$$

где η_K — вязкость по Кэссону, Па·с.

По аналогии с выражением (5.16) можно записать

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

Интегрирование второго слагаемого правой части по аналогии с интегрированием уравнения Шведова — Бингама позволяет получить расчетное уравнение:

$$\frac{4V_c}{\pi R^3} = \frac{\theta_c}{\eta_K} \left[1 - \frac{16}{7} \left(\frac{\theta_0}{\theta_c} \right)^{1/2} + \frac{4}{3} \cdot \frac{\theta_0}{\theta_c} - \frac{1}{21} \cdot \frac{\theta_0^4}{\theta_c^4} \right]. \quad (5.22)$$

Уравнение (5.22) приводим к виду уравнения Пуазейля:

$$V_c = \frac{\pi p d^4}{128 \eta_K l} \left[1 - \frac{16}{7} \left(\frac{d_0}{d} \right)^{1/2} + \frac{4}{3} \left(\frac{d_0}{d} \right) - \frac{1}{21} \left(\frac{d_0}{d} \right)^4 \right] = \frac{\pi p d^4}{128 \eta_K l} f \left(\frac{d_0}{d} \right). \quad (5.23)$$

В consistentных переменных выражение (5.23) записывают в следующем виде:

$$\frac{pd}{4} = \eta_K \frac{32V_c}{\pi d^3} \cdot \frac{1}{f \left(\frac{d_0}{d} \right)}, \quad (5.24)$$

где $f(d_0/d)$ — функция ядра потока (a) и ее обратное значение (b) (представлены на рис. 5.1).

Анализ уравнений (5.19) и (5.23) показывает, что при $d_0 = 0$ (предельное напряжение сдвига отсутствует) жидкость течет как истинно вязкая по закону Пуазейля; при $d_0 \rightarrow d$ (т. е. при $\theta_0 \rightarrow \theta_c$) функция приближается к нулю и течение прекращается либо для обеспечения подачи давление стремится к бесконечности. Резкое увеличение давления для жидкости Кэссона начинается при $d_0/d > 0,5$, для жидкости Бингама — при $d_0/d > 0,8$.

Для нелинейной степенной жидкости уравнение течения имеет вид:

$$\theta = B_1^* [\dot{\gamma}(\theta)]^n, \quad (5.25)$$

где B_1^* — коэффициент, пропорциональный вязкости, имеет размерность Па · с;
 n — индекс течения.

Для придания коэффициенту B_1^* смысла эффективной вязкости D^* (Па · с) при единичном (вообще произвольно выбранном) значении

градиента скорости y_u не зависящем от напряжения, умножаем правую часть уравнения на выражение

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

Тогда $B_1^* \dot{\gamma}_1^{n-1} = B_0^*$ или $B_1^* = \dot{\gamma}_1^{1-n}$, а градиент скорости

$$[\dot{\gamma}(\theta)]^n \dot{\gamma}_1^{1-n} = \left[\frac{\dot{\gamma}(\theta)}{\dot{\gamma}_1} \right]^n \dot{\gamma}_1 = [\dot{\gamma}_*(\theta)]^n \dot{\gamma}_1,$$

где $\dot{\gamma}_*(\theta)$ — приведенный безразмерный градиент скорости.

С учетом сделанных преобразований уравнение (5.10) принимает значение при $y(0) = Y_{,,}(0)Y_i$:

$$\frac{4V_c}{\pi R^3} = \frac{4}{\theta_c^3} \int_0^{\theta_c} \theta^2 \dot{\gamma}_*(\theta) \dot{\gamma}_1 d\theta. \quad (5.26)$$

При этом уравнение (5.25) претерпевает следующие изменения:

$$\theta = B_0^* [\dot{\gamma}_*(\theta)]^n \dot{\gamma}_1 \text{ или } \dot{\gamma}_*(\theta) = \left(\frac{\theta}{B_0^* \dot{\gamma}_1} \right)^{n-1}. \quad (5.27)$$

Изложенный метод позволяет из уравнения (5.25) получить величину эффективной (переменной) вязкости:

$$\theta = B_1^* [\dot{\gamma}(\theta)]^{n-1} \dot{\gamma}(\theta) \dot{\gamma}_1^{n-1} \dot{\gamma}_1^{1-n} = B_1^* [\dot{\gamma}(\theta)]^{m_1} \dot{\gamma}(\theta) = \eta_{эф} \dot{\gamma}(\theta), \quad (5.28)$$

где $\eta_{эф}$ — эффективная вязкость, Па·с; m_1 — темп разрушения структуры (меньше нуля для псевдопластичных систем и больше нуля для дилатентных).

$$m = n - 1; \eta_{эф} = B_0^* [\dot{\gamma}_*(\theta)]^{n-1}.$$

Логарифмируя последнее выражение для эффективной вязкости, получим

$$\lg \eta_{эф} = \lg B_0^* + m_1 \lg [\dot{\gamma}_*(\theta)]. \quad (5.29)$$

Логарифмическая зависимость (5.29) представляет собой линию, не выходящую из начала координат. Эффективная вязкость B_0^* соответствует значению относительного градиента сдвига i имеет про-

извольно выбранное значение. Обобщение величин эффективных вязкостей Bq , по значению y , * 1 может оказаться перспективным в том плане, что для группы продуктов представляется возможным определить характерную точку при разных y , где b_0^* будет иметь постоянное значение. Угол наклона линии по уравнению (5.29), который представляет собой темп разрушения структуры /и, в точке или на участке, можно определить как отношение дифференциалов логарифмов:

$$m_1 = \frac{\partial(\lg \eta_{\text{эф}})}{\partial(\lg \dot{\gamma} + \theta)} = \frac{\partial\{\lg \theta - \lg[\dot{\gamma}(\theta)]\}}{\partial \lg[\dot{\gamma}(\theta)]} = \frac{\partial \lg \theta}{\partial \lg[\dot{\gamma}(\theta)]} - 1 = n - 1. \quad (5.30)$$

Если в логарифмических шкалах получается прямая линия, то темп разрушения структуры постоянен и равен отношению логарифмов, если кривая, то ее следует аппроксимировать отдельными прямолинейными участками. В этом случае темп разрушения меняется скачками, но система уже не будет представлять собой степенную жидкость. Подставив (5.27) в уравнение (5.26), получим

$$\frac{4V_c}{\pi R^2} = \frac{4}{\theta_c^3} \int_0^{\theta_c} \theta^2 \frac{\theta^{1/n}}{B_0^* \dot{\gamma}_1} \dot{\gamma}_1 d\theta = \frac{4}{\theta_c^3} \int_0^{\theta_c} \frac{\theta^{2+1/n} d\theta}{(B_0^* \dot{\gamma}_1^{1-n})^{1/n}}.$$

Интегрирование дает зависимость, применимую для второго случая расчета трубопроводов:

$$\frac{4V_c}{\pi R^3} = \frac{4n}{3n+1} \dot{\gamma}_1 \left(\frac{\theta_c}{B_0^* \dot{\gamma}_1} \right)^{1/n}, \quad (5.31)$$

которая при $n = 1$ превращается в уравнение Пуазейля.

В общем случае давление по длине трубы может изменяться нелинейно, тогда заменяем напряжение сдвига на стенке его значением по уравнению (5.13)

$$\frac{4V_c}{\pi R^3} = \frac{4n \dot{\gamma}_1}{3n+1} \left[\frac{R}{2B_0^* \dot{\gamma}_1} \frac{\partial p}{\partial l} \right]^{1/n}, \quad (5.32)$$

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

Далее эту зависимость можно представить в нескольких вариантах: решить относительно расхода, напряжения или перепада давления. Для первого случая расчета трубопроводов представим уравнение (5.32) в consistentных переменных:

$$\theta_c = B_0^* \dot{\gamma}_1 \left(\frac{3n+1}{4n} \right)^n \left(\frac{8w}{\dot{\gamma}_1 d} \right)^n, \quad (5.33)$$

или

$$\theta_c = A_1 \dot{\gamma}_*^n, \quad (5.34)$$

где A_1 — напряжение сдвига на стенке трубы при единичном значении относительного градиента скорости, Па; $\dot{\gamma}_*$ — относительный градиент скорости на стенке (consistentная переменная); n — индекс течения; если в логарифмических шкалах экспериментальная кривая линия спрямляется, то он равен отношению логарифмов.

$$A_1 = B_0^* \dot{\gamma}_1 \left(\frac{3n+1}{4n} \right)^n; \quad \dot{\gamma}_* = \frac{8w}{\dot{\gamma}_1 d}; \quad n = \frac{\partial \left[\lg \frac{pd}{4l} \right]}{\partial \left[\lg \frac{8w}{\dot{\gamma}_1 d} \right]}.$$

Зная consistentные переменные из экспериментов, отложив экспериментальные точки в логарифмических шкалах и проведя прямую линию, по формуле (5.34) легко определять A_1 и n , & далее вычислить вязкость (четвертый случай расчета):

$$B_0^* = A_1 \dot{\gamma}_1^{-1} \left(\frac{4n}{3n+1} \right)^n = A_1 \dot{\gamma}_1^{-1} f_1(n), \quad (5.35)$$

где $f_1(n)$ — функция индекса течения (для облегчения расчетов построена на рис. 5.2).

$$f_1(n) = \left(\frac{4n}{3n+1} \right)^n.$$

В частном случае для ньютоновской жидкости при индексе течения равном единице формулы (5.33) и (5.35) превращаются в уравнение Пуазейля (5.12).

Уравнение (5.33) можно также представить как напряжение сдвига на стенке в зависимости от истинного относительного градиента скорости:

$$\dot{\gamma}_{*ист} = \frac{3n+1}{4n} \cdot \frac{8w}{\dot{\gamma}_1 d}, \quad (5.36)$$

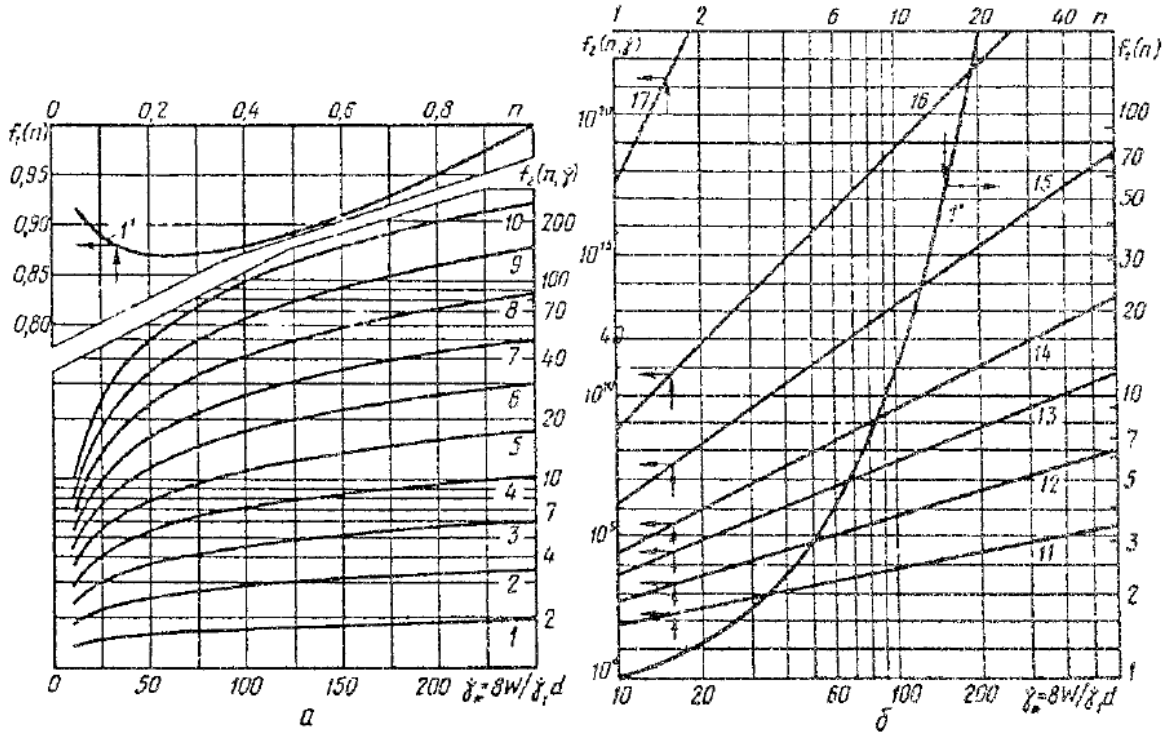


Рис. 5.2. Графики для определения функций течения в трубопроводах:

a — функция индекса течения по формуле (5.35); *б* — функция индекса течения и среднего градиента скорости по формуле (5.38) в зависимости от числовых значений градиента скорости при различных индексах течения; 1...17 соответствуют индексам течения 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0; 2,0; 3,0; 4,0; 5,0; 7,0; 10,0; 20,0

т. е. в виде

$$\theta_c = (B_0 \dot{\gamma}_1^*) \dot{\gamma}_{*ист}^n. \quad (5.37)$$

Для облегчения расчетов трубопроводов по формуле (5.33) на рис. 5.2, б (кривые 1...17) построена функция:

$$f_2(n, \dot{\gamma}) = \left(\frac{3n+1}{4n} \cdot \frac{8w}{\dot{\gamma}_1 d} \right)^n. \quad (5.38)$$

Индекс течения в дифференциальном уравнении течения и в consistentных переменных, если в логарифмических шкалах получается прямая линия, одинаков. В общем случае для уравнений (5.37) и (5.38) индекс течения может отличаться. Тогда по формуле (5.34) будет определен n' и истинный градиент скорости на стенке:

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

В дифференциальное уравнение (5.25) $0 = B^* \{ \partial u / \partial z \}^n$ входит истинный индекс течения n , который со средним связан следующим соотношением

$$n = \frac{\partial(\ln \theta_c)}{\partial \left[\ln \left(\frac{3n'+1}{4n'} \cdot \frac{8w}{d} \right) \right]} = \frac{n'}{1 - \frac{1}{3n'+1} \cdot \frac{\partial n'}{\partial(\ln \theta_c)}}$$

или

$$\frac{1}{n} = \frac{1}{n'} + \frac{\partial \left(\ln \frac{3n'+1}{4n'} \right)}{\partial(\ln \theta_c)}. \quad (5.39)$$

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

Градиент скорости по живому сечению потока определяется эпюрой скоростей $u(z)$. Если эпюру скоростей удастся описать математической зависимостью, то интегрирование уравнения (5.10) обычно не представляет затруднений. Для установления вида функций $u(0)$ и $u(z)$ используют данные вискозиметрии, описав поведение продукта той или иной математической моделью, или определяют режим движения, применяя дифференциальный метод исследования. Характер распределения скоростей и деформаций по поперечному сечению потока, наряду с величинами реологических характеристик и типом структуры, обуславливает выбор расчетной формулы для определения потерь давления.

Традиционно — со времени опубликования уравнения Букин-гама — исследователи пытались представить течение пластичновязкого тела в виде структурного режима, при котором центральная часть потока (ядро) движется как твердый стержень с максимальной скоростью, испытывая незначительные деформации. Наибольшие деформации в ядре возникают в момент начала движения. В следую-

щем цилиндрическом (промежуточном) слое скорость уменьшается несколько быстрее, чем в ядре. В пристенном слое скорость достигает нулевого значения, т. е. тончайший слой продукта прилипает к стенке трубы вследствие высокой адгезии. Такой механизм движения может вызвать перемещение к стенке мельчайших частиц третьей фазы, особенно заметное, если они обладают пониженной когезионной способностью к двум другим фазам и повышенной адгезионной способностью к материалу стенки трубы.

$$\frac{u}{w} = \frac{1 + 3n}{1 + n} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^{\frac{n+1}{n}} \right], \quad (5)$$

где u — локальная скорость, т. е. скорость элементарного слоя, расположенного на расстоянии r от оси трубы, м/с; w — средняя скорость потока по уравнению (5. с. 199, м/с; n — индекс течения; R — внутренний радиус трубы, м.

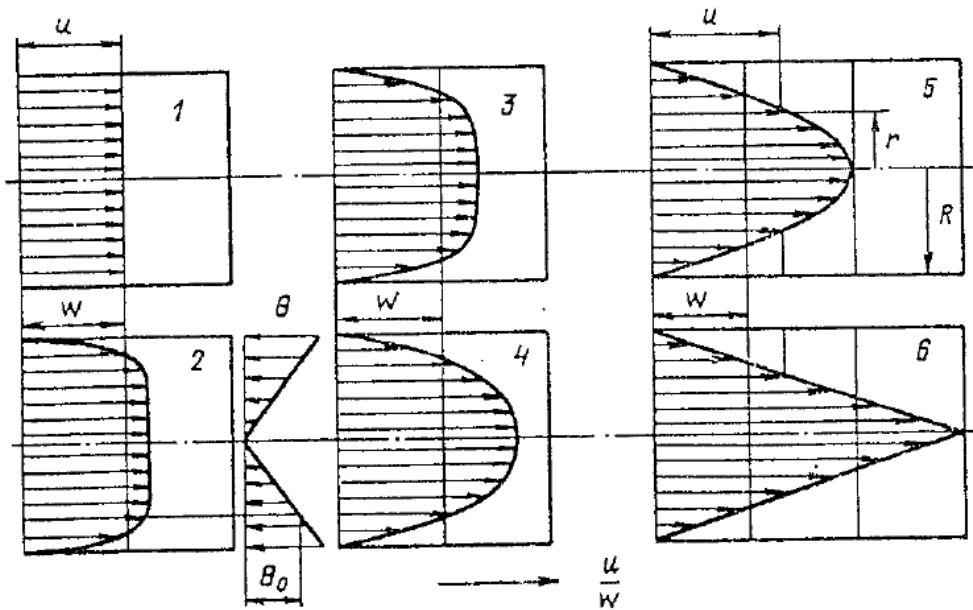


Рис. 5.3. Эпюры относительных скоростей при течении по круглой трубе «степенной жидкости», имеющей различные индексы течения:

1 — 0; 2 — 0,1; 3 — 0,2; 4 — 0,5; 5 — 1,0; 6 — ∞; w — среднеобъемная скорость; u — локальная скорость элементарного слоя; θ — напряжение сдвига; θ_0 — предельное напряжение сдвига

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

частиц очень мало. Значительно расширяет представление о режимах течения рассмотрение модели движения «степенной жидкости». На рис. 5.3 построены эпюры скоростей для круглой трубы при различном индексе течения жидкости:

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

$$u = \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^{\frac{n+1}{n}} \right] \cdot \frac{R \dot{\gamma}_1 n}{1+n} \cdot \frac{R}{2 \dot{\gamma}_1 B_0^*} \cdot \frac{\partial p}{\partial l}, \quad (5.41)$$

$$w = \frac{R \dot{\gamma}_1 n}{1+3n} \cdot \left[\frac{R}{2 \dot{\gamma}_1 B_0^*} \cdot \frac{\partial p}{\partial l} \right]^{1/n}, \quad (5.42)$$

где B_0^* — эффективная вязкость при единичном градиенте скорости, Па·с; $\partial p / \partial l$ — градиент давления по длине трубы, Па/м.

Скорость в центре трубы определяют из выражения (5.41) при $z = 0$. Для всех эпюр характерно то, что объем заштрихованного тела вращения равен объемной секундной подаче жидкости среднеобъемная скорость постоянна.

По аналогии с эпюрами скоростей на рис. 5.4 построены теоретические эпюры градиентов скоростей по уравнению, полученному путем дифференцирования уравнения (5.40):

На рис. 5.4 показаны также числовые значения максимального градиента скорости на стенке в долях радиуса трубы, если среднеобъемная скорость постоянна для всех случаев (например равна 1 м/с).

Для вычисления градиента на стенке и относительной (условной) толщины градиентного слоя приведены графики их зависимости от индекса течения. Кривая 1 для предельно дилатентных систем (бесконечно большой индекс течения) имеет нижний предел, равный 3, кривая 2 имеет верхний предел, равный единице.

Сравнение эпюр скоростей и градиентов скоростей показывает, что при малых индексах течения (0,1; 0,2; 0,3) относительная скорость смещения в ядре потока мала, градиент скорости практически равен нулю.

Это позволяет распространить действие закона степенной жидкости на пластично-вязкие системы, обладающие предельным напряжением сдвига, что значительно облегчает практические рас-

четы трубопроводов и повышает их точность и достоверность. Последнее обусловлено тем, что математическая модель степенной жидкости в правой части содержит одно слагаемое и характеризуется двумя экспериментально определяемыми параметрами. Пластично-вязкие системы в зависимости от вида математической модели течения в правой части имеют несколько слагаемых при двух и более определяемых параметрах. Поскольку каждый параметр измеряют с определенной ошибкой, то чем больше параметров, тем больше вероятная ошибка в расчетах.

Кривые течения многих пластично-вязких систем (при скоростях, не приближающихся к нулю) можно аппроксимировать на отдельных участках прямыми линиями двухпараметрической степенной модели, если построение графиков проводить в логарифмических шкалах. Поэтому для практических целей зачастую отпадает необходимость в усложнении исходной дифференциальной модели, если учитывать отмеченное выше.

При движении псевдопластичных, пластично-вязких и других систем с высокими скоростями их структура может быть предельно разрушена. Тогда начинает действовать закон ньютоновского течения. При дальнейшем увеличении скорости может развиваться турбулизация потока, и все уравнения, приведенные в разд. 5.2, не применимы. Представляет интерес интегрирование общего уравнения Гершеля — Балкли:

$$\theta = \theta_0 + B_0^* \dot{\gamma}_1^{1-n} [\dot{\gamma}(\theta)]^n \quad (5.44)$$

или

$$\dot{\gamma}(\theta) = \frac{(\theta - \theta_0)^{1/n}}{(B_0^* \dot{\gamma}_1^{1-n})^{1/n}}, \quad (5.45)$$

которое обобщает математические модели течения истинно вязкой (5.11), бингамовской (5.15) и (5.18), степенной (5.25) и (5.31) и других (по индексу течения) жидкостей. Привести результаты этого интегрирования тем более необходимо, что многие исследователи путают дифференциальную модель по (5.44), где градиент скорости представлен по зависимости (5.8), с. 202, подставляя в уравнение (5.44) интегральные консистентные переменные из уравнения (5.10). Такое действие принципиально неверно, и в лучшем случае можно говорить об использовании эмпирического уравнения вида:

$$\frac{pd}{4l} = \theta_0 + K\left(\frac{8w}{d}\right)^n, \quad (5.46)$$

где K и n — константы, по смыслу подобные аналогичным в зависимости (5.25); θ_0 — предельное напряжение сдвига.

$$\theta_0 = \frac{pd_0}{4l}.$$

Подставляя в общее уравнение (5.10) значение градиента скорости по (5.45), получаем два интеграла, аналогичных (5.16), — первый равен нулю, а второй дает расчетную зависимость:

$$\frac{4V_c}{\pi R^3} = \frac{4}{\theta_c^3} B_0^{*n} \dot{\gamma}_1^{\frac{1-n}{n}} n(\theta_c - \theta_0)^{\frac{n+1}{n}} \cdot \left[\frac{(\theta_c - \theta_0)^2}{3n+1} + \frac{2\theta_0(\theta_c - \theta_0)}{2n+1} + \frac{\theta_0^2}{n+1} \right]. \quad (5.47)$$

Преобразования, аналогичные (5.18), позволяют получить зависимость, которая обобщает формулы (5.19) при $n = 1$ и (5.32) при $n \neq 1$, но при наличии предельного напряжения сдвига. Она применима для расчета трубопроводов по второму случаю:

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

где X — симплекс геометрического подобия бингамовского течения потока жидкости (для сокращения величин в формуле): $X = d_0/d$.

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

$$\frac{4V_c}{\pi R^3} = \frac{4n}{3n+1} \left(\frac{\theta_c}{B_0^* \dot{\gamma}_1^{1-n}} \right)^{1/n} f_3(n, d_0/d), \quad (5.48)$$

где $f_3(n, d_0/d)$ приведена на рис. 5.5.

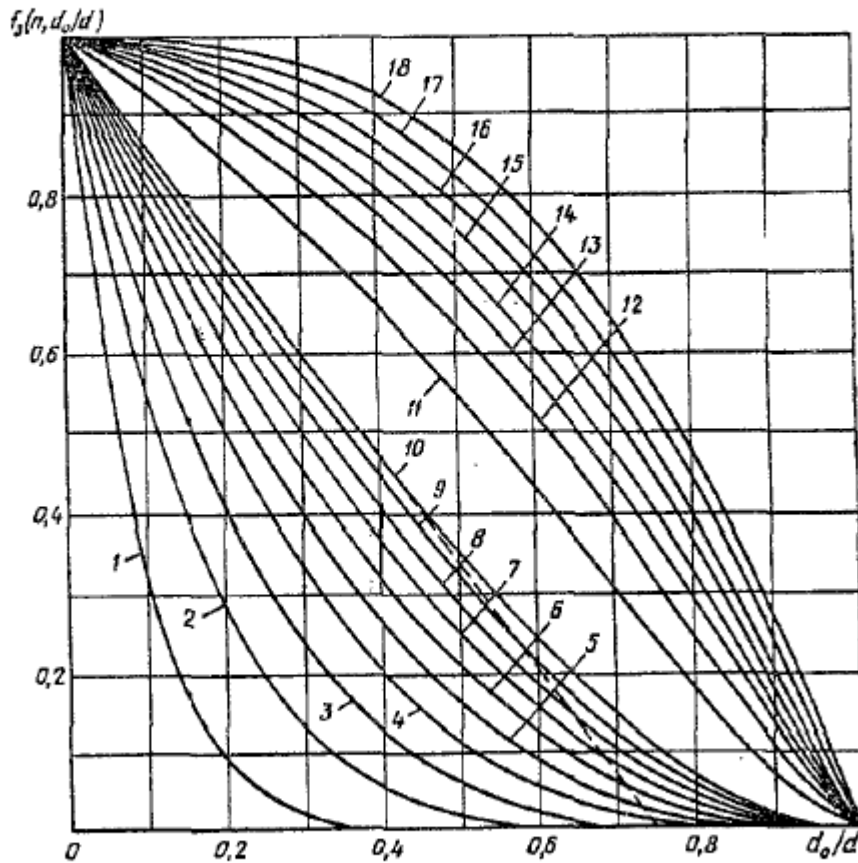


Рис. 5.5. Функция ядра потока по уравнению Гершеля-Балкли при различных индексах течения:

1...18 соответствуют индексам течения 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0; 2,0; 3,0; 4,0; 5,0; 7,0; 10,0; 20,0; 100,0

Применительно к расчету трубопроводов по первому случаю уравнение (5.48) можно представить в consistentных переменных по аналогии с уравнением (5.33):

$$\theta_c = B_0^* \dot{\gamma}_1 f_2(n, \dot{\gamma}_1) \left(\frac{1}{f_3(n, d_0/d)} \right)^n, \quad (5.49)$$

где $f_2(n, \dot{\gamma})$ — по зависимости (5.38) дана на рис. 5.2; $[1/f_3(n, d_0/d)]^n$ — по зависимости (5.49) представлена на рис. 5.6.

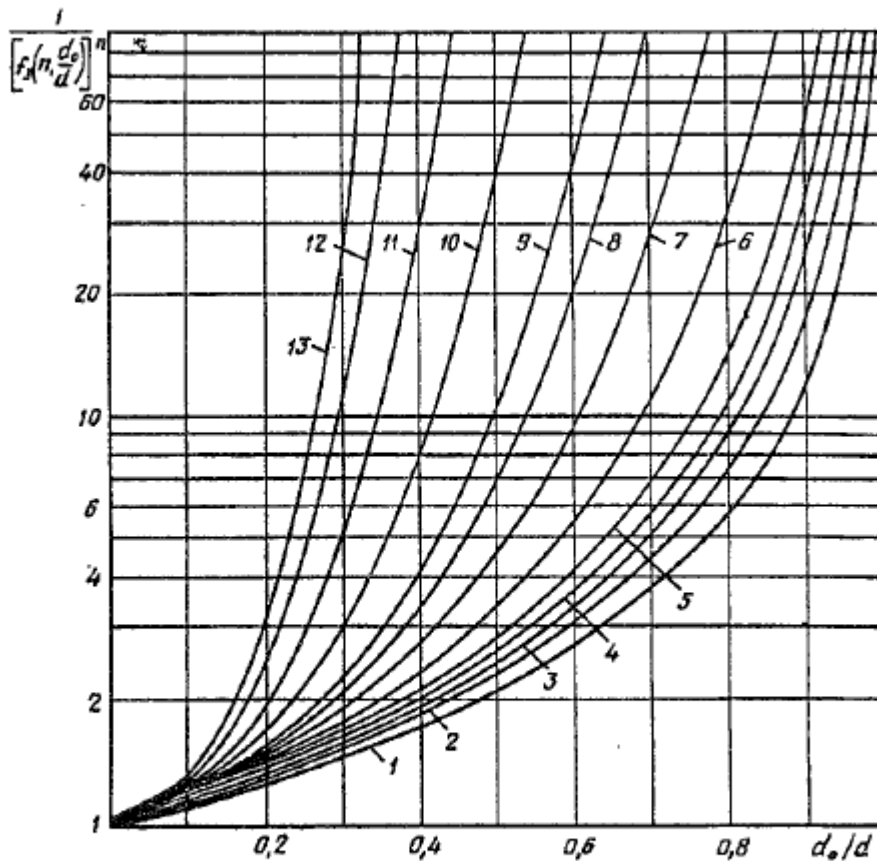


Рис. 5.6. Обратная функция ядра потока по уравнению Гершеля — Балкли при различных индексах течения:

1...13 соответствуют индексам течения 0,1; 0,3; 0,5; 0,7; 1,0; 2,0; 4,0; 7,0; 10,0; 20,0; 40,0; 70,0; 100,0

Перспективны для обобщений процессов движения критериальные зависимости, в том числе использующие критерии Рейнольдса с эффективной вязкостью, числом пластичности и пр.

Полученные -уравнения течения охватывают определенный класс подобных явлений. Для установления границ каждого такого класса базируются на основных положениях теории подобия, которая стала общепризнанной теорией экспериментальных исследований. Критерии подобия, выведенные из дифференциальных уравнений, представляют собой вполне устойчивые комбинации отдельных переменных. Они позволяют получить обобщенные уравнения с ограниченным числом критериев для расчета разнообразных случаев перемещения материалов (имеются в виду сравнительно простые реологические системы).

Критериальное уравнение динамики движения пластично-вязких масс получено на основании л-теоремы анализа размерностей. Согласно этой теореме, общую функциональную зависимость,

которая включает A^7 переменных величин при k основных единицах их измерения, можно представить в виде зависимости между безразмерными комплексами этих величин ($N - k$), а при наличии подобия — в виде связи между соответствующим количеством критериев подобия.

Выше было показано [формулы (5.18), (5.19)], что потери давления при движении по трубе пластично-вязкого продукта можно представить общей функциональной зависимостью:

$$p = \varphi(l, d, \Delta, \theta_0, \eta, \rho, w), \text{ т. е. } N = 8.$$

В безразмерном виде она принимает вид:

$$\pi_1 = \varphi_1(\pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6, \pi_7, \pi_8).$$

В системе СИ имеются три основные единицы измерения: длина — метр (геометрический фактор), масса — килограмм (динамический фактор), время — секунда (кинематический фактор). После преобразований должно остаться $8 - 3 = 5$ безразмерных комплексов.

Для каждой единицы измерения необходимо выбрать носитель размерности — соответствующую физическую величину. К носителям размерности предъявляются следующие требования: им может быть характерная для процесса определяющая величина, стоящая под знаком функции, но не определяемая, расположенная в левой части зависимости. Выбор носителя размерности имеет эвристический характер, и после получения критериальной зависимости она нуждается в экспериментальной проверке.

В представленной зависимости к геометрическим факторам относятся: длина l , диаметр d , высота выступов шероховатости Δ . Потери давления прямо пропорциональны длине, высота выступов при движении пластично-вязких мясных и молочных продуктов по гладким трубам не влияет на процесс, поэтому носителем размерности принимаем диаметр.

К динамическим факторам относятся потери давления, предельное напряжение сдвига, вязкость и плотность. Потери давления не могут быть носителем размерности. Из трех оставшихся выбираем предельное напряжение сдвига (если в качестве носителя размерности принять вязкость или плотность, то графоаналитическая

обработка полученного уравнения дает степенную зависимость с небольшим показателем степени, т. е. малочувствительную к изменению определяющих переменных).

К кинематическим факторам относится среднеобъемная скорость. Ее принимаем в качестве носителя размерности времени. Физические величины и критерии подобия сведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Физические величины и соответствующие им критерии подобия

Физическая величина и ее размерность	Вид критерия подобия	
	в общей форме	в расчетной форме
$\rho, \text{кг} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{с}^{-2}$	$\pi_1 = \frac{\rho}{d^{X_1} \theta_0^{Y_1} w^{Z_1}}$	$\frac{\text{Eu}}{\text{Eu}} = \frac{\rho}{\theta_0}$
$l, \text{м}$	$\pi_2 = \frac{l}{d^{X_2} \theta_0^{Y_2} w^{Z_2}}$	$\frac{l}{d}$
$d, \text{м}$	$\pi_3 = \frac{d}{d^{X_3} \theta_0^{Y_3} w^{Z_3}}$	$\frac{d}{d} = 1$
$\Delta, \text{м}$	$\pi_4 = \frac{\tau}{d^{X_4} \theta_0^{Y_4} w^{Z_4}}$	$\frac{\Delta}{d}$
$\theta_0, \text{кг} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-2}$	$\pi_5 = \frac{\theta_0}{d^{X_5} \theta_0^{Y_5} w^{Z_5}}$	$\frac{\theta_0}{\theta_0} = 1$
$\eta, \text{кг} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$	$\pi_6 = \frac{\eta}{d^{X_6} \theta_0^{Y_6} w^{Z_6}}$	$\frac{1}{\text{Eu} \cdot \text{Re}} = \frac{\eta w}{\theta_0 d}$
$\rho, \text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$	$\pi_7 = \frac{\rho}{d^{X_7} \theta_0^{Y_7} w^{Z_7}}$	$\frac{1}{\text{Eu}'} = \frac{\rho w^2}{\theta_0}$
$w, \text{м} \cdot \text{с}^{-1}$	$\pi_8 = \frac{w}{d^{X_8} \theta_0^{Y_8} w^{Z_8}}$	$\frac{w}{w} = 1$

Примечание. Eu — критерий Эйлера, характеризующий соотношение в потоке потенциальной и кинетической энергии (или отношение работы сил давления к кинетической энергии); Eu' — видоизмененный критерий Эйлера (число пластичности), характеризующий соотношение работы пластических сил и кинетической энергии в потоке.

Критерии подобия формируются по следующему принципу. В числителе дроби помещена соответствующая величина, в знаменателе — носители размерности в таких степенях, чтобы размерность всей дроби была равна единице. Задача преобразований заключается в отыскании этих степеней.

Преобразуем первый критерий:

$$p = \pi_1 d^{X_1} \theta_0^{Y_1} w^{Z_1}.$$

Вместо физических величин подставляем их размерность:

$$\text{кг} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{с}^{-2} = 1 \text{ м}^{X_1} \cdot \text{кг}^{Y_1} \cdot \text{м}^{-Y_1} \cdot \text{с}^{-2Y_1} \cdot \text{м}^{Z_1} \cdot \text{с}^{-Z_1}.$$

Показатели степеней у одноименных оснований в левой и правой частях должны быть одинаковы:

- для массы: $1 = Y_1$, откуда $Y_1 = 1$;
- для времени: $-2 = -2Y_1 - Z_1$, откуда $Z_1 = 0$;
- для длины: $-1 = X_1 - Y_1 + Z_1$, откуда $X_1 = 0$.

Отсюда первый критерий имеет вид:

$$\pi_1 = \frac{p}{\theta_0} \text{ или } \pi_1 = \frac{p}{\rho w^2} \cdot \frac{\rho w^2}{\theta_0} = \frac{Eu}{Eu'}, \text{ где } Eu = \frac{p}{\rho w^2}; Eu' = \frac{\theta_0}{\rho w^2}.$$

Преобразования для остальных критериев аналогичны, результаты их приведены в табл. 5.1. При этом, если в числителе и знаменателе имеются величины с одинаковыми размерностями, как видно из предыдущего, то критерий представляет отношение этих величин. Если в числителе и знаменателе стоит одна и та же величина, то критерий вырождается в единицу (см. табл. 5.1). Преобразования для шестого критерия дают

$$\pi_6 = \frac{\eta w}{\theta_0 d} \text{ или } \frac{1}{Eu' Re} = \frac{\rho w^2}{\theta_0} \cdot \frac{\eta}{w d \rho}.$$

Для того чтобы показать методическую общность вывода других критериев, рассмотрим преобразование седьмого критерия:

$$\rho = \pi_7 d^{X_7} \theta_0^{Y_7} w^{Z_7}.$$

Вместо физических величин подставляем их размерности:

$$\text{кг} \cdot \text{м}^{-3} = 1 \text{ м}^{X_7} \cdot \text{кг}^{Y_7} \cdot \text{м}^{-Y_7} \cdot \text{с}^{-2Y_7} \cdot \text{м}^{Z_7} \cdot \text{с}^{-Z_7}.$$

Как видно, правая часть полностью сходна с правой частью первого критерия. Аналогично определяют показатели степеней:

- ♦ для массы: $1 = Y_7$, откуда $Y_7 = 1$;
- ♦ для времени: $0 = -2Y_7 - Z_7$, откуда $Z_7 = -2$;
- ♦ для длины: $3 = X_7 - Y_7 + Z_7$, откуда $X_7 = 0$.

Тогда седьмой критерий имеет вид:

$$\pi_7 = \frac{\rho w^2}{d^0 \theta_0} = \frac{\rho w^2}{\theta_0} \text{ или } \pi_7 = \frac{1}{\text{Eu}'}$$

Таким образом, исходную критериальную зависимость можно представить в двух вариантах;

$$\frac{p}{\theta_0} = \varphi_1\left(\frac{l}{d}, \frac{\Delta}{d}, \frac{\eta w}{\theta_0 d}\right) \cdot \left(\frac{\rho w^2}{\theta_0}\right)^{-1};$$

$$\frac{\text{Eu}}{\text{Eu}'} = \varphi_1\left(\frac{l}{d}, \frac{\Delta}{d}, \frac{1}{\text{Eu}' \text{Re}}, \frac{1}{\text{Eu}'}\right).$$

Экспериментальная проверка показала, что выступы шероховатости сколько-нибудь заметного влияния на потери давления не оказывают, поэтому относительной шероховатостью — симплексом подобия A/d можно пренебречь.

Седьмой критерий, в который входит плотность, также может быть опущен, поскольку плотность пластично-вязких мясных и молочных продуктов изменяется незначительно. Эти изменения следует учесть, вводя в качестве множителя скорости относительную плотность.

Таким образом, критериальное уравнение для расчета трубопроводов при движении по ним пластично-вязких мясных и молочных продуктов приобретает следующий вид:

$$\frac{\text{Eu}}{\text{Eu}'} = f\left(\frac{l}{d}, \text{Eu}', \text{Re}_{\text{эф}}\right) \text{ или } \frac{\text{Eu}}{\text{Eu}'} = C \frac{l}{d} (\text{Eu}' \cdot \text{Re}_{\text{эф}})^{-q}, \quad (5.50)$$

где C — коэффициент, зависящий от диаметра, м; $C = a_1 d^{a_2}$ (для фаршепроводов $a_1 = 1800$, $a_2 = 1.082$, $q = 0,882$).

Критерий Рейнольдса вычисляют по эффективной вязкости [см. формулу (5.3), с. 200].

$$\text{Re}_{\text{эф}} = wd \frac{\rho}{\eta_{\text{эф}}}.$$

Из формулы (5.50) получают расчетную зависимость:

$$\frac{\rho d}{\theta_0 l} = C \left(\frac{\theta_0}{\eta_{\text{эф}} \rho_{\text{отн}} w} \right)^{-q}, \quad (5.51)$$

где $\rho d / (\theta_0 l)$ — комплекс, пропорциональный отношению напряжения на стенке трубы и предельному напряжению сдвига; $\rho_{\text{отн}}$ — относительная плотность продукта; $\rho_{\text{отн}} w$ — комплекс, позволяющий учитывать отклонение плотности для различных продуктов, м/с.

Критериальное уравнение можно использовать для различных случаев внутреннего и внешнего обтекания твердых тел.

В расчетном аппарате реодинамики неньютоновских жидкостей, к которым относятся большинство пластично-вязких мясных и молочных продуктов, широко распространены приведенные выше уравнения. В гидравлике ньютоновских или приближающихся к ним по свойствам жидкостей используют водопроводные формулы. Первая водопроводная формула для ламинарного движения аналитически получается из уравнения Пуазейля (5.12), с. 204. В общем виде для любого режима движения ее можно получить методом анализа размерностей в виде критериальной зависимости:

$$\text{Eu} = \frac{l}{d} f\left(\frac{1}{\text{Re}}, \frac{\Delta}{d}\right),$$

где Re — критерий Рейнольдса [см. (5.3), с. 200]; Δ — абсолютная величина выступов шероховатостей на внутренней поверхности трубы, м;

откуда

$$p = \lambda \frac{l}{d} \rho \frac{w^2}{2}, \quad (5.52)$$

где λ — коэффициент гидравлического сопротивления (для описанных выше моделей течения определяют аналитически с последующей проверкой, для различных зон турбулентного движения устанавливают на основе обработки экспериментальных данных):

$$\lambda = 2f\left(\frac{1}{\text{Re}}, \frac{\Delta}{d}\right).$$

$$\text{Eu} = \frac{\rho}{\rho w^2}.$$

Общую формулу для коэффициента гидравлического сопротивления для гидравлически гладких труб можно представить в следующем виде:

$$\lambda = \frac{K}{\text{Re}^a}, \quad (5.53)$$

где K и a — коэффициенты, которые можно определить для различных видов движения аналитически и эмпирически ($K = 64$, $a = 1$).

Для степенной жидкости по формуле (5.25) критерий Рейнольдса имеет значение:

$$\text{Re}_{\text{ст}} = \frac{d^n w^{2-n} \rho}{B_1^* 8^{n-1}}. \quad (5.54)$$

Часто используют уравнения Букингама (5.19) и (5.20), с. 206, аппроксимируя криволинейную трехчленную зависимость двучленом. Тогда критерий Рейнольдса приобретает вид:

$$\text{Re}^* = \frac{wd\rho}{\eta_{\text{пл}}(1 + b\text{Ил})}, \quad (5.55)$$

где Re^* — критерий Рейнольдса, вычисленный по пластической вязкости; Ил — критерий Ильюшина, пропорциональный отношению работы сил пластичности к работе сил вязкого сопротивления.

$$\text{Re}^* = \frac{wd\rho}{\eta_{\text{пл}}}; \quad \text{Ил} = \frac{\theta_0 d}{w\eta_{\text{пл}}}.$$

Виды аппроксимаций, значения коэффициентов к формулам (5.53) и (5.55) даны в табл. 5.2 (коэффициент $a = 1$).

Анализ обобщенных критериев Рейнольдса

Значения коэффициентов		Вид аппроксимаций	Средняя толщина слоя сдвига	Диапазон изменения относительного диаметра ядра потока
к уравнению (5.55) — b	к уравнению (5.53) — K			
$\frac{1}{8}$	$\frac{1}{64}$	$1 - \frac{d_0}{d}$	$0,25R$	В граничных точках $w \approx 0, \frac{d_0}{d} = 1; w \rightarrow \infty, \frac{d_0}{d} = 0$
$\frac{1}{8}$	$\frac{1}{75}$	$0,855 - \frac{d_0}{d}$	$0,25R$	0,4...08
$\frac{1}{6}$	$\frac{1}{64}$	$1 - \frac{4}{3} \cdot \frac{d_0}{d}$	$0,33R$	0...0,5
$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{64}$	$1 - \frac{8}{3} \cdot \frac{d_0}{d}$	$0,66R$	0...0,25
$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{64}$	$1 - 4 \cdot \frac{d_0}{d}$		В граничной точке $\frac{d_0}{d} = 0$
$\frac{1}{20}$	$\frac{1}{168,5}$	$0,38 - 0,4 \cdot \frac{d_0}{d}$	$0,1R$	0,6...095
$\frac{1}{25}$	$\frac{1}{200}$	$0,32 \left(1 - \frac{d_0}{d}\right)$	$0,08R$	0,75...1,0

2. Вопросы и задания для самоконтроля

1. Какие допущения используются «теории реодинамики»?
2. Как распределяются напряжение и подача жидкости по сечению трубы?
3. Проинтегрируйте уравнение (5.10) для моделей «степенной» и «бингамовской» систем.
4. Что характеризует и каков физический смысл уравнения Пуазсйля?
5. Дифференциальное уравнение течения для линейной системы Шведова — Бингама.
6. Проинтегрируйте уравнение (5.16) для моделей течения Кэссона.
7. Объясните физический смысл уравнения Букингама.
8. Объясните графический и физический смысл индекса течения n .

9. Как из уравнения (5.25) можно получить величину эффективной (переменной) вязкости?
10. Физический смысл темпа разрушения структуры t .
11. Как уравнение (5.32) (в общем виде, когда давление подлине трубы изменяется нелинейно) решить относительно расхода, напряжения или перепада давления?
12. Рассчитайте и постройте эпюры скоростей для индексов течения 0,3; 0,6; 10,0; 20,0.
13. Метод получения критериев (л-теорема).
14. Критериальное уравнение динамики движения пластично-вязких масс.

Практическое занятие №23 Техничко-экономические расчеты трубопроводного транспорта. Истечение пластично-вязких продуктов через отверстия и насадки.

План занятий

1. Теоретическая часть
2. Вопросы и задания для самоконтроля

1. Теоретическая часть

Межоперационное транспортирование твердообразных и кусковых продуктов осуществляют с помощью тележек, желобов и спусков трубопроводов. Наиболее прогрессивным видом транспорта из названных выше является трубопроводный при оптимальных параметрах его работы. Для этого можно использовать трубы из нержавеющей стали, стекла или пластмасс.

Трубопроводы почти полностью устраняют недостатки, присущие тележкам и желобам. Их можно применять в любых условиях производства. С их помощью можно полностью механизировать процесс транспортирования, исключить прикосновение рук рабочего к продукции, создать условия для внедрения в промышленность автоматизированных поточных линий, резко сократить производственные площади, так как трубопровод можно установить под потолком цеха.

Применение этого прогрессивного вида межоперационного транспорта при сохранении качества перекачиваемого продукта в наибольшей степени отвечает задачам дальнейшей механизации и автоматизации производства. Перспективы использования трубопроводного транспорта расширяются в связи с увеличением в мясной и молочной промышленности предприятий одноэтажного и малоэтажного типа.

Однако нельзя отдавать абсолютное предпочтение какому-либо одному виду межоперационного транспорта. Рациональным сочетанием различных видов можно создать предприятие с минимальными затратами материальных и трудовых средств на внутренний транспорт.

Стоимость транспортных операций в случаях применения фар-шепроводов в 4,5 раза, желобов в 5 раз ниже, чем в случае использования тележек. При использовании желобов и, особенно, фаршепрово-дов улучшаются показатели, которые нельзя выразить в денежном исчислении.

Таким образом, среди рассмотренных видов транспорта наиболее прогрессивным для мясного фарша является трубопроводный для одноэтажных колбасных заводов и цехов и трубопроводный в сочетании со спусками и желобами — для многоэтажных колбасных заводов.

Наибольший экономический эффект при трубопроводном транспорте пластично-вязких мясных, молочных и рыбных продуктов можно достигнуть в том случае, когда диаметр, определяющий стоимостные и энергетические показатели установки, будет оптимальным.

Такой трубопровод должен иметь минимальную суммарную стоимость эксплуатации, которая включает в себя стоимость электроэнергии, насосной установки и самого трубопровода. Эксплуатационные расходы при транспортировании продукта по трубопроводам складываются из амортизации, текущего ремонта и стоимости труб и электроэнергии. Общая стоимость в рублях на 1 т передаваемой продукции:

$$C = C_a + C_э = kl \frac{at}{m_T M_{см}} (C_T + m) + \frac{N\tau C'_э}{M_{см} K_0}, \quad (5.71)$$

где C_a — стоимость амортизации и текущего ремонта трубопровода, руб./т; $C_э$ — стоимость электроэнергии для передачи продукта, руб/т; k — коэффициент затрат на непредвиденные работы, арматуру и доставку труб к месту сборки; l — геометрическая длина трубопровода, м; a — коэффициент амортизации в долях единицы, 1/год; t — коэффициент затрат на текущий ремонт, 1/год; m_T — число рабочих смен в году, смен/год; $M_{см}$ — производительность за эффективное время работы в смену, г в смену; C_T — стоимость 1 м трубы, руб./м; m — стоимость монтажа 1 м трубы, руб./м; N — полезная мощность, развиваемая насосом, кВт; τ — эффективное время работы насоса в смену, ч/смену; $C'_э$ — стоимость 1 кВт·ч электроэнергии, руб./(кВт·ч); K_0 — общий КПД насоса, передач, электродвигателя.

Некоторые величины уравнения (5.71) можно представить в виде комплексов или, наоборот, в виде зависимостей от других, более простых параметров.

Количество перекачиваемой продукции M (т) за время, в течение которого C_a становятся равными первоначальному затратам;

$$C = C_a + C_3 = kl \frac{at}{m_T M_{cm}} (C_T + m) + \frac{N\tau C'_3}{M_{cm} K_0}, \quad (5.71)$$

где C_a — стоимость амортизации и текущего ремонта трубопровода, руб./т; C_3 — стоимость электроэнергии для передачи продукта, руб./т; k — коэффициент затрат на непредвиденные работы, арматуру и доставку труб к месту сборки; l — геометрическая длина трубопровода, м; a — коэффициент амортизации в долях единицы, 1/год; t — коэффициент затрат на текущий ремонт, 1/год; m_T — число рабочих смен в году, смен/год; M_{cm} — производительность за эффективное время работы в смену, т в смену; C_T — стоимость 1 м трубы, руб./м; m — стоимость монтажа 1 м трубы, руб./м; N — полезная мощность, развиваемая насосом, кВт; τ — эффективное время работы насоса в смену, ч/смену; C'_3 — стоимость 1 кВт·ч электроэнергии, руб./(кВт·ч); K_0 — общий КПД насоса, передач, электродвигателя.

Потери давления зависят от вида продукта (коэффициент давления A) и пропускной способности трубы (коэффициент K_{wd}):

Максимально допустимое внутреннее рабочее давление для стеклянных труб не должно превышать $(7,5 - 28 d) \cdot 10^3$ Па, если диаметр изменяется от 0,04 до 0,2 м.

Стоимостные показатели $(C_m + C_{cm})$ самого трубопровода можно представить в виде непрерывной функциональной зависимости его диаметра и толщины стенки:

$$C_T + C_M = A_0 d \delta + Sd + E = \frac{A_0}{28} \rho d^2 + Sd + E, \quad (5.75)$$

где A_0 (руб/м³), S (руб/м²), E (руб/м), — коэффициенты для определения стоимости установленного трубопровода, если его диаметр не превышает 0,18...0,2 м.

Преобразование уравнения (5.71) с учетом зависимостей (5.72)...(5.75) дает формулу для расчета суммарной стоимости эксплуатации трубопровода:

$$C = \frac{Kl}{M_1} \left(\frac{A_0}{28} A_1 K_{wd} l_{\Pi} d + Sd + E \right) + 2,78 \cdot 10^{-4} \frac{C_3}{\rho K_0} \cdot A_1 K_{wd} \frac{l_{\Pi}}{d}, \quad (5.76)$$

где σ — прочность материала стенки трубы, Па; $2,78 \cdot 10^{-4}$ — переводной коэффициент, кВт·ч·с²/(т·м²).

Прочность стенки трубы (σ , Па), изготовленной из различных материалов следующая: стекло — 10^6 ; полиэтилен — $3 \cdot 10^6$; нержавеющая сталь — 10^8 .

Для стекла и полиэтилена, при увеличении диаметра от 0,04 до 0,20 м, величины прочности следует уменьшать в 2 раза. Стеклые трубы неприменимы в условиях вибрации: например, при подаче фарша роторными насосами, которые дают пульсацию давления.

Оптимальный диаметр d_0 соответствует экстремальному (минимальному) значению функции (5.76), что математически определяется нулевым значением первой производной суммарной стоимости (5.76) по диаметру.

После преобразования расчетная формула примет вид:

$$d_0 = \sqrt{\frac{2,78 C_3 M_1 A_1 K_{wd} l_{II}}{10^4 K_0 \rho K l \frac{A_0}{20} A_1 K_{wd} l_{II} S}}. \quad (5.77)$$

По величине оптимального диаметра, выбираемого по стандартам с округлением в сторону уменьшения, и соответствующему давлению [формула (5.75)] из условий прочности определяют оптимальную толщину стенки трубы:

$$\delta_0 = \frac{p_0 d_0}{2\sigma}. \quad (5.78)$$

Действительную толщину принимают на 15...20% больше расчетной. Это увеличение обусловлено возможными колебаниями размеров толщины стенки по длине трубы, а также отложением жировой фракции на внутренней поверхности, что уменьшает живое сечение и увеличивает давление. Окончательный размер уточняют по каталогам, где, как правило, приведены наружные диаметры трубы и толщины стенок.

В качестве примера рассмотрим методику расчета трубопроводной установки для транспортирования сосисочного фарша.

Исходные параметры принимают в соответствии с нормами на технологические расчеты и с заданным объемом производства; $K=1,3$; $A=0,13$ для нержавеющей стали и 0,5 для полиэтилена и стекла; $T=0,08$; $m_m=300$; $\tau=7$; $M_{cm}=10$; $M_x=14\,300$ для нержавеющей стали и 5170 для полиэтилена и стекла; $l=l_{II}=10$; $C_3=0,01$; вид пе-

редаваемого фарша — сосисочный; $p = 1000$; для коловратного насоса, работающего в оптимальном режиме работы, $\eta = 0,24$.

Выбор материала трубы обуславливается технико-экономическими расчетами и характером производства. Примерный расчет выполнен для трех материалов: нержавеющая сталь, полиэтилен, стекло.

По приведенным выше данным находят $A_x = 10^4$ при $M_{cm}/T = 1,43$, интерполяцией определяют $K_{wd} = 0,355$, выбирают стоимостные коэффициенты A_0, S, E .

По формуле (5.77) рассчитывают оптимальный диаметр, значения которого для исходных данных примерного расчета представлены в табл. 5.9. Окончательные значения можно выбирать в качестве ближайшей меньшей стандартной величины. Необходимое для транспортирования давление определяют по зависимости (5.75), а толщину стенки трубы — по зависимости (5.78) для оптимального диаметра. Величины давлений наряду с другими расчетными данными показаны в табл. 5.9. Величину толщины стенок округляют с запасом до 20...50 % в сторону увеличения до ближайшего стандартного размера. Следует отметить, что трубопровод из нержавеющей стали в оптимальном режиме практически работать не будет, так как толщина стенок, применяемая в производстве труб, в несколько раз больше расчетной и выбрана не исходя из условий прочности, а по конструктивным соображениям. Полезную, т. е. сообщаемую продукту мощность насоса, рассчитывают по формуле (5.73), а мощность на валу двигателя — по полезной с учетом КПД насоса. Стоимость побудителя движения C_m аналитически рассчитать невозможно, так как подходящие для перекачки фарша конструкции не выпускают серийно. Общую стоимость фаршепровода на 1 т продукции определяют по уравнению (5.76), а всей установки $C_{общ}$ (руб/т), включая насос и электродвигатель, по уравнению:

$$C_{общ} = C + \frac{K_{н.з} C_n C_{эд}}{M_1}, \quad (5.79)$$

где $K_{н.з}$ — коэффициент затрат на непредвиденные расходы, арматуру, доставку и монтаж; $C_{эд}$ — стоимость электродвигателя, руб.

Таблица 5.9

Характеристика оптимальной работы фаршепровода

Материал трубы	Оптимальные		Толщина стенки трубы, $\delta_0 \cdot 10^3$, м	Мощность, кВт		Потери давления $p \cdot 10^{-3}$, Па
	диаметр, d_ϕ , м	скорость, w , м/с		сообщаемая продукту, N	насоса, N_B	
Стекло	0,082	0,075	2,60	0,17	0,7	4,32
Полиэтилен	0,045	0,248	5,90	0,31	1,3	7,80
Нержавеющая сталь	0,064	0,1235	0,18	0,22	0,92	5,55

Графики условной стоимости трубопровода (C , руб./т), рассчитанные по уравнению (5.76) с учетом принятых данных, приведены на рис. 5.9. Наиболее дешевыми оказываются стеклянные трубы. Однако толщина их стенок (так же, как и труб из нержавеющей стали) может быть завышена по конструктивным соображениям.

Тогда трубы будут работать в режиме, несколько отличном от оптимального. Трубы из полиэтилена выпускают различной толщины, ее можно подобрать близкой к расчетной и тем самым реализовать оптимальный режим. График стоимости позволяет отметить интересную особенность: область наименьшей стоимости — довольно пологая кривая, поэтому изменение оптимального диаметра в пределах 10...20 % будет практически неощутимо влиять на стоимость. Необходимость изменения диаметра может возникнуть при подборе стандартного размера трубы.

Наряду с гидравлическим расчетом трубопроводов могут иметь место расчеты потерь давления при истечении продуктов через отверстия и насадки. Общее давление перед входом в насадок p расходуется на преодоление сопротивлений p_m при внезапном сужении (вход), сопротивлений по длине насадка p_h 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 a с соответствующим знаком:

$$p = p_m + p_l + p_a \quad (5.80)$$

Потери давления по длине канала и со струей уходящей жидкости вычисляются по критериальному уравнению или по уравнению

(5.86). Экспериментальная зависимость для расчета общих потерь давления p при истечении фарша имеет вид:

$$p = 790B^{0,4}d^{-0,8}w^{0,56} + 2600ld\eta_{эф}w(1 + 0,08\alpha). \quad (5.81)$$

При $\alpha = 0^\circ$ формула (5.81) превращается в расчетную для цилиндрических насадков, при $l=0$ — для отверстий. При $\alpha < -12,5^\circ$ (расширяющийся насадок) происходит отрыв струи, и насадок работает как отверстие. Это подтверждается экспериментально при скоростях истечения больше 0,02 м/с. Формула (5.81) справедлива при $0,003 < d < 0,014$ м, угле конусности $\pm 12,5^\circ$, $l/d = 0...75$, скорости истечения — 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 получены зависимости:

$$p = a_1 \cdot 10^5 d^{-0,86} \text{ и } p = a_2 \cdot 10^5 w^{0,5}, \quad (5.82)$$

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 при длине насадков 0,045 м, пределы изменения от 0,006 до 0,015 м; w — средняя скорость истечения, м/с ($w = 0,43...2,7$ м/с).

В отличие от насадков малого диаметра для насадков большого диаметра, вследствие отсутствия реодинамического подобия потоков продукта, экспериментально полученные расчетные зависимости имеют другой вид. Например, обработка данных, полученных при экструдировании различных видов начинки, имеющих разные реологические свойства, через группы насадков различного диаметра и длины, позволила получить уравнение для расчета потерь давления в местном сопротивлении на входе в насадок:

$$p_M = ad^{-b}\theta_0^{b_1}\omega^{b_2}, \quad (5.83)$$

где θ_0 — предельное напряжение сдвига, Па; a — эмпирический коэффициент, Па; b, b_1, b_2 — показатели степени (см. табл. 5.10).

Таблица 5.10

Значения коэффициентов для расчета насадков

Продукт	Опытные коэффициенты к уравнениям (5.83) и (5.84)								
	a	b	b_1	b_2	C	q	q_1	q_2	q_3
Начинка творожная	10,36	0,86	0,75	0,2	0,0059	1,4	0,31	3	2,2
Начинка мясная	3,3	0,86	0,97	0,34	0,46	0,8	0,38	3,2	2,6
Тесто песочное	37,6	1,10	0,80	0,47	0,51	0,7	0,56	4,2	3,6

Обработка экспериментальных данных в консистентных переменных «напряжение сдвига» и «градиент скорости» и сравнение полученных кривых течения с результатами вискозиметрии показали, что для расчета потерь давления на сопротивление по длине цилиндрического канала применимы зависимости, полученные на базе капиллярной вискозиметрии.

Давление, необходимое для экструдирования начинки через конические насадки, зависит от общего давления и среднеобъемной скорости начинки во входном сечении насадка $w_{вх}$. Установлено, что для всех случаев течения зависимости эти степенные и имеют следующий вид:

$$p_{\alpha} = C(B_0^*)^q w_{вх}^{q_1} \frac{1}{d_{вх}} q_2 \alpha^{q_3}. \quad (5.84)$$

где C — эмпирический коэффициент, $\text{Па}^{-q} \cdot \text{с}^{q_1 - q} \cdot \text{м}^{-q_1} \cdot \text{град}^{-q_3}$ (см. табл. 5.10); q , q_1 , q_2 , q_3 — показатели степени (см. табл. 5.10); α — половина угла при вершине конуса, град.

В результате для расчета потерь давления в местном сопротивлении на входе в канал и на сужении потока за счет конусности канала получены зависимости, аналогичные уравнениям (5.84) и (5.83), отличающиеся от них лишь опытными коэффициентами, представленными в табл. 5.10. При расчетах в этих уравнениях необходимо использовать геометрические характеристики соответствующих условных каналов, т. е. каналов, имеющих ту же длину и площадь входного и выходного сечений. Кольцевые цилиндрические каналы заменяли условными цилиндрическими, а кольцевые конические — условными коническими. Эффективные диаметры входа $s_{вх\text{эф}}$ и выхода $s_{вых\text{эф}}$ угловых каналов вычисляют по площа-

ди круга, равной площади соответствующего кольца. При этом эффективный угол конусности определяют из выражения;

$$\alpha_{\text{эф}} = \arctg\left(\frac{d_{\text{вх.эф}} - d_{\text{вых.эф}}}{2l}\right).$$

Для определения потерь давления на сопротивление по длине кольцевого канала при течении теста получена зависимость:

$$p = 2,5 B_0^* \dot{\gamma}_1 \left(\frac{3n+1}{4n}\right)^n \left(\frac{8w}{\dot{\gamma}_1 d_{\text{вх.эф}_1}}\right)^{1,5n} \frac{4L}{d_{\text{вх.эф}}}. \quad (5.85)$$

Полученные величины потерь давления на входе, по длине и за счет конусности входят в общее выражение (5.80).

Структура расчетных уравнений и факторы, определяющие величину соответствующих потерь давления для всех исследованных продуктов, идентичны. Полученные зависимости связывают геометрические, кинематические и динамические параметры потока с реологическими свойствами продукта и служат основой для расчета процесса формования экструзией изделий из теста с начинками. Ошибки расчета по приведенным уравнениям составляют 12%, что достаточно для применения в инженерной практике.

2. Вопросы и задания для самоконтроля

1. Какие способы межоперационной транспортировки твердообразных пластично-вязких продуктов используются в промышленности в настоящее время?
2. Что является основой экономического расчета трубопроводного транспорта для пластично-вязких мясных, молочных и рыбных продуктов?
3. Какие параметры и величины учитывает уравнение для расчета оптимального диаметра трубопровода?
4. В чем состоят особенности истечения пластично-вязких биотехнологических сред через насадки по сравнению с истечением структурированной (ньютоновской) жидкости?
5. Уравнение для расчета общих потерь давления при истечении пластично-вязких биотехнологических систем.
6. От чего зависит и как определить давление, необходимое для экструдирования начинки, приготовленной из различных биотехнологических сред (творожной, мясной, рыбной и др.), через конические насадки?
7. Как определить эффективный угол конусности?

Практическое занятие №24 Расчет трубопроводов для твердообразных продуктов

План занятий

1. Теоретическая часть
2. Вопросы и задания для самоконтроля

1. Теоретическая часть

Течение твердообразных пластично-вязких мясных, молочных и рыбных продуктов отличается от течения жидкообразных тел, что кинетическая энергия потока меньше по сравнению с аналогичным потоком жидкообразной системы, т. е. числа Рейнольдса, имеют небольшую величину. Это обусловлено высокой вязкостью и наличием предельного напряжения сдвига. Для описания энергетического баланса потока уравнение Бернулли оказывается неприменимым.

Общее давление $p_{\text{общ}}$, необходимое для обеспечения перемещения твердообразного потока, расходуется на преодоление потерь по длине p , в местных сопротивлениях p_w , инерционных p_m , на сжатие продукта $p_{\text{сж}}$, противодействия p_w , а также на создание кинетической энергии $p_{\text{рк}}$ и давления, необходимого для подъема продукта, находящегося в трубе, на определенную высоту (геометрический напор):

$$p_{\text{общ}} = \pm \rho gh + p + p_m + p_{\text{ин}} + p_{\text{п}} + p_{\text{рк}} + p_{\text{сж}}, \quad (5.56)$$

где ρ — плотность перекачиваемой массы, кг/м³; h — высота нагнетания продукта, м (положительная величина — восходящий поток, отрицательная — нисходящий).

Первый член в уравнении (ρgh) обычно учитывают при перемещении ньютоновских и слабоструктурированных жидкостей. При движении пластично-вязких тел вследствие наличия распорных усилий геометрический напор может работать лишь частично.

Потери давления по длине трубы являются в большинстве случаев основным членом уравнения. Для расчета этой величины при движении различных продуктов предложено множество уравнений.

Потери давления в местных сопротивлениях можно вычислить сравнительно точно для течения ньютоновских и слабоструктури-

рованных жидкостей. Для пластично-вязких систем методы расчета местных сопротивлений практически отсутствуют.

Инерционные потери давления обусловлены неравномерностью движения, т. е. они возникают при неустановившемся режиме движения, что, например, может происходить при подаче продукта поршневыми или кулачковыми насосами. Для ньютоновских жидкостей инерционный напор вычисляют по аналитическим уравнениям.

Пятый член уравнения (5.56) показывает величину противодействия, если продукт вытекает не в атмосферу, а подается в какой-либо технологический аппарат. Например, фарш по трубопроводу поступает в формующую полость котлетного автомата, через которую проходят объемные дозаторы. Давление, необходимое для заполнения форм дозаторов, будет соответствовать величине противодействия.

Шестой член уравнения (5.56) показывает величину давления, необходимую для создания кинетической энергии потока. В простейшем случае — это потери давления со струей выходящего из трубы продукта. Этот член может иметь существенную величину при высокой (несколько метров в секунду) скорости истечения.

Седьмой член уравнения (5.56) учитывает потери давления, возникающие вследствие сжатия продукта. При течении ньютоновских жидкостей, которые практически несжимаемы, эти потери не учитывают. Пластично-вязкие продукты сравнительно легко сжимаемы. Методы расчета течения сжимаемой пластично-вязкой системы разработаны, но на ЭВМ они реализуются по довольно сложным программам. Из всех слагаемых наиболее существенная величина — потери давления по длине потока, которые рассчитывают по аналитическим или эмпирическим расчетным уравнениям.

Вид расчетной формулы определяется дифференциальной и интегральной математической моделью, которая описывает течение и деформационное поведение данного продукта. Для пластично-вязкого потока наиболее приемлемым уравнением при расчете потерь давления по длине следует считать уравнение степенной жидкости.

Течение по трубам жирсодержащих мясopодуKтов, в частности колбасных фаршей, имеет особенность, которая заключается в перераспределении химических компонентов по живому сечению

потока. При испытании установки насос — труба получены количественные данные о внутреннем массопереносе компонентов фарша. В табл. 5.3 приведены результаты химического анализа проб фарша, взятого на различных расстояниях от насоса и в различных местах поперечного сечения потока после того, как установка проработала 1 ч.

Таблица 5.3

Химический состав фарша по длине трубопровода и по его живому сечению

Место отбора пробы фарша	Средняя скорость, м/с	Содержание, %			
		влаги	жира	белка	зола
Бункер	—	67,84	18,2	11,54	2,42
Ядро потока, 8,35 м от насоса	0,493	67,8	17,9	11,9	2,4
Ядро потока, 19,1 м от насоса	0,3	67,52	17,4	12,68	2,4
Пристенный слой, 19,1 м от насоса	0,3	67,49	19,3	10,78	2,43
Промежуточный слой, 19,1 м от насоса	0,3	68,33	17,7	11,51	2,46

Из табл. 5.3 видно, что содержание жира в пристенном слое наибольшее, белка — наименьшее. С увеличением длины трубы «расслаивание» увеличивается. Однако на качество продукта оно существенно не влияет, так как толщина пристенного слоя (около 3 мм) составляет примерно 10% всего живого сечения потока. Длительная эксплуатация трубопровода ведет к осаливанию внутренней поверхности трубы и уменьшению подачи продукта, что требует разборки и мойки трубопровода или специальных способов удаления жировой пленки.

Одним из наиболее приемлемых способов, уменьшающих отрицательное влияние осаливания, является подогрев технологического трубопровода. При этом транспортирование продукта, связанное с его нагреванием, имеет как вспомогательное, так и самостоятельное значение.

В первом случае необходимо получить возможно более постоянную температуру поверхностного слоя транспортируемой среды для создания оптимальных условий ее перемещения, т. е. для обеспечения малых сопротивлений течению среды. Расчеты показывают, что при нагреве поверхности трубы до 40...50°C (выше температуры плавления жира) общее повышение температуры фарша при его течении в трубе составляет не более 1 °C.

Второй случай связан с нагревом всей массы продукта, поэтому скорость его движения должна быть небольшой. Во избежание «заклинивания» трубопровода при нагревании белковых денатурирующих систем температура не должна быть выше температуры коагуляции (35,..40°C).

Тепло к потоку фарша можно подводить различными способами: нагретым паром или горячей водой, подаваемой в рубашку, а также с помощью электроподогрева.

Применение электронагревателей, отвечающих возросшим требованиям трубопроводного транспорта, выявило значительные преимущества перед другими способами нагрева. Несмотря на более высокую стоимость электроэнергии по сравнению с паром и водой, электроподогрев обладает значительными преимуществами, обусловленными простотой и надежностью регулирования температуры, легкостью монтажа. Кроме того, электроподогрев способствует повышению производительности и улучшению условий труда.

Электроподогрев осуществляется в основном двумя различными способами: за счет омического сопротивления стенок фаршепровода при непосредственном пропускании тока через последний — прямой подогрев; с помощью электрических обогревающих устройств, устанавливаемых на трубопроводе, — косвенный подогрев.

При *прямом* подогреве к концам обогреваемого участка трубы через трансформатор подключают переменное напряжение промышленной частоты. Преимуществами такого способа являются надежность в работе, равномерный нагрев стенки трубы, простота регулирования температуры, продолжительный срок службы, широкий диапазон применения. Существенный недостаток — необходимость обеспечения электробезопасности обслуживающего персонала, для чего подаваемое напряжение не должно превышать 36 В. Это обстоятельство требует применения громоздких и дорогостоящих трансформаторов, что усложняет систему подогрева. Если трубопровод обычный металлический, то необходимая сила тока может достигать сотен или тысяч ампер, что практически реализовать чрезвычайно сложно или даже невозможно и связано с вероятностью поражения работающих электрическим током.

К системам *косвенного* подогрева относится подогрев с помощью нагревательных кабелей круглого сечения и плоских нагревательных лент. Для обогрева длинных (десятки и сотни метров) трубо-

проводов, например для пневмогидротранспортирования субпродуктов, комплектов кишечного сырья, особенно жирсодержащих продуктов, можно использовать эластичный токонесущий кабель. Его укладывают вдоль трубы и скрепляют с ней теплопередающим цементом. Вокруг кабеля и трубы с наличием серповидного воздушного зазора эксцентрично укладывают вокруг оси трубы равномерный круговой слой изоляции. Величина мощности на обогрев трубы приведена в табл. 5.4

Таблица 5.4

Зависимость мощности электрообогрева трубопроводов от диаметра трубы, толщины слоя изоляции и разности температур между стенкой трубы и внешней средой

Диаметр трубопровода, м	Толщина слоя изоляции, м	Мощность электрообогрева трубы (Вт/м) при разности температур, К		
		56	111	167
0,025	0,025	20,7	42,7	66,0
	0,050	13,5	27,0	42,6
	0,075	11,5	22,6	36,1
0,050	0,025	27,9	55,8	88,6
	0,050	18,7	36,1	59,1
	0,075	15,4	30,8	49,2
0,075	0,025	36,0	75,4	118,2
	0,050	24,9	49,2	78,8
	0,075	19,7	39,4	62,3
0,100	0,025	42,7	85,3	134,5
	0,050	28,9	59,0	92,0
	0,075	22,6	45,9	72,2
0,150	0,025	59,0	118,0	137,0
	0,050	39,4	79,0	124,6
	0,075	28,9	59,0	92,0
0,200	0,025	68,9	138,0	216,6
	0,050	49,2	98,5	154,4
	0,075	36,1	72,2	115,0

Расчеты выполняют по известным законам электротехники, подбирая соответствующее количество жил кабеля и их омическое сопротивление так, чтобы напряжение электрического тока было бы равно используемому на предприятии. В последнее время наиболее распространенным является подогрев с использованием гиб-

ких ленточных нагревателей. Гибкость лент в сочетании с плоской поверхностью позволяет легко наматывать их на трубопровод и трубопроводную арматуру с одновременным обеспечением хорошей теплоотдачи. Ленточные нагреватели представляют собой тканые полосы шириной 0,015...0,05 м, внутри которых располагают нихромовые нагревательные и медные токонесущие проводники. Расчет параметров ленточных нагревателей ведут, учитывая прямое включение их в сеть переменного тока напряжением 380 и 220 В.

Из разработанных модификаций гибких нагревателей на мясокомбинате или молочном заводе можно применять нагреватели ЭНГЛ-180 (элемент нагревательный гибкий ленточный с рабочей температурой 180 °С). Нагреватели имеют наружную герметичную оболочку из крем-нийорганической резины, что позволяет использовать их при относительной влажности до 100%. Подобные гибкие нагревательные элементы широко применяют за рубежом при обогреве трубопроводов, арматуры, резервуаров и емкостей всех типов.

Скорость движения колбасного фарша по трубе при нагревании его до заданной температуры:

$$w = \frac{l}{\tau} = \frac{1,1al}{d^2} \exp(3,45v_0), \quad (5.57)$$

где l — длина трубы, м; τ — продолжительность пребывания в трубе, с; a — коэффициент температуропроводности, м²/с (см. табл. 5.5); v_0 — безразмерная температура в конце на оси трубы:

$$v_0 = \frac{t_c - t_{ок}}{t_c - t_0},$$

где t_c — температура стенки трубы, К; $t_{ок}$ — температура фарша по оси трубы на выходе из нее, К; t_0 — начальная температура фарша, К.

Таблица 5.5

Теплофизические характеристики некоторых сырых видов мясопродуктов

Продукт	Температура, °С	Коэффициент		Удельная теплоемкость, c , Дж/(кг·К)
		температуропроводности, $a \cdot 10^8$, м ² /с	теплопроводности, λ , Вт/(кг·К)	
Фарш докторской колбасы	30	12,2	0,44	3360
	50	14,2	0,45	2980
	60	13,8	0,45	3080
Говядина	30	12,5	0,49	3800
Говяжий жир	30	7,7	0,24	3400

Формула (5.57) справедлива при $0,2 < v_0 < 0,9$ для диаметров труб от 0,02 до 0,07 м, при отсутствии внутренних конвективных токов.

Все расчеты неизотермического движения фарша в трубе в первую очередь связаны с определением коэффициента теплоотдачи a [Вт/(м² · К)] из критериальных уравнений и тепловых балансов.

Количество тепла Q (Вт), передаваемое от стенки фаршу, рассчитывают методом сумм, т. е. весь поток фарша в трубе делят на ряд коаксиально-цилиндрических слоев:

$$Q = 2\pi c \rho \sum_i r u (t_{i_k} - t_{i_0}) \Delta r, \quad (5.58)$$

где c — теплоемкость фарша, Дж/(кг·К) (см. табл. 5.5); ρ — плотность фарша, кг/м³; r — расстояние слоя от оси трубы, м; u — скорость движения слоя, м/с; t_{i_k} , t_{i_0} — конечная на выходе из трубы и начальная на входе в трубу температура слоя фарша, К; Δr — толщина слоя, м (ее выбирают тем меньше, чем больше градиенты скорости и температуры).

Характеристики слоев принимают постоянными для выделенного слоя и определяют по эюграмм скоростей и температур. Достаточно бывает рассмотреть нагрев пяти — десяти слоев.

Коэффициент теплоотдачи определяют по количеству тепла, найденному по формуле (5.58), из соотношения:

$$Q = \alpha 2\pi R l [t_c - 0,5(t_{c_k} - t_{c_0})], \quad (5.59)$$

где R — внутренний радиус трубы, м; l — длина трубы, м; t_c — температура стенки трубы, К; t_{c_k} , t_{c_0} — температура пристенного слоя фарша в конце и начале трубы, К.

Критериальное уравнение для расчета интегрального коэффициента теплоотдачи имеет вид:

$$\text{Nu} = 1,7 \left(\frac{3n+1}{4n} \right)^{0,33} \cdot \text{Gz}^{0,33} \cdot \left(\frac{B_{0_i}^*}{B_{0_c}^*} \right)^{0,14}, \quad (5.60)$$

где Nu — критерий Нуссельта; n — индекс течения; Gz — критерий Гретца; B_{0_i} , B_{0_c} — соответственно эффективные вязкости при единичном значении безразмерного градиента, вычисленные при температуре фарша в пристенном слое и при температуре стенки, Па · с.

$$\text{Gz} = \frac{c M_c}{\lambda l},$$

где c — теплоемкость фарша, Дж/(кг · К); M_c — массовая подача, кг/с; λ — коэффициент теплопроводности фарша при температуре стенки трубы, Вт/(м · К); l — длина трубы, м.

$$M_c = \frac{\pi d^2 \rho w}{4},$$

где d — внутренний диаметр трубы, м; w — среднеобъемная скорость, м/с.

Критерий Гретца связан с критерием Пекле (Pe), который обычно применяют при расчете процессов теплообмена, соотношением:

$$Gz = \frac{\pi}{4} \cdot Pe \cdot \frac{d}{l}, \quad (5.61)$$

$$Pe = \frac{wd}{a},$$

где a — коэффициент температуропроводности [см. табл. 5.5].

$$a = \frac{\lambda}{c\rho}.$$

После преобразований уравнение (5.60) принимает расчетный вид:

$$a = \frac{1,56\lambda}{d} \left(3n + \frac{1}{4}\pi\right)^{0,33} \left(Pe \frac{d}{l}\right)^{0,33} \left(\frac{B_{0_t}^*}{B_{0_c}^*}\right)^{0,14}, \quad (5.62)$$

и применимо для очень вязких жидкостей при изменении критерия Гретца от 100 до 1500 и индекса течения от 0,15 до 0,5.

Для определения вязкостных характеристик, необходимых для теплового и гидродинамического расчетов фаршепровода при неизотермическом режиме течения, можно использовать графоаналитический метод, заключающийся в следующем. На основании кривых течения строят температурно-инвариантную зависимость в координатах (рис. 5.7):

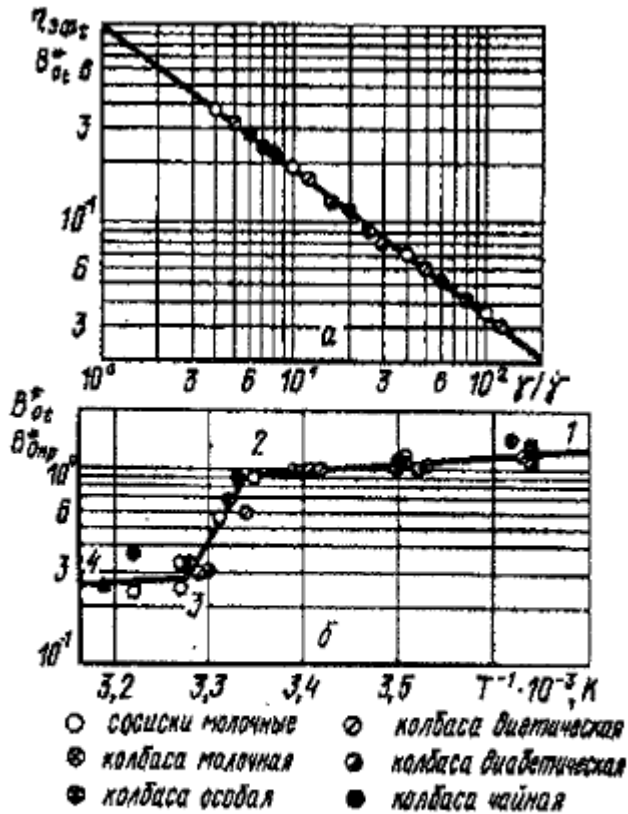


Рис. 5.7. Зависимость эффективной вязкости от градиента скорости (а) и обратной абсолютной температуры (б) для различных видов сырого фарша

- эффективная вязкость при любых значениях градиента скорости и температуры в исследуемых диапазонах; $\eta_{\text{эф}}^*$ — эффективная вязкость при единичном градиенте скорости $\dot{\gamma}_1$ и любой температуре; y — градиент скорости).

Из графика видно, что для всех температур опытные точки для различных видов фарша (сосисок молочных; колбасы молочной, особой, диетической, диабетической и чайной) удовлетворительно расположены вдоль одной линии.

Затем строят зависимость эффективной безразмерной вязкости от температуры в координатах (рис. 5.7, б) (где — приведенная эффективная вязкость при единичном градиенте скорости и температуре $T = 293 \text{ K}$).

$$B_{0\text{пр}}^* = B_{\text{пр}}(0,0023)^{-m_{\text{пр}}}, \quad (5.63)$$

где $B_{\text{пр}}$ — приведенная эффективная вязкость при единичном значении скорости сдвига фарша ($w_1 = 1$ м/с) и температуре $T = 293$ К.

Величины $B_{\text{пр}}$ и $m_{\text{пр}}$ для любого фарша без шпика, в зависимости от влагосодержания U (кг/кг) и жирности φ (кг/кг), находят по следующим зависимостям:

$$B_{\text{пр}} = 30 \exp[-(0,5 + 18 \varphi^2)U], \quad (5.64)$$

$$m_{\text{пр}} = 1,005 - 2,21\varphi + 4,5\varphi^2. \quad (5.65)$$

Для определения эффективной вязкости $\eta_{\text{эф}}$ (Па · с) при любой температуре T (К) в диапазоне измерения градиента скорости $\dot{\gamma}$ (с^{-1}) по рис. 5.7, б для указанной температуры находят соотношение $B_{0i}^*/B_{0\text{пр}}^*$ и при известной величине $B_{0\text{пр}}^*$ определяют B_{0i}^* . Далее на рис. 5.7, а для указанного градиента скорости находят отношение $\eta_{\text{эф},i}/B_{0i}^*$, после чего вычисляют эффективную вязкость $\eta_{\text{эф},i}$.

В результате обработки экспериментальных данных получено обобщенное уравнение для расчета эффективной вязкости:

$$\eta_{\text{эф},i} = AB_{0\text{пр}}^* \exp \frac{E}{RT} \left(\frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_1} \right)^{-m}, \quad (5.66)$$

где A — предэкспоненциальный множитель (обозначение только для этого уравнения); E — энергия активации, кДж/моль; R — универсальная газовая постоянная, кДж/(кмоль · К) ($R = 8,32$); T — абсолютная температура, К.

Вычисленные по экспериментальным данным постоянные величины представлены в табл. 5.6.

Таблица 5.6

Физико-молярные характеристики фарша

Кривая на рис. 5.7, б	Коэффициенты		Изменение температуры, К
	A	E , кДж/моль	
1—2	0,055	7074	275...299,5
3—4	0,022	6428	305...313

В исследуемом диапазоне температур кривая на рис. 5.7 имеет два излома. Каждому участку прямых соответствует своя энергия активации, которая изменяется не непрерывно, а в виде скачков,

что обусловлено плавлением жира, содержащегося в колбасном фарше.

На участке 7—2 вязкость изменяется только за счет ослабления связей в водно-белково-солевых прослойках. Первая точка перегиба (точка 2) при температуре 299,5 К соответствует началу плавления жиров и, по-видимому, является границей количественного изменения структуры. При более высокой температуре структура начинает самопроизвольно разрушаться с одновременным увеличением текучести (участок 2—3). При этом большая часть жира переходит в жидкое состояние. Температуру начала плавления жира 305,5 К, соответствующую второй точке перегиба (точка 3), можно считать качественным рубежом изменения состояния, что характеризуется переходом структуры полностью в коагуляционную. При температуре более 311 К величины вязкостных характеристик стремятся к нулю, что обусловлено началом проявления денатурационных процессов и переходом фарша из пластично-вязкого состояния в упругое, т. е. при измерении на ротационном вискозиметре наблюдается скольжение ротора по фаршу. При движении по трубе будет проскальзывание фарша вдоль стенки.

Эффект начала денатурации необходимо учитывать при рассмотрении ряда технологических процессов. В некоторых случаях, например при транспортировании фарша по трубам с обогреваемой стенкой температура нагрева фарша во избежание «заклинивания» трубопровода не должна превышать температуры денатурации (311 К).

Уравнения для определения комплексных структурно-механических характеристик: предельного напряжения сдвига в θ_0 (Па), пластической $\tau_{1Ш}$ (Па-с) и эффективной $\eta_{эф} - Bw7^m$ (Па-с) вязкости при продолжительности измельчения $t_{кэ}$, соответствующего экстремальному значению реологических характеристик фарша, в зависимости от его влагосодержания, жирности, температуры и действующего на него давления, были получены при обобщении экспериментальных данных ротационной реометрии в области лавинного разрушения структуры. Структурно-механические характеристики мышечной ткани свинины и говядины при одинаковой влажности и степени измельчения имеют практически равные по величине значения. Поэтому в качестве основных характеристик

сырья и фарша выдраны их влагосодержание и жирность. Характер изменения структурно-механических характеристик от температуры в пределах от 0 до 23°C аппроксимирован в виде прямолинейной зависимости. В приводимых экспериментах использовали следующие переменные величины с учетом их возможных производственных колебаний: жирность 0,09...0,35%, влагосодержание 1,1...1,9% или влажность 0,52...0,83, температура 0...23 °C и избыточное давление до 106ГПа. Математическая обработка данных с использованием ЭВМ позволила получить следующие уравнения:

$$Z_3 = a_0[1 - a_t(t - 20)] \exp[a - bU(1 - c \lg Y)]; \quad (5.67)$$

$$m = 1,005 + a_t(t - 20) + a + c \lg Y, \quad (5.68)$$

где Z_3 — экстремальное значение соответствующих реологических характеристик фарша (θ_0 , B , $\eta_{эф}$); a_0 — аппроксимированное значение Z_3 соответствующей физической величины обезжиренного сухого фарша при $\tau_{кэ}$ ($\tau_{кэ}$ — экстремальная продолжительность измельчения); a , b , c — эмпирические коэффициенты, зависящие от содержания жира в фарше; a_t — коэффициент, характеризующий влияние температуры фарша, равной 23 °C; Y — модуль (числовое значение) абсолютного давления. При этом:

$$\begin{aligned} a &= a_1\varphi + a_2\varphi^2; \quad b = b_1 + b_2\varphi + b_3\varphi^2; \quad c = c_1 + c_2\varphi + c_3\varphi^2; \\ Y &= (p - 10^{-5} + 1), \end{aligned} \quad (5.69)$$

где p — гидростатическое давление, Па.

Эмпирические коэффициенты приведены в табл. 5.7.

Таблица 5.7

Значения коэффициентов для расчета реологических характеристик

Коэффициент	θ_0	B	η		m
			при $0 < \varphi < 0,15$	при $0,15 < \varphi < 0,4$	
a_0	1480	30	36,5	18960	0
a_1	$\left(5 - \frac{\varphi}{w}\right) \cdot 10^{-2}$	0,0335	0,0335	0,0335	0,0017
a_2	7,0	0	-14	-50,5	-2,21
a_3	0	0	0	76,5	4,6
b_1	0,3	0,5	1,05	1,75	—
b_2	0	0	-2,44	-9,05	—
b_3	27	18	0	13,7	—
c_1	0,49	0,10	0	0	0,22
c_2	-1	0,8	0	0	-1,4
c_3	0	0	0	0	3

Расчетные данные (для более чем 100 образцов различных фаршей) отличаются от экспериментальных, по которым выведены уравнения, на величину для θ_0 — $\pm 5\%$; η — $\pm 8\%$; B — $\pm 7\%$; m — $\pm 3\%$.

Таким образом, вязкость фарша можно определить графически или по формулам.

Полученные данные изменения вязкости и других структурно-механических характеристик колбасного фарша можно применять при инженерных расчетах машин и аппаратов, а также межоперационного трубопроводного транспорта, особенно при условии неизотермического течения. При течении в трубе с равномерно обогреваемой стенкой происходит видоизменение эюр деформаций I и скоростей II по живому сечению потока (рис. 5.8).

Это вызвано тем, что наличие температурного градиента в пристенном слое приводит к уменьшению его вязкости и, соответственно, повышению текучести кольцевого слоя по сравнению с текучестью в объеме.

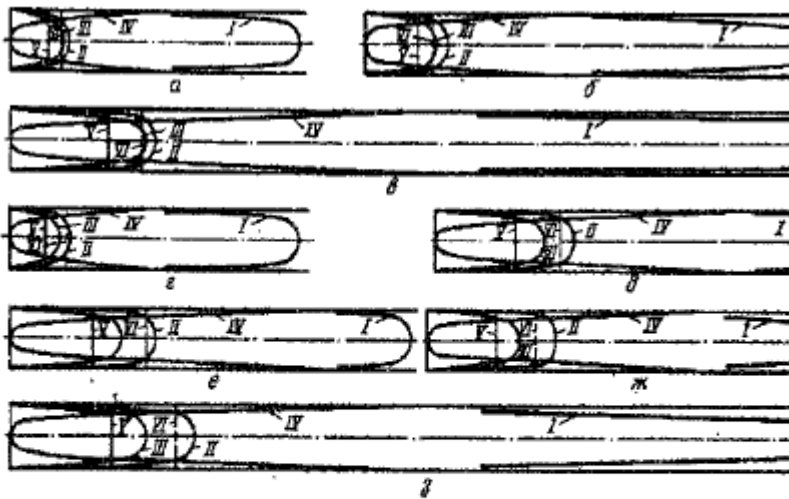


Рис. 5.8. Эпюры деформационного поведения фарша по живому сечению обогреваемой трубы:

I — опытная эпюра деформаций; *II* — опытная эпюра скоростей; *III* — расчеты скорости в трубе без обогрева; *IV* — расчетная эпюра градиентов скорости; *V* — опытная средняя скорость в трубе с обогреваемой стенкой

$$V_c = \frac{\pi R_1^3 n \dot{\gamma}_1}{3n+1} \left(\frac{R_1}{2B_{0r}^*} \cdot \frac{\partial p}{\partial l} \right)^{n-1} \left[\left(\frac{R}{R_1} \right)^{\frac{3n+1}{n}} - 1 + \left(\frac{B_{0r}^*}{B_{0j}^*} \right)^{n-1} \right], \quad (5.70)$$

где B_{0r}^* — эффективная вязкость пристенного слоя, Па·с; $\partial p / \partial l$ — градиент давления по длине трубы, Па/м; B_{0j}^* — эффективная вязкость ядра потока, Па·с.

Наибольшие деформации мясной фарш испытывает в пристенном слое, где резко изменяется скорость. Ядро потока движется в виде квазитвердого стержня.

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

Для изотермического потока толщина пристенного слоя с увеличением индекса течения увеличивается. При индексе течения 0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5 отношение толщины слоя к радиусу трубы (δ/R) будет иметь соответственно следующие значения: 0; 0,15; 0,27; 0,38; 0,48; 0,57. В интервале индексов течения 0,1...0,4 с

ошибкой не более 5 % относительную толщину слоя можно вычислить по зависимости $b/R = 0,05 — 1,06и$.

При неизотермическом режиме движения относительная толщина пристенного слоя (b/R) для фаршей при индексе течения 0,2...0,3 составляет до 15 % от радиуса трубы.

В результате теоретического анализа течения мясного фарша получено уравнение для определения его расхода ($м^3/с$) в круглой трубе с равномерно обогреваемой стенкой:

Таблица 5.8

Экспериментальные и расчетные характеристики потоков фарша в трубе с обогреваемой стенкой

№	Характеристика	Позиция по рис. 5.8							
		А	Б	В	Г	Д	Е	Ж	З
1	Температура стенки трубы, °С	29	29	35	37	37	44	44	44
2	Расстояние от входа в трубу до вершины эпюры деформаций, м	1,170	0,920	1,240	1,205	1,315	1,110	2,360	2,525
3	Средняя скорость в трубе без обогрева, м/с	0,32	0,45	0,85	0,32	0,70	0,70	0,61	0,87
4	Опытная средняя скорость в обогреваемой трубе, м/с	0,43	0,60	1,14	0,49	1,09	1,17	0,95	1,40
5	Опытная скорость по оси трубы, м/с	0,49	0,71	1,24	0,53	1,20	1,23	1,12	1,59
6	Расчетная скорость по оси трубы, м/с	0,44	0,61	1,16	0,44	0,95	0,95	0,83	1,18
7	Расчетный максимальный градиент скорости, $с^{-1}$	48,3	68,0	128,0	48,3	106,0	106,0	92,0	131,0
8	Отношение опытной средней скорости в обогреваемой трубе к средней скорости в трубе без обогрева	1,34	1,33	1,34	1,53	1,56	1,67	1,56	1,61
9	Отношение опытных скоростей по оси трубы к средней	1,14	1,18	1,09	1,08	1,10	1,05	1,18	1,14

Как видно из выражения (5.70), благодаря наличию пристенного слоя с пониженной вязкостью секундная подача увеличивается пропорционально третьему члену в квадратной скобке, но уменьшается относительно теоретической, так как радиус ядра по-

тока меньше радиуса трубы. Эпюры скоростей (рис. 5.8) и данные табл. 5.8 подтверждают такой вывод.

Из табл. 5.8 и рис. 5.8 видно, что обогрев стенки при прочих равных условиях ведет к увеличению средней скорости потока и выравниванию эпюры скоростей. При этом общая температура продукта, как показали эксперименты и расчеты, увеличивается всего на 1...2°C; табл. 5.8 дает возможность сделать количественные выводы. Отношение расчетных величин (без обогрева) скорости по оси к среднеобъемной скорости составляет около 1,36 (строки 6 и 3), то же отношение для обогреваемой трубы (строка 9) лежит в пределах 1,05... 1,18, что указывает на более плоскую эпюру скоростей в обогреваемой трубе. Сравнивая эти результаты со строкой 8, видно, что подача в обогреваемой трубе в зависимости от температуры стенки на 30...60 % выше, чем в трубе без обогрева.

Причем это возрастание практически не зависит от абсолютных значений средних скоростей в трубе и без обогрева, и с обогревом. Графическая зависимость процента увеличения подачи от температуры подобна ломаной линии на рис. 5.7, б, но температуры точек излома сдвинуты на 5...8 °С в сторону увеличения. Приведенные данные показывают влияние внешнего теплоподвода на реодинамику продукта в трубах.

2. Вопросы и задания для самоконтроля

1. Чем отличается течение пластичновязких биотехнологических систем от жидкообразных?
2. Какое общее давление необходимо создать в трубопроводе для перекачки по нему фарша?
3. Чем обусловлено перераспределение компонентов фарша по живому сечению при перемещении его по трубе?
4. Для чего нужен подогрев трубопровода при перекачки жиросодержащего биотехнологического пластично-вязкого сырья?
5. Используемые методы подогрева продукта в процессе его перемещения по трубопроводу.
6. Как рассчитать скорость движения фарша по трубе при нагревании его до заданной температуры?
7. Объясните физический смысл обобщенного уравнения для расчета эффективной вязкости при любой температуре (5.66).

8. Как влияет химический состав фарша и действующее на него давление на его сдвиговые структурно-механические характеристики?
9. Чем отличаются эпюры деформационного поведения фарша по живому сечению при использовании обогреваемого и не обогреваемого трубопровода?

2

Практическое занятие №25 Реодинамические машины и транспортные устройства для вязко-пластичных сред.

План занятий

1. Теоретическая часть
2. Вопросы и задания для самоконтроля

1. Теоретическая часть

Рабочие органы большей части оборудования, предназначенные для обработки мясных, рыбных или молочных продуктов, а также вытеснители, создающие напор в перемещаемой среде, взаимодействуют с текучими продуктами и таким образом могут быть отнесены к группе гидравлических или, точнее, реодинамических машин. Однако в вопросах конструирования и эксплуатации оборудования, рассматриваемых соответствующими учебными дисциплинами (оборудование отрасли, расчет и конструирование), роль гидравлики ограничивается только обеспечением данными по реологическим характеристикам продукта и их изменением в процессе переработки, а системы гидротранспорта продукции и насосные установки не изучаются.

Поэтому в данном разделе рассмотрены гидравлические машины, служащие для создания напора с целью вытеснения и транспортирования мясных, рыбных и молочных продуктов по трубам. К этой

группе гидравлических машин относят насосы и ряд других конструкций, которые используют в качестве шприцев или дозаторов.

Требования к насосам для перекачки пластично-вязких масс

Насос, предназначенный для перекачивания мясных и молочных пластично-вязких продуктов, должен удовлетворять всем санитарно-гигиеническим условиям пищевого производства и учитывать наличие в продукте предельного напряжения сдвига. Исходя из этого, к насосам предъявляют следующие требования.

Насосы изготавливают из инертных к продуктам материалов. Они должны легко разбираться для мойки и стерилизации и иметь гладкие внутренние поверхности.

Вследствие сводообразования перед рабочим органом насоса продукт может зависать, что нарушает оптимальный режим работы и уменьшает подачу. С целью устранения зависания место входа продукта в насос должно иметь достаточный размер или должны быть установлены дополнительные питающие устройства, обеспечивающие принудительное поступление продукта к рабочим органам насоса. Установка таких устройств (шнеки, лопастные колеса и т. д.) не должна приводить к дополнительному перетиранию продукта.

Сопряжение рабочих органов с конструктивными деталями всасывающего патрубка должно быть герметичным и обеспечивать и поддерживать разрежение в зоне всасывания. Путь продукта от зоны всасывания до камеры нагнетания должен быть минимальным при небольшой скорости перемещения продукта и неизменном его объеме. Соблюдение этого требования создает хорошие условия для исключения мятая и разрушения структуры продукта. Обратный перепуск (возврат продукта из камеры нагнетания в камеру всасывания — в зону низкого давления) должен быть минимальным. Возврат продукта происходит через узкие щели, образованные рабочим органом насоса и его корпусом или элементами самого рабочего органа. Перемещение через щели сопряжено с воздействием на продукт больших механических градиентов, что вызывает значительные структурные изменения вплоть до глубоких качественных перерождений продукта. Величина щели может уве-

личиться вследствие износа замыкающих поверхностей рабочего органа и корпуса.

Для уменьшения обратного перепуска насосы совершенствуют по трем направлениям: взаимозаменяемость отдельных элементов, применение износостойких материалов и обеспечение строгого контроля допусков при изготовлении и эксплуатации насоса.

Механическое воздействие на продукт рабочих органов ряда насосов приводит к разрушению его структурной сетки, уменьшению вязкости и предельного напряжения сдвига. После выхода продукта из насоса во время движения его по трубе, когда приложенные напряжения снижаются, структура восстанавливается и реологические характеристики принимают первоначальные значения. Следовательно, по длине трубопровода поток будет неоднородным. При высоких скоростях движения продукта по трубе (0,5... 1,5 м/с) неоднородность проявиться не успевает, а при низких скоростях (менее 0,01 м/с) течение становится неустановившимся. Поэтому для получения равномерного, установившегося движения необходимо, чтобы касательные напряжения на продукт в насосе были меньше аналогичных напряжений в трубопроводе.

При этом следует иметь в виду, что применение повышенных скоростей движения продукта в трубе может привести к нежелательным явлениям. Например, транспортирование измельченного мясного шрота, фарша и других жирсодержащих мясных и молочных пластично-вязких продуктов с повышенными скоростями (выше 0,5 м/с) вызывает обильное выделение внутритканевого жира на стенках трубопровода, вследствие чего живое сечение трубопровода постоянно уменьшается вплоть до образования жировой пробки.

Одним из недостатков насосов объемного типа, используемых для перекачки пластично-вязких мясных и молочных продуктов, является пульсация давления (неравномерность подачи), которая возникает при выдаче дозы продукта, находящегося между двумя пластинами (пластинчатый насос), во впадине между кулачками (кулачковый насос) или зубьями (шестеренный, коловратный, шланговый насосы) и т. д. Пульсации могут иногда стать причиной выхода из строя трубопровода, его разрыва.

Величина и характер пульсаций определяют выбор типа насоса для перекачки конкретного продукта в конкретном технологическом процессе. Помимо упомянутого, в основе выбора насоса лежат его

геометрические, кинематические и динамические факторы, т. е. факторы, определяющие работу насоса в производственных условиях. Наиболее важными характеристиками насоса являются подача, создаваемый напор (давление), полезная мощность и КПД.

В общем виде теоретическую объемную $V_{c,т}$ ($\text{м}^3/\text{с}$) и массовую $M_{c,т}$ ($\text{кг}/\text{с}$) подачу определяют, исходя из геометрических характеристик рабочей камеры насоса и частоты вращения (перемещения) рабочего органа по формулам;

$$V_{c,т} = \frac{V_1 n}{60}; M_{c,т} = \rho V_{c,т}, \quad (5.98)$$

где V_1 — объем продукта, подаваемый за один оборот рабочего органа или за двойной ход поршня, м^3 ; n — частота вращения, об/мин.

Действительная подача насоса V_c ($\text{м}^3/\text{с}$) меньше теоретической на величину утечек через неплотности за счет обратного перепуска и неполного заполнения рабочего объема:

$$V_c = K_v V_{c,т}, \quad (5.99)$$

где K_v — объемный КПД насоса.

Энергетические параметры насоса характеризуются полезной мощностью и КПД. Полезная мощность насоса, т. е. мощность, сообщаемая продукту (Вт),

$$N = p_n V_c = g M_c H = \rho g V_c H, \quad (5.100)$$

где p_n — давление насоса, Па; ρ — плотность продукта, $\text{кг}/\text{м}^3$; g — ускорение свободного падения ($g = 9,8 \text{ м}/\text{с}^2$); H — напор насоса, м.

КПД (K) насоса

$$K = \frac{N}{N_n}, \quad (5.101)$$

где N_n — мощность насоса, Вт.

Снижение полезной мощности происходит за счет энергетических потерь, связанных в основном с преодолением перемещаемой средой гидравлических сопротивлений на входе в насос и выходе из него, а также трением *между* сопряженными деталями и между продуктом *и* рабочими органами насоса. Как уже было сказано,

часть энергии расходуется на утечки перекачиваемой среды и обратный ее перепуск. Все эти потери энергии учитываются соответствующими частными КПД, т. е. гидравлическим K_m , механическим $K_{\text{м}}$ и объемным K_v . Общий КПД насоса

$$K = K_{\text{г}} + K_{\text{м}} + K_{\text{в}} \quad (5.102)$$

Следует отметить, что общий КПД, рассчитанный по формуле (5.102), дает заниженные результаты в том случае, если частные КПД имеют малые значения, что характерно для насосов, перекачивающих пластично-вязкие мясные и молочные продукты. Истинные значения общего и частных КПД в этих случаях определяют при технических испытаниях насосов.

Конструкции насосов для перекачивания пластично-вязких мясных, рыбных и молочных продуктов

Основным видом насосов (вытеснителей) для перемещения пластично-вязких мясных, рыбных и молочных продуктов являются насосы объемного типа. В них давление в продукте на выходе создается за счет сжатия продукта, а перенос продукта из зоны всасывания в зону нагнетания происходит в камерах (объемах), создаваемых соответствующими рабочими органами. Такой процесс переноса продукта исключает возникновение значительных возмущений и создает хорошие условия для обеспечения целостности структуры продукта.

Шестеренный насос. Для перекачки продуктов с небольшими значениями предельного напряжения сдвига применяют шестеренные насосы с наружным зацеплением (рис. 5.12). Насос состоит из корпуса, в котором закреплены две шестерни, одна из которых ведущая, другая — ведомая, всасывающей и нагнетательной камер.

Насос работает следующим образом. При вращении шестерен в зоне всасывания создается разрежение, и перемещаемая среда заполняет впадины между зубьями шестерен. Достигая зоны нагнетания, где зубья одной шестерни входят во впадины другой, среда вытесняется в нагнетательную камеру.

В зависимости от свойств перекачиваемой жидкости проточная часть и шестеренные роторы можно изготовить из чугуна и стали или из бронзы и стали.

Насосы с малым модулем зубчатого зацепления плохо перекачивают густые и пластично-вязкие среды. Для повышения надежности работы насоса, предназначенного для перекачки мясного колбасного фарша, паштетов, творожных масс и других пластично-вязких продуктов, необходимо снизить частоту вращения шестерен и увеличить значение их модуля. Так, шестеренный насос с модулем 0,008 м при частоте вращения 19с^{-1} с успехом применяли для перекачки колбасных фаршей без шпика, при этом общий КПД насоса достигал значения 0,2.

Недостатком этих насосов является то, что при зацеплении зубьев шестерен может произойти запираение не вытесненных из впадины продуктов. Это приводит к сжатию продукта и значительному повышению давления по сравнению с давлением нагнетания (явление компрессии). Компрессия вызывает шум в машине, кавитационную эрозию зубьев, ударную нагрузку на подшипники и приводит к пульсации момента на приводном валу.

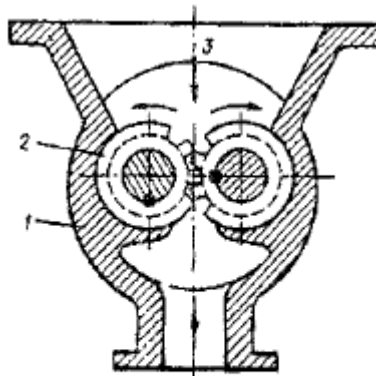


Рис. 5.12. Шестеренный насос:
1 — корпус; 2 — шестерни; 3 — камера всасывания

Таким образом, компрессия сокращает срок безотказной работы шестеренного насоса. Для ослабления влияния компрессии предусматривают разгрузочные канавки на одном из торцов боковых дисков. Канавки соединяют запертый объем жидкости с всасывающей полостью насоса.

Существенным недостатком шестеренных насосов является неравномерность подачи Q , которая зависит от числа зубьев шестерен:

$$\delta = \frac{V_{c_{\max}} - V_{c_{\min}}}{V_{c_{\text{ид}}}},$$

где $V_{c_{\max}}$; $V_{c_{\min}}$ — соответственно максимальная и минимальная подачи; $V_{c_{\text{ид}}}$ — идеальная подача.

Снижение неравномерности подачи требует увеличения числа зубьев, а это, в свою очередь, приводит к увеличению габаритных размеров и массы насоса. Одним из путей снижения неравномерности подачи является применение косозубых и шевронных шестерен.

Недостатком шестеренных насосов следует признать также повышенные значения утечек, связанных с обратным перепуском перемещаемой среды из зоны нагнетания в зону всасывания.

Подача шестеренного насоса ($\text{м}^3/\text{с}$)

$$V_c = 2 F b z n K_v, \quad (5.103)$$

где F — площадь впадины зуба (по торцевой поверхности шестерни), м ; b — ширина шестерни, м ; z — число зубьев шестерни; n — частота вращения, с^{-1} ; K_v — объемный КПД насоса.

Затруднения при использовании этой формулы состоят в сложности измерения площади впадины зуба. Поэтому для расчета подачи шестеренного насоса ($\text{м}^3/\text{с}$), в состав рабочего органа которого входят две шестерни одинакового диаметра, применяют следующую зависимость:

$$V_c = 2\pi D_n m b n K_v K_1,$$

где D_n — диаметр начальной окружности шестерни, м ; m — модуль зубчатого зацепления; K_1 — коэффициент, определяющий разницу между действительным объемом впадин между зубьями и расчетным кольцевым объемом (величина коэффициента может быть принята равной 1,1).

Последнюю формулу можно преобразовать, подставив вместо модуля m его значение $m = D_n/z$:

$$V_c = \frac{2\pi D_n^2 b n K_n K_1}{z}. \quad (5.104)$$

Мощность (Вт) шестеренного насоса

$$N = \frac{V_{ср} p}{K} \text{ или } N = \frac{M_{кр} \omega}{K},$$

где p — давление насоса, Па; K — КПД насоса; $M_{кр}$ — крутящий момент на валу насоса, Н · м; ω — угловая скорость вращения шестерни, рад/с ($\omega = \pi n / 30$).

Коловратный насос. Среди насосов объемного типа, служащих для перекачки пластично-вязких мясных и молочных продуктов, заслуживает внимания коловратный насос (рис. 5.13). Он относится к зубчатым насосам и имеет рабочие органы в виде роторов с зубьями, которые служат для герметичного замыкания рабочей камеры. Роторы коловратных насосов имеют до четырех зубьев, обеспечивающих циклоидальное зацепление. Силовая нагрузка, связанная с передачей крутящего момента, воспринимается синхронизирующими шестернями, освобождая от нее роторы. Такая конструкция создает условия значительного увеличения срока службы насосов. Кроме того, отсутствие силового воздействия на продукт со стороны рабочих органов насоса обеспечивает неизменность консистенции и качественных характеристик продукта.

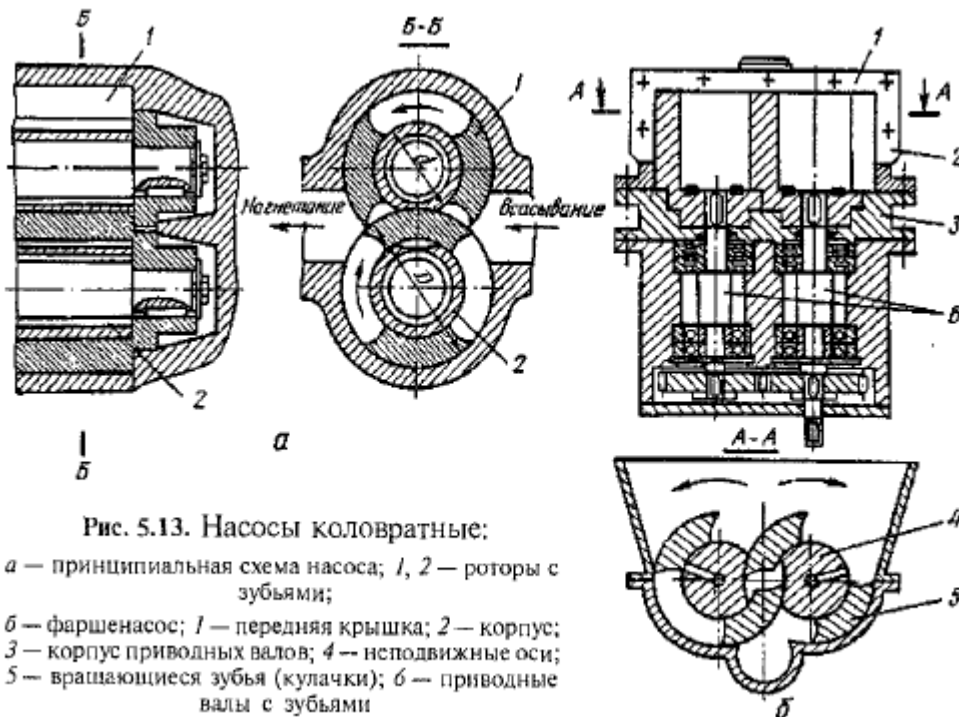


Рис. 5.13. Насосы коловратные:

- а — принципиальная схема насоса; 1, 2 — роторы с зубьями;
 б — фаршенасос; 1 — передняя крышка; 2 — корпус;
 3 — корпус приводных валов; 4 — неподвижные оси;
 5 — вращающиеся зубья (кулачки); 6 — приводные валы с зубьями

Конструктивно насосы выполняют как консольными, так и двух-опорными. Принцип работы насоса состоит в том, что в результате

синхронного вращения ведущего и ведомого валов между зубьями роторов образуются камеры, которые во всасывающей полости заполняются продуктом, а в нагнетательной происходит освобождение камеры от продукта в результате его вытеснения соответствующим зубом ротора.

Коловратный фаршенасос (рис. 5.13, б), разработанный по предложению и эскизам МГУПБ, имеет отличие от рассмотренного. В частности, зубья в насосе этой конструкции не имеют жесткой связи с ротором, а свободно вращаются вокруг него. Зубья представляют собой два полых цилиндра с двумя диаметрными вырезами, равными четверти длины окружности основания цилиндра каждый. Они закреплены попарно на двух валах, установленных в подшипниках качения и приводимых в движение через пару зубчатых колес. Валы вращаются в разные стороны. При переносе порции продукта давление в нем остается неизменным и равным давлению в камере всасывания. Оно повышается только в камере нагнетания. Наличие четырех зубьев дало возможность увеличить загрузочную горловину и исключить зависание продукта в бункере. Значительные поверхности сопряжения вращающихся и неподвижных частей создают достаточно герметичное разделение зон нагнетания и всасывания, исключая обратный перепуск. Путь движения продукта небольшой — около четверти длины окружности цилиндра. Конструкция насоса не приводит к снижению качества продукта при перекачивании, обеспечивает создание высоких давлений, необходимых для перекачивания продукта на большие расстояния. При использовании этих насосов мятие и перетиравание продукта практически отсутствуют. Подача коловратных насосов ($\text{м}^3/\text{с}$) зависит от объема и количества камер, в которых переносится продукт, и частоты вращения роторов

$$V_c = V_1 z n, \quad (5.105)$$

где V_1 — объем единичной камеры, м^3 ; z — количество камер; n — частота вращения, с^{-1} .

Винтовой насос. К насосам объемного типа относятся также винтовые насосы. В отличие от других объемных насосов они обладают рядом преимуществ: создают высокое давление, имеют значительную высоту всасывания, малое перемешивание перемещаемой среды, конструктивно просты, компактны, не имеют клапанов и

сложных проходов, что обуславливает низкие потери энергии в местных сопротивлениях; они легче поршневых в 5... 10 раз. Для перемещения пластично-вязких продуктов применяют одно- и двухвинтовые насосы.

Одновинтовой насос (рис. 5.14, *a*), используемый для перекачки крови, сливочного масла, можно применять для перемещения фаршей, творожных и сырковых масс и других продуктов. Насос состоит из корпуса, снабженного всасывающим и нагнетательным патрубками, резинового статора-обоймы и винтового ротора. Вращение ротору передается от приводного вала с помощью шарниров. Насос работает по принципу замыкания и последующего вытеснения объемов среды из полостей, образованных винтом-ротором и обоймой. Профилированная внутренняя поверхность обоймы выполнена в виде двухзаходного винта с шагом, в два раза превышающим шаг однозаходного винта-ротора.

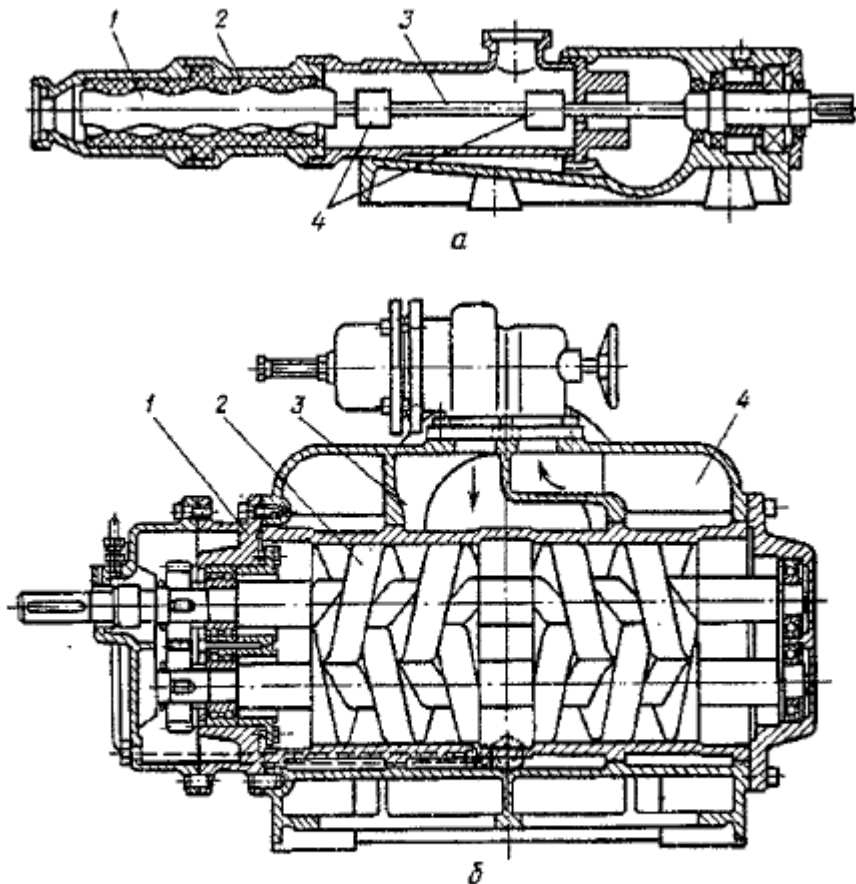


Рис. 5.14. Винтовые насосы:

a — одновинтовой: 1 — винт; 2 — обойма; 3 — вал; 4 — шарнирное соединение;
б — двухвинтовой: 1 — корпус; 2 — винты; 3 — камера всасывания; 4 — камера нагнетания

При наличии эксцентриситета между неподвижной обоймой и винтом-ротором, когда первая на стороне всасывания полость увеличивается в объеме, давление в ней понижается до величины, меньшей давления в приемной части насоса. За счет разности давлений полость заполняется перемещаемой средой. Дальнейшее вращение винта обес печивает замыкание полости, и среда перемещается к нагнетательной части обоймы в результате вытеснения ее винтом (за один оборот винта перемещение равно одному шагу обоймы). При постоянной частоте вращения винта подача насоса строго постоянна. Поступательное движение продукции вдоль оси насоса создается непрерывным вращением винта и трением, возникающим между внутренней стенкой корпуса и продуктом. При перемещении крупнокусковых продуктов они расклиниваются между винтом и стенками корпуса. Продукт движется, как гайка, по винтовой направляющей. Скорость движения мелкокусковых и пластично-вязких продуктов меньше, а при больших зазорах между статором и ротором возможен значительный обратный перепуск. Для повышения скорости поступательного движения продукта вдоль оси винта внутреннюю поверхность корпуса делают ребристой и устанавливают направляющую звездочку или барабан, который препятствует также проворачиванию продукта вместе с напорным шнеком.

В двухвинтовых насосах (рис. 5.14, б) давление нагнетания создается двумя находящимися в зацеплении винтами. Продукт перемещается вдоль нарезки винта за счет вытеснения его из впадины выступом соседнего винта. Продукт как бы течет между двумя выступами и проходит путь, равный длине винтовой линии. При таком воздействии рабочего органа на продукт происходит его интенсивное мятие и перетираание, и возможен обратный перепуск через зазор винт — статор (корпус). Из-за распорных усилий, возникающих между двумя винтами, поверхность винтовой нарезки сильно изнашивается, в связи с этим серьезному износу подвергаются также опорные подшипники.

Подача винтового насоса

$$V_c = \frac{Fhn \cdot 60 K_v}{360} = \frac{248,4 D_H^3 n K_v}{3600}, \quad (5.106)$$

где F — живое сечение впадин между гребнями винтов, m^2 ; h — шаг винта, m ; n — частота вращения винта, $мин^{-1}$; K_v — объемный КПД; D_H — диаметр окружности выступов ведомого винта и диаметр окружности впадин ведущего винта, m .

$$F = 1,243 D_H^2;$$

$$h = \pi D_H \operatorname{tg} \alpha,$$

где α — угол подъема винтовой линии (обычно $\alpha = 26...46^\circ$).

Пластинчатый насос. Для перекачки пластично-вязких мясных и молочных продуктов на предприятиях широко применяют пластинчатый (эксцентриково-лопастной) насос (рис. 5.15).

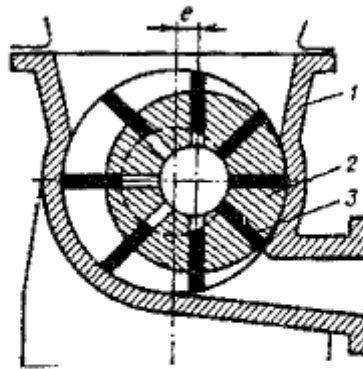


Рис. 5.15. Пластинчатый насос:

1 — корпус с кольцевой камерой (статором); 2 — ротор; 3 — пластины

Насос состоит из вращающегося ротора, помещенного в неподвижную камеру-статор, и пластин, устанавливаемых в радиальных пазах ротора. Пластины при вращении ротора способны радиально перемещаться. Относительно оси статора ось ротора имеет эксцентриситет, за счет которого пространство между двумя соседними пластинами и статором уменьшается в направлении камеры нагнетания и увеличивается в зоне всасывания.

Работа насоса состоит в следующем. В зоне всасывания продукт под действием разрежения и гидростатического давления поступает в пространство между пластинами.

При дальнейшем вращении ротора объем продукта уменьшается, что приводит к увеличению в нем давления, и после сообще-

ния этого сжатого объема с нагнетательной камерой происходит вытеснение продукта из межпластинного пространства.

За один оборот ротора из области всасывания в область нагнетания переносится z объемов жидкости, находящихся между пластинами (z — число пластин). За вычетом толщины пластины c максимальный объем между пластинами

Общий рабочий объем насоса (м^3)

$$V_{\text{н}} = 2eb(2\pi rR - cz). \quad (5.108)$$

Уточненное выражение рабочего объема с учетом точного закона перемещения пластин при вращении ротора

$$V_{\text{н}} = 2eb(K \cdot 2\pi R_{\text{ср}} - cz), \quad (5.109)$$

где K — коэффициент уточнения, зависящий от количества пластин (табл. 5.14).

Таблица 5.14

Значение коэффициента уточнения для расчетов
рабочего объема пластинчатого насоса

Количество пластин, z	Коэффициент, K
3	0,827
5	0,936
7	0,968
9	0,980
11	0,986

Подача насоса ($\text{м}^3/\text{с}$)

$$V_{\text{с}} = V_{\text{н}} n K_{\text{в}} \quad (5.110)$$

Плотное соприкосновение концов пластин с корпусом-статором приводит к их износу и образованию зазора, что снижает объемный КПД насоса в процессе его эксплуатации и является существенным недостатком насосов этого типа. Износ пластин создает предпосылки для обратного перепуска продукта, который возрастает с уменьшением толщины лопатки и увеличением зазора между лопаткой и статором.

При повышенных значениях давления перепуск может быть столь большим, что насос работает «на себя». Таким образом, продукт интенсивно перетирается, что в ряде случаев вызывает ухуд-

шение его качества, а в потоке продукта, перемещающегося по трубе, возможны пустоты и образования пульсирующей подачи.

Диафрагменный насос. Диафрагменные насосы (рис. 5.16) используют для перекачки пластично-вязких продуктов и технологических агрессивных сред (творожный сгусток, бульоны и т.д.). Принцип работы диафрагменного насоса подобен поршневому с той разницей, что поршень от перекачиваемого продукта отделен диафрагмой, изготовленной из пищевой резины. В результате колебания диафрагмы, приводимой в движение через поршень от кривошипно-шатунного механизма, в рабочей камере создаются вначале вакуум, а затем повышенное давление. При соответствующем ходе поршня происходят всасывание и нагнетание. В некоторых конструкциях насосов поршень не связан жестко с диафрагмой. Между ними имеется буферная жидкость (например машинное масло), через которую приводится в колебательные движения сама диафрагма. Преимуществом таких насосов является отсутствие уплотнений и прямого контакта рабочего органа с продуктом. Рабочие органы насоса не нарушают целостности продукта и первоначальная консистенция сохраняется. Существенный недостаток диафрагменных насосов — это износ эластичной диафрагмы вследствие ее растягивания. Общее уравнение для расчета диафрагменного насоса ($\text{м}^3/\text{с}$)

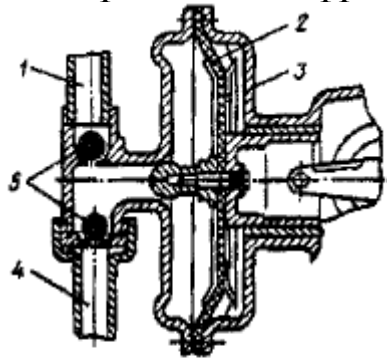


Рис. 5.16. Диафрагменный насос:

1 — напорный трубопровод; 2 — мембрана (диафрагма); 3 — корпус; 4 — всасывающий трубопровод; 5 — обратные клапаны

$$V_c = VnK_v, \quad (5.111)$$

где V — объем камеры, м^3 ; n — число двойных ходов диафрагмы, с^{-1} .

Шланговый насос. Шланговые насосы применяют для перекачивания относительно маловязких продуктов. В практике ис-

пользуют одно- и многошланговые насосы. Многошланговые насосы позволяют осуществить одновременную подачу продукта в несколько каналов в равном количестве. Шланговые насосы отличаются простотой устройства — отсутствием клапанов и сальниковых уплотнений.

Рабочим органом шланговых насосов (рис. 5.17) является установленный на специальном профилированном корпусе шланг из эластичного материала (например резины). Шланг периодически сжимается обкатывающими роликами. Продукт, которым заполнен шланг, выжимается этим роликом из шланга в процессе обкатывания. Для надежной и непрерывной подачи продукта по шлангу и предупреждения возврата вытесняемого продукта установлено три ролика, закрепленных в держателе. Когда, первый ролик сходит со шланга, второй сжимает шланг и отсекает определенную порцию продукта в шланге. За один оборот вала держателя вытесняется три дозы жидкости. Концы шланга закрепляют в корпусе или в специальных зажимах, к которым присоединяют трубопроводы. Во избежание быстрого износа шланг и профильную поверхность корпуса смазывают силиконовым составом или непрерывно смачивают водой.

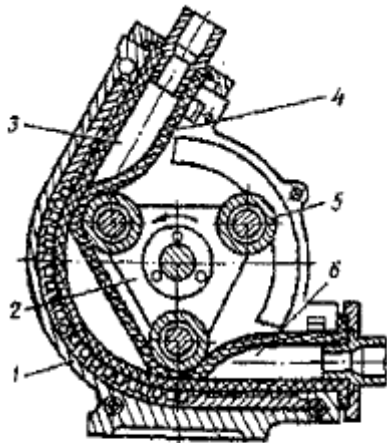


Рис. 5.17. Шланговый насос:

1 — профилированный корпус; 2 — держатель; 3 — зона всасывания; 4 — шланг; 5 — ролик; 6 — зона нагнетания

Шланговый насос обеспечивает импульсную объемную подачу, которая зависит от частоты вращения вала с держателями роликов и диаметра шланга. Частота вращения вала, как правило, не превышает 4с^{-1} . Давление насоса (не более $2,5 \cdot 10^5$ Па) ограничивается

Принцип действия насоса следующий. При перемещении поршня из крайнего левого положения (см. рис. 5.18) вправо полый цилиндр поворачивается от секторного зубчатого колеса так, что окна бункера и цилиндра совмещаются и продукт, благодаря разрежению в рабочей камере и под напором, создаваемым шнеком-питателем, заполняет предпоршневую полость цилиндра. Одновременно закрывается задвижка на напорном трубопроводе. Процесс всасывания заканчивается при перемещении поршня в крайнее правое положение. В этом положении приводное секторное зубчатое колесо снова входит в зацепление с шестерней, цилиндр поворачивается на 180° и перекрывает окно всасывания, а задвижка на напорном трубопроводе открывается. При дальнейшем движении поршня влево зубчатое колесо привода выходит из зацепления с конической шестерней, цилиндр стопорится, оставляя закрытым всасывающее окно, и продукт поступает в напорный трубопровод. Подачу поршневого насоса рассчитывают по общепринятой методике:

$$V_c = FsnK_p, \quad (5.113)$$

где F — площадь поршня, m^2 ; s — ход поршня, m ; n — частота вращения кривошипа, c^{-1} ; K_p — объемный КПД насоса.

Характеристика объемных насосов

Характеристикой насоса называется комплекс графических зависимостей, определяющих изменение основных параметров работы насосов от его подачи. Наиболее важны следующие параметры: создаваемый насосом напор (или давление), развиваемая мощность и КПД.

Назначение характеристики насоса состоит в определении оптимальных режимов его работы. Характеристика насоса обычно прилагается к его технической документации. Однако в процессе эксплуатации значения первоначальных оптимальных параметров существенно изменяются, что необходимо учитывать при работе насоса, внося соответствующие коррективы путем проведения его испытаний.

Ниже приведены методика и результаты испытаний некоторых насосов, работающих на предприятиях мясной и молочной промышленности.

Пластинчатый насос. На основе формул (5.109) и (5.113) теоретическая массовая подача насоса пластинчатого типа

$$M_{с.т} = 2bern \frac{2\pi \frac{D}{2} - e - zc}{60}, \quad (5.114)$$

где b — ширина ротора (пластины), м ($b = 0,124$ м); e — эксцентриситет, м ($e = 0,019$ м); n — частота вращения ротора, мин^{-1} ($n = 36 \text{ мин}^{-1}$); D — внутренний диаметр статора, м ($D = 0,258$ м); z — число пластин ($z = 8$); c — толщина пластин, м ($c = 0,007$ м).

Геометрические характеристики рабочей камеры и частоты вращения рабочего органа вытеснителя приведены для исследуемого насоса, который эксплуатировался длительный период времени и имел радиальный зазор между пластинами и статором в среднем 0,6 мм, а боковые зазоры 0,4...0,5 мм. Для данного насоса расчетная массовая подача $M_{сл} = 1,79$ кг/с.

По действительной подаче, определяемой расходомером или объемно-массовым методом, вычисляли среднюю скорость течения фарша по трубе. Зависимость изменения давления по длине трубы аппроксимировали прямой, что позволило получить средние их значения на выходе из камеры нагнетания. Результаты исследования (рис. 5.19) свидетельствуют о том, что с увеличением давления до некоторого предельного значения, зависящего от величины зазора между пластиной и корпусом, подача стремится к нулю. У исследованного насоса $p_{пред} = 5,96 \cdot 10^5$ Па, затрачиваемая мощность равна 1,825 кВт. После смены лопаток (величина зазоров около 0,2 мм) $p_{пред}$ увеличилось до $12 \cdot 10^5$ Па. При давлении, близком к нулю, подача достигает максимального значения 1,2 кг./с при минимальной полезной мощности (0,34 кВт). В этом случае просачивание фарша через зазоры практически отсутствует и энергия расходуется на преодоление внутреннего сопротивления и создание кинетической энергии течения.

Разность между теоретической подачей $M_{с.т} = 1,79$ кг/с и подачей при $p = 0$ дает представление о степени заполнения межлопаточного пространства (у исследуемого насоса она равна 0,68) и характеризует «перепуск» фарша из зоны нагнетания в зону всасывания (рис. 5.19, в, кривая AM).

Анализ зависимостей по рис. 5.19, а, б показывает, что оптимальное давление для данного насоса равно $(2,5...3,0) \cdot 10^5$ Па. При давлениях выше оптимального понижается КПД, насос работает «на себя», что приводит к интенсивному перетиранию фарша и быстрому износу рабочих органов. Оптимальному давлению соответствует оптимальная подача (около 0,95 кг/с).

Все характеристики зависят от степени износа рабочих органов насоса и меняются в процессе работы. Известно, что «перепуск» фарша прямо пропорционален зазору между ротором и корпусом-статором в третьей степени и обратно пропорционален величине площади их соприкосновения в первой степени. Пластины вытеснителя сопрягаются с корпусом по небольшим поверхностям при существенной величине

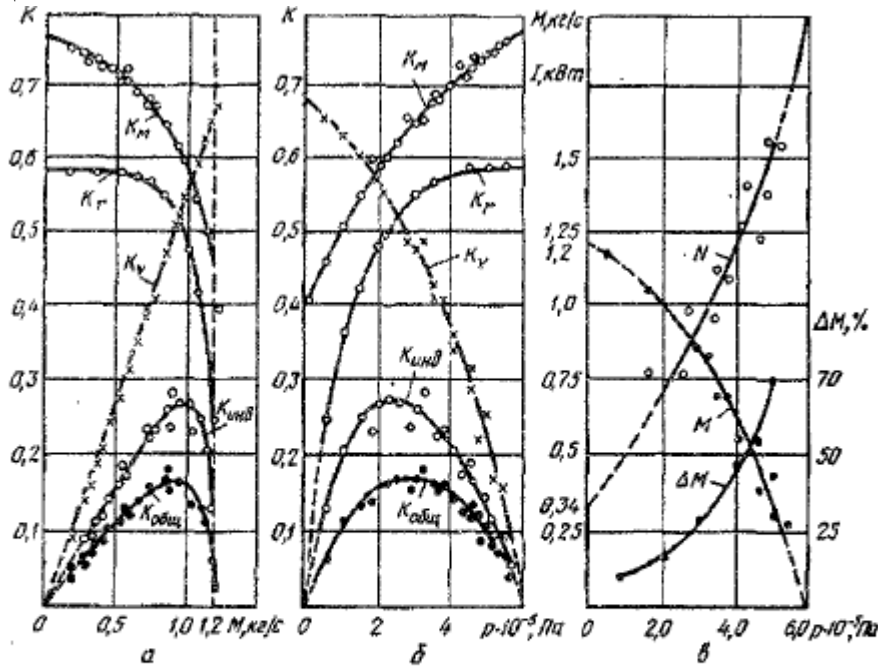


Рис. 5.19. Зависимость КПД пластинчатого насоса от подачи (а) и давления нагнетания (б), изменение массового расхода, мощности и величины обратного перепуска от давления нагнетания (в)

зазора, что и обуславливает неудовлетворительную работу насоса в области высоких давлений.

При обратном перепуске фарша через зазоры происходит его перетирание, что вызывает изменение реологических свойств (рис. 5.20). С увеличением давления значения θ_0 , гр B возрастают, а m — уменьшается, что может быть обусловлено механической деструкцией тканей мяса. Следовательно, перетирание фарша обнаружива-

ется не только по изменению подачи насоса, но и по изменению реологических характеристик. Проведенные испытания насоса пластинчатого типа свидетельствуют о весьма низких значениях его КПД. Оптимальные параметры работы насоса: подача 0,7... 1 кг/с; давление (3...5) $\cdot 10^5$ Па; частота вращения ротора 36 мин⁻¹; КПД — 0,15...0,17.

Двухвинтовой насос. Основные показатели работы исследованного насоса, для которого $M_{CT} = 3,9 \cdot 10^{-3}$ при различной частоте вращения винтов приведены в табл. 5.15; результаты испытаний насоса — на рис. 5.20 и 5.21.

Понятие «свободное истечение» (см. табл. 5.15) для этого насоса условно, поскольку торцевая крышка с патрубком создает существенное сопротивление: расчет давления по мощности свободного истечения для всех частот вращения ротора дает величину около $20 \cdot 10^5$ Па. Эта величина давления эффективная, учитывает механическое трение, пластично-вязкое сопротивление фарша, обратный перепуск и др. При этом объемный КПД остается практически неизменным. Низкое значение КПД (рис. 5.21, а) объясняется наличием зазоров до 1 мм между винтами и статором, а также между винтовыми поверхностями.

Большие зазоры обусловлены как сложностью изготовления рабочих поверхностей, так и быстрым их износом. С увеличением частоты вращения винтов (рис. 5.21, б, в) при малых давлениях подача растет быстрее, чем мощность. Когда давление приближается к предельному значению, темп нарастания мощности опережает увеличение подачи, что влияет на КПД вытеснителя (рис. 5.21, а), который резко уменьшается, приближаясь к нулю.

У винтового насоса по сравнению с другими типами насосов более длинный путь прохождения фарша от зоны захвата продукта до камеры нагнетания. С учетом принципа суперпозиции этот путь равен длине винтовой линии, что обуславливает большой «перепуск» продукта из камеры нагнетания в зону всасывания. Эти факторы являются причиной резкого изменения структурно-механических характеристик фарша в процессе перемещения (см. рис. 5.20, б).

Из графика (см. рис. 5.20, б) видно, что структурно-механические характеристики с увеличением давления резко возрастают. Это связано с интенсивным мятием фарша винтами и с

обратным перепуском фарша в зону всасывания. Мятие фарша винтами в наибольшей степени проявляет себя при малых давлениях вытеснителя, когда перепуск фарша незначителен.

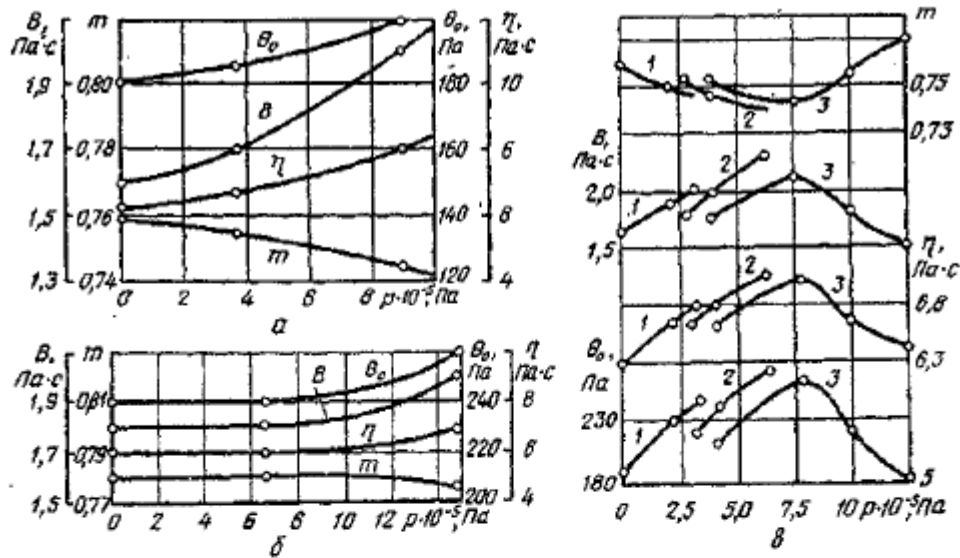


Рис. 5.20. Зависимость изменения структурно-механических характеристик фарша от давления нагнетания, развиваемого насосом:
а — пластинчатым; *б* — двухвинтовым; *в* — колочватным; 1 — однократное прохождение через насос; 2 — двукратное; 3 — многократное

Таблица 5.15

Показатели работы двухвинтового насоса

Показатель	Частота вращения, мин ⁻¹			
	390	600	950	1110
Теоретическая массовая подача, кг/с	1,52	2,34	3,7	4,35
Действительная массовая подача при свободном истечении, кг/с	0,72	1,1	1,72	2,02
Максимальное значение объемного КПД	0,475	0,47	0,465	0,465
Мощность, кВт:				
холостого хода	0,31	0,58	1,2	1,6
при свободном истечении	1,4	2,2	3,45	4,05

Значения структурно-механических характеристик увеличиваются при дальнейшем увеличении давления. Большое влияние на изменение структурно-механических характеристик фарша оказывает обратный перепуск. Таким образом, повышение давления в нагнетательной линии в первую очередь уменьшает подачу насоса за счет обратного перепуска, что сопровождается мятием и перетира-

нием фарша как в зоне питательных шнеков, так и в зоне нагнетательных винтов.

Эти процессы ведут к расщеплению мышечных волокон, выделению внутриклеточной жидкости и одновременному сжатию частиц фарша. Такие первоначальные изменения (см. рис. 5.20, в, кривые 1, 2 и восходящая часть кривой 3) вызывают увеличение значений структурно-механических характеристик и уменьшение темпа разрушения структуры. Сравнивая приведенные кривые, можно заключить, что на величины θ_0 , ζ , B влияет степень разрушения структуры, т. е. механическое воздействие, которому подвергается фарш в насосе. Более продолжительное и интенсивное механическое, а, следовательно, и тепловое воздействие на фарш вызывают глубокие изменения структуры. Предельным является давление $8 \cdot 10^5$ Па. Изменение структуры под воздействием рабочих органов насоса подтверждается и гистологическими исследованиями.

Реологические и гистологические исследования, дополняющие друг друга, показывают, что насос обладает определенным гомогенизирующим эффектом, который можно усилить или уменьшить. Результаты исследований позволили установить, что насосы с двухвинтовым вытеснителем с успехом можно применять для транспортирования фарша бесшпиковых и ливерных колбас, продуктов детского питания, паштетов, творожных и сырковых масс и др., т. е. там, где используют повышенную их гомогенизацию. Эти насосы могут являться и частью технологического оборудования, предназначенного для перетирания продуктов.

Коловратный насос. Универсальные характеристики колдовратного насоса (см. рис. 5.13, б, с. 266) приведены на рис. 5.22. Результаты испытаний насоса показывают, что при свободном истечении обратный перепуск фарша практически отсутствует, полезная энергия расходуется на создание скорости истечения, преодоление внутренних сопротивлений структуры фарша и внешнего трения между фаршем и корпусом. Величины реологических свойств начинают изменяться при давлении около $10 \cdot 10^5$ Па и выше (см. рис. 5.20, в), т. е. в области за оптимальным режимом, где КПД уменьшается.

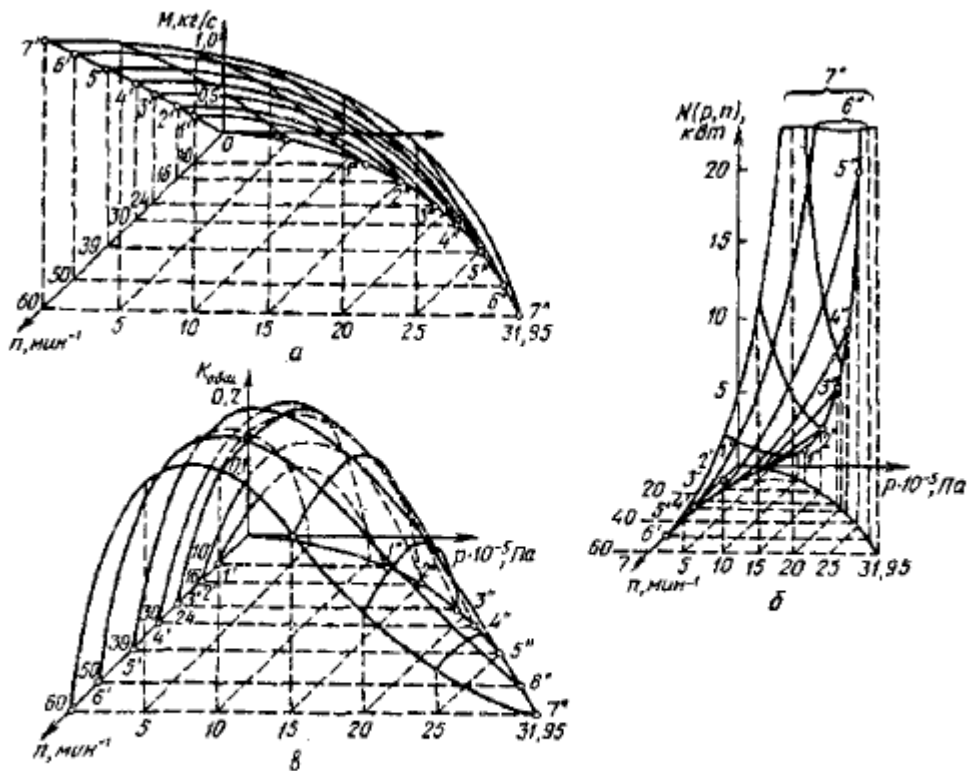


Рис. 5.22. Зависимость массовой подачи (а), мощности насоса (б) и общего КПД (в) от частоты вращения ротора и давления на выходе коловратного насоса

Таблица 5.16

Оптимальные характеристики фаршевых насосов

Насос	Максимальное давление (приблизненное значение), $p \cdot 10^{-5}$, Па	Оптимальные параметры		Подача насосов, кг/с	Частота вращения, мин^{-1}
		КПД, доли единицы	Давление, $p \cdot 10^{-5}$, Па		
Пластинчатый	15	0,15...0,17	3...5	1,0...0,7	40
Двухвинтовой	20	0,12...0,14	5...8	1,6...1,3	800
Коловратный	30	0,26...0,32	7...13	2,5...3,5	60
Шестеренный	20	0,14...0,16	7...9	1,9...1,6	20

Проведенные испытания позволили определить оптимальные характеристики фаршевых насосов (табл. 5.16), которые при расчете и проектировании можно принять за основные.

У насосов различных типоразмеров показатели работы могут отличаться от приведенных до $\pm 50\%$, в зависимости от степени износа и точности изготовления сопрягаемых деталей.

2. Вопросы и задания для самоконтроля

1. Каким требованиям должен удовлетворять насос для перемещения текучих мясных и молочных продуктов?
2. Укажите пути и методы совершенствования конструкции объемных насосов, предназначенных для транспортирования пластично-вязких мясных и молочных продуктов.
3. Что называется напором, подачей и полезной мощностью насоса?
4. За счет каких причин происходят потери энергии в насосе? Каким образом эти потери учитывают? Какие меры необходимо предпринять для уменьшения потерь энергии?
5. Дайте определение объемного насоса.
6. Опишите принцип действия, устройство, основные недостатки и достоинства насосов: шестеренного, колдовратного, винтового, пластинчатого, диафрагменного, шлангового, поршневого.
7. Определите основные принципы подбора насоса для работы на заданный трубопровод.
8. Что такое характеристика насоса и для каких целей она необходима?
9. На основе испытаний дайте анализ работы пластинчатого, двухвинтового и колдовратного насоса.
10. Укажите оптимальные характеристики работы фаршенасосов.

Практическое занятие №26 Приборы и устройства для контроля и регулирования параметров движения среды. Манометры и приборы для измерения давления жидкостей и вязко-пластичных продуктов. Манометры для измерения давления жидкообразных продуктов. Манометры, приборы и датчики для измерения давления вязко-пластичных продуктов

План занятий

1. Теоретическая часть
2. Вопросы и задания для самоконтроля

1. Теоретическая часть

Одним из важных направлений технического прогресса в мясной промышленности является применение поточно-механизированных и автоматизированных линий, создание которых невозможно без использования средств межоперационного транспорта и транспортных систем, с контрольными приборами для измерения параметров движения среды, а для фаршепроводов также и для контроля за физико-механическими свойствами перемещаемого фарша. Контрольно-измерительной аппаратурой, используемой в трубопроводах при транспортировании технологических сред на мясокомбинатах, являются приборы для замера давления и перепада давления, расходомеры и вискозиметры или устройства для непрерывного определения структурно-механических свойств мясопродуктов

Манометры и приборы для измерения давления жидкостей и вязко-пластичных продуктов

Жидкость в гидравлике рассматривается как непрерывная среда, заполняющая пространство без пустот. Силы, действующие на рассматриваемые объекты жидкости, являются внешними и разделяются на объемные и поверхностные. К поверхностным силам относятся сила давления, направленная по нормали внутрь объема, и сила трения, направленная по касательной и являющаяся тангенциальной составляющей общей поверхностной силы. Единичная поверхностная сила является напряжением (нормальным и касательным). Нормальное напряжение (напряжение силы давления) — гидромеханическое (в случае покоя — гидростатическое) давление.

В зависимости от назначения и пределов измеряемого давления приборы разделяются на барометры для измерения атмосферного давления, тягометры и напорометры для измерения небольших разрежений или избыточных давлений до $0,25 \cdot 10^5$ Па, приборы для измерения разности абсолютного и атмосферного давлений, манометры для измерения избыточного давления, вакуумметры — для измерения разрежения до 10^5 Па и мановакуумметры — для измерения как избыточного давления $(0,5...50) \cdot 10^5$ Па, так и вакуума до 10^5 Па.

По принципу действия приборы делятся на:

1. жидкостные, измеряющие давление при помощи уравновешивающего столба жидкости, заливаемой в прибор;
2. пружинные, измеряющие давление при помощи упругого элемента (трубчатой пружины, мембраны, сильфона и др.), у которого под действием давления возникают обратимые деформации, величина которых служит мерой давления;
3. поршневые, измеряющие давление при помощи нагруженного поршня, перемещаемого в цилиндре, заполненном маслом;
4. электрические, в которых напряжение, действующее на упругую стальную мембрану, регистрируется с помощью тензометра, пьезоэлемента, потенциометра и т. д.

Манометры для измерения давления жидкообразных продуктов

К жидкостным мясopодуктам можно отнести мясокостный, клеевой, желатиновый бульоны, топленые животные жиры при температуре выше $40...50$ °С, кровь убойных животных, различные растворы и др.

На предприятиях мясной промышленности применяют различные манометры. Для правильного выбора типа манометра в производственных условиях необходимо знать принцип их действия, техническую характеристику, правила установки и эксплуатации.

Жидкостные манометры. Жидкостный манометр состоит из U-образной стеклянной трубки, снабженной миллиметровой шкалой. Один конец манометра соединяется при помощи трубки с местом измерения давления, другой конец остается открытым.

Если давление в воздухопроводе равно атмосферному, то жидкость в обоих коленах установится на одном уровне; если давление больше атмосферного, то уровень жидкости в колене, соединенном с воздухопроводом, упадет, а уровень жидкости в колене со сво-

бодным концом поднимется; если давление меньше атмосферного, то уровень жидкости в колене со свободным концом опустится вниз, а уровень жидкости в колене с воздухопроводом поднимается вверх.

Между трубками манометра находится шкала давлений.

За разность уровней жидкости в двух трубках считают сумму: в одной трубке вниз от нуля, в другой — вверх.

Погрешность отсчета показаний при измерении U-образным манометром составляет до +1 мм высоты столба рабочей жидкости.

Отсчет показаний часто затруднен из-за колебания уровня жидкости в обоих коленах. К недостаткам их относятся также громоздкость, хрупкость, малые пределы измерений, не превышающие .1000 мм рт. ст. Жидкостные манометры применяют в основном в качестве контрольных лабораторных приборов при исследовательских работах и при проверке стационарных приборов, рассчитанных на малые давления.

При установке жидкостных манометров необходимо, чтобы трубка и шкалы прибора устанавливались вертикально; прибор устанавливался на уровне глаз наблюдателя; температура жидкости была постоянной по высоте манометра, так как понижение температуры окружающей среды до температуры затвердевания жидкости вызывает поломку стеклянных трубок манометра; жидкость в трубках была незагрязненной и не имела пузырьков воздуха.

Манометры с одновитковой трубчатой пружиной. Преимущества пружинных манометров заключаются в удобстве наблюдения за показаниями по хорошо видимой шкале, в возможности автоматической записи измерений и показаний. В этих манометрах в качестве рабочей части используют $\frac{2}{3}$ всей шкалы, а при резко колеблющейся нагрузке, что улучшает условия работы пружины.

Наиболее распространены в промышленности манометры с трубчатой одновитковой пружиной.

Манометр (рис. 5,23, *a*) состоит из корпуса, который защищает от повреждений и засорений. На основании корпуса расположен механизм манометра.

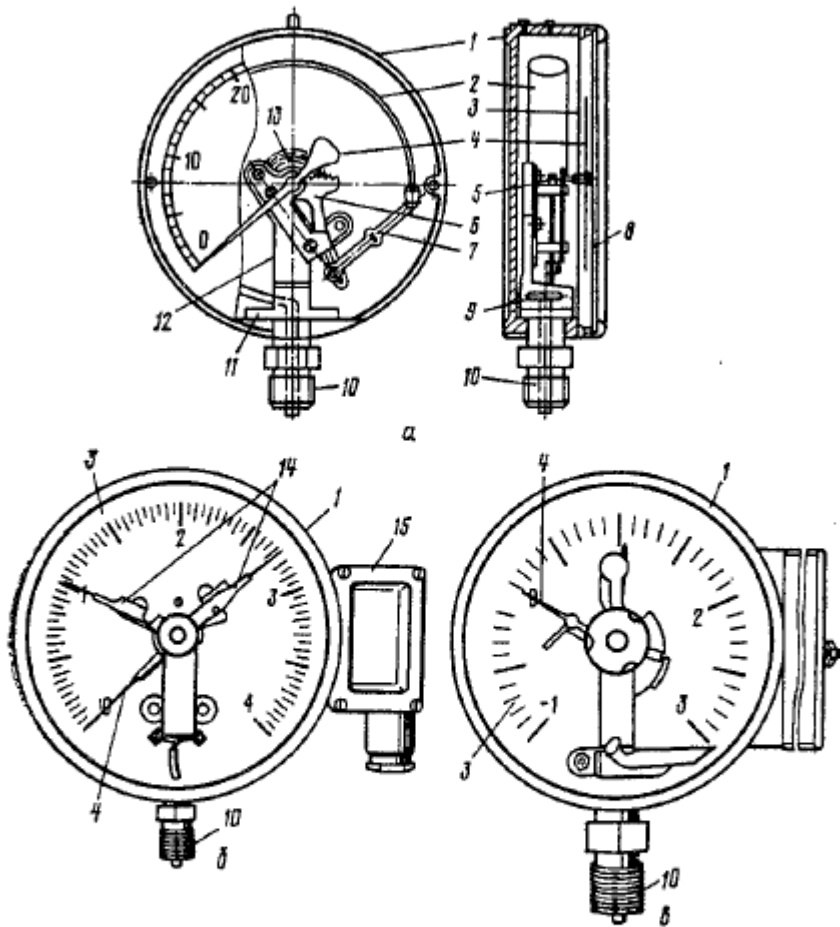


Рис. 5.23. Манометры:

a — с одновитковой трубчатой пружиной; *б* — контактный; *е* — мановакуумметр;
 1 — корпус; 2 — трубка (пружина); 3 — циферблат со шкалой; 4 — стрелка; 5 — шестерня (трубка); 6 — зубчатый сектор; 7 — поводок (тяга); 8 — стекло; 9 — основание;
 10 — ниппель; 11 — прилив; 12 — стойка; 13 — спиральная пружина; 14 — контактные стрелки наименьшего и наибольшего допустимого значения давления; 15 — электрическая коробка для сигнализации

Овальная трубка является главной рабочей частью механизма. Один ее конец запаян и свободно перемещается, другой — впаян в основание. Основание манометра — толстостенная камера с ниппелем и стойкой. Камера имеет приливы, к которым крепится корпус прибора. Внутренняя полость трубки соединяется со средой, давление которой измеряем.

Принцип работы манометра следующий. Свободный конец трубчатой пружины соединен с поводком. Другим концом поводок соединен с зубчатым сектором. При увеличении давления в трубке ее свободный конец передвигается, тянет за собой поводок и двигает зубчатый сектор. Сектор поворачивает шестерню, которая сцеплена с сектором. На оси шестерни помещается стрелка манометра, являющаяся указателем циферблата, помещенного под стекло. Ме-

ханизм передачи регулируют длиной тяги и изменением плеча сектора. Применяют пружины различной упругости, обеспечивая необходимую чувствительность манометров. При длительной работе манометра трубчатая пружина растягивается, теряя свои упругие свойства.

По типу описанного манометра изготавливают ряд приборов, в том числе вакуумметры и мановакуумметры (рис. 5.23, в).

Контактные манометры. Контактные манометры (рис. 5.23, б) имеют многостороннее применение для контроля, регулирования и управления давлением. Их применяют для дистанционной электрической (оптическая или акустическая) сигнализации наименьшего и наибольшего допустимых значений давления; для дистанционного управления, чтобы включить или выключить управляющий орган (клапан, двигатель, насос и т. д.) при достижении определенных измеряемых величин; для регулирования и поддержания при помощи управляющего органа (контактора, двигателя) заданный рабочий режим.

Манометры с контрольной стрелкой используют в качестве рабочих манометров, имея дополнительную стрелку для измерения наивысшего давления.

Контрольные манометры служат для проверки правильности показаний рабочих манометров, которые обладают более высокой точностью измерения. Погрешность $+1\%$ от максимального значения шкалы. Они имеют две трубчатые пружины, впаянные в общий держатель, и сообщаются одновременно с одним ниппелем. При исправной работе прибора показания обеих стрелок должны точно совпадать.

Образцовые манометры и вакуумметры представляют класс приборов высокой точности и используются в лаборатории для измерения давления и вакуума. Шкала образцовых манометров имеет условные деления в угловых градусах с интервалом через Γ по окружности циферблата на дуге 300° . Каждый прибор имеет свидетельство, в котором условные деления шкалы переведены в единицы давления. Класс точности приборов 0,2; 0,35; 0,5. Соответственно классу точности погрешности образцовых манометров и вакуумметров составляют $+0,2$; $\pm 0,35$; $\pm 0,5\%$ от наибольшего значения шкалы.

Для удобства обслуживания, повышения достоверности показаний и надежности работы при установке пружинных манометров и вакуумметров необходимо соблюдать следующие правила:

- должен быть свободный доступ обслуживающего персонала к приборам;
- манометр должен быть установлен в строго вертикальном положении с соответствующими приспособлениями (рис. 5.24);
- манометр должен быть снабжен запорным вентилям (рис. 5.24, б), предназначенным для отклонения манометра от подводящей трубы или измерительного моста, с целью удаления воздуха из манометра и контроля технического состояния и поверки; применение зажимных муфт и соединительных патрубков (рис. 5.24, е) позволяет закрепить и уплотнить запорный вентиль в любом положении без вращения манометра; присоединить к трубке меньшего диаметра можно при помощи накидной гайки с ниппелем;

9. при резких колебаниях давления следует защищать измерительное звено манометра, применяя регулируемое дроссельное приспособление (рис. 5.24, д) или игольчатый дроссельный клапан (рис. 5.24, з) либо устанавливая суженную соединительную трубку перед манометром (рис. 5.24, в). При медленном возрастании давления и мгновенном его падении перед манометром целесообразно устанавливать регулируемое дроссельное приспособление с возвратным шариком (см. рис. 5.24, д). Применяют также игольчатые дроссельные клапаны (буфер или демпфер), которые встраивают непосредственно в запорной цапфе манометра (см. рис. 5.24, з). Регулируемые дроссельные приспособления должны быть установлены между манометром и запорным органом, что обеспечивает возможность запираания нагнетательного трубопровода во время очистки. При перекачивании загрязненных сред нарушается рабочий режим в измерительной системе. В таких случаях дроссельное приспособление защищают от загрязнения, устанавливая фильтр.

Манометр должен быть защищен от действия высокой температуры (выше 60°), для чего перед манометром устанавливают предохранительную сифонную трубку (рис. 5.24, а), назначение которой — не допустить в измерительную часть манометра горячий пар или жидкость.

Если манометр установлен ниже места отбора давления, то показания его будут завышены за счет дополнительного давления

столба жидкости, равного по величине разности уровней между манометром и местом отбора. Эту поправку надо вычесть из показаний прибора. Если манометр установлен выше места отбора давлений, поправку следует прибавить к показаниям прибора.

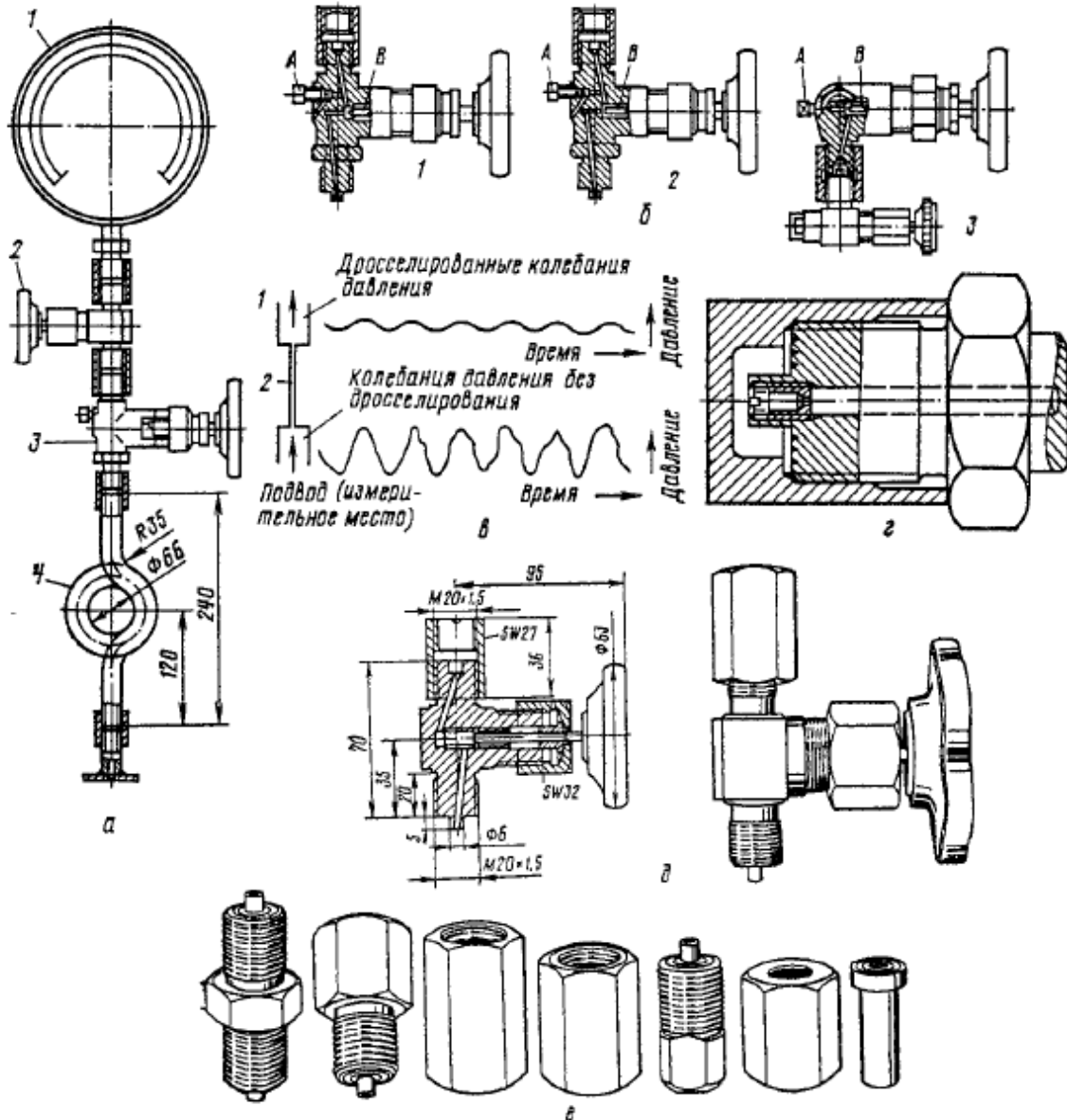


Рис. 5.24. Установка манометра:

a — общая схема: 1 — манометр; 2 — регулирующее дроссельное приспособление; 3 — запорный вентиль; 4 — предохранительная сифонная трубка;

b — запорный вентиль: 1 — рабочее положение (пробка для выпуска воздуха *A* закрыта, шпindelь *B* вентиля открыт, манометр находится под давлением); 2 — положение при выпуске воздуха (*A* — открыта; *B* — закрыт, манометр в бездействии, нулевое положение); 3 — контрольное положение (*A* — закрыта; *B* — закрыт, испытательный вентиль закрыт, манометр для проверки присоединен);

в — схема дросселирования: 1 — манометр; 2 — дроссель;

г — игольчатый дроссельный клапан;

д — регулируемое дроссельное приспособление;

e — соединительные части

Манометры, вакуумметры и мановакуумметры с пластинчатой мембраной. Эти приборы позволяют измерять давление агрессивных сред и вязких жидкостей. Рабочим органом их является волнистая (гофрированная) пластинка, которая прогибается под действием разности давлений с обеих сторон. Верхняя часть пластинки соприкасается с атмосферой. С нижней стороны на пластинку действует давление среды.

При увеличении давления измеряемой средой середина пластинки прогибается и указательная стрелка поворачивается на определенный угол.

Точность и чувствительность этих приборов ниже, чем манометров с трубчатой пружиной, но их применяют в условиях, когда приборы подвергаются сотрясениям, вибрации и т. д.

Манометры, вакуумметры, мановакуумметры с гармониковой мембраной (сильфонные). Рабочей частью манометра является гармониковая мембрана (сильфон) (рис. 5.25, *а*). Измеряемое давление подводится через основание внутрь сильфона. Снаружи на сильфон действует атмосферное давление. При повышении давления внутри сильфона длина его увеличивается, что передается через систему рычагов перу, записывающему изменения давления на диаграммном бумажном диске. Сильфонные манометры выпускают главным образом самопишущими.

Манометр для измерения малых перепадов при высоких значениях статических давлений (рис. 5.25, *б*). Состоит из корпуса, в котором закреплена измерительная мембрана с помощью штуцера и гайки. В цилиндрическую расточку корпуса над измерительной мембраной установлена многогофрированная разделительная мембрана с опорной платой и жестким центром с поводком. К основаниям арок мембраны приварены кольца.

На другом конце жесткого центра закреплен рычаг, шарнирно соединенный со штоком измерительной мембраны. Манометр работает следующим образом. Одно из давлений воздействует на измерительную мембрану с одной стороны, а другое давление на эту же мембрану — с другой стороны и одновременно на разделительную мембрану.

При этом разделительная мембрана расположена на упорах как в центре, так и по основаниям каждого гофра в двух противоположных точках по линии поворота. При наличии разности давле-

ний измерительная мембрана перемещается в сторону меньшего давления и с помощью рычага поворачивает жесткий центр с поводком разделительной мембраны. Перемещение поводка передается электрическому преобразователю.

Устройство для определения пульсирующего давления и фиксации его максимального значения. В корпусе устройства (рис. 5.25, в) установлены манометр, клапан и взаимодействующее с ним отжимное приспособление. Устройство работает следующим образом. При поступлении давления постоянной величины в устройство жидкость, открывая клапан, действует на манометр. При понижении давления клапан закрывает проход жидкости в обратном направлении, а манометр фиксирует максимальное давление. При уменьшении значения максимального давления или при измерении давления меньшей величины необходимо нажать кнопку отжимного приспособления, которая открывает клапан.

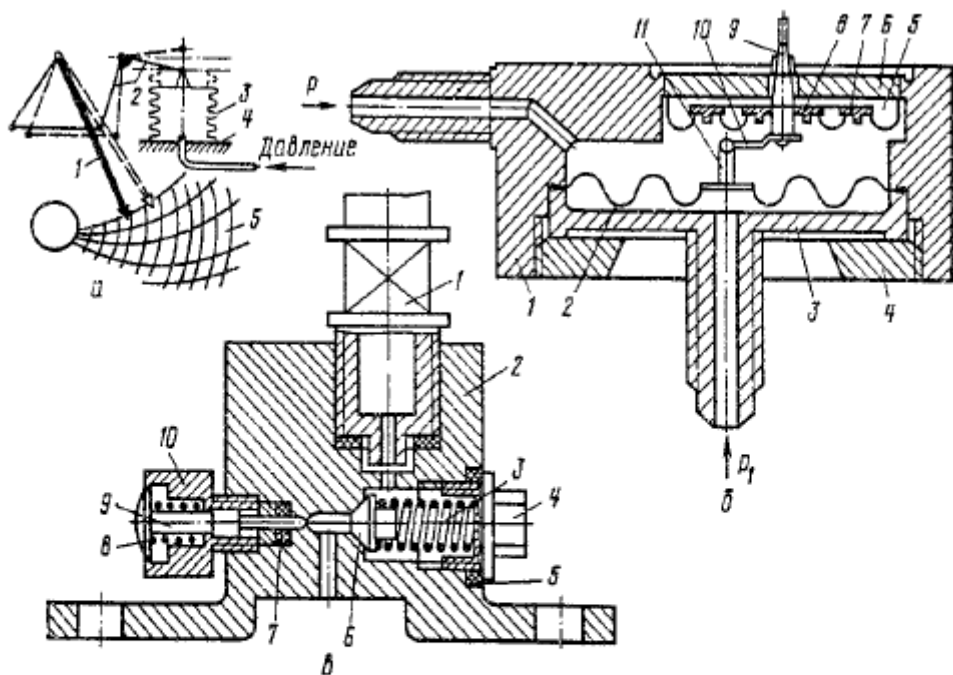


Рис. 5.25. Схемы манометров:

- a* — самопишущего сифонного МС: 1 — перо; 2 — система рычагов; 3 — гармошковая мембрана (сифон); 4 — неподвижное основание; 5 — диаграммный диск;
- б* — для измерения малых перепадов давления: 1 — корпус; 2 — измерительная мембрана; 3 — штуцер; 4 — гайка; 5 — многогофрированная разделительная мембрана; 6 — опорная плита; 7 — кольцо; 8 — жесткий центр; 9 — поводок; 10 — рычаг; 11 — шток;
- в* — устройство для определения пульсирующего давления и фиксации его максимального значения: 1 — манометр; 2 — корпус; 3 — пружина; 4 — пробка; 5, 7 — уплотнения; 6 — клапан; 8 — возвратная пружина; 9 — кнопка; 10 — ограничительная головка

При открытом клапане часть жидкости вытекает из манометрической трубки, в результате чего устанавливается истинное зна-

чение давления, меньшее по величине предыдущему. При незначительном пропускании жидкости через клапан стрелка манометра медленно возвращается в нулевое положение. Для быстрого сбрасывания показаний манометра при отключении аппарата или насоса необходимо нажать на кнопку.

Манометры, приборы и датчики для измерения давления вязко-пластичных продуктов

К вязко-пластичным продуктам, которые характеризуются наличием предельного напряжения сдвига, можно отнести мясные и рыбные колбасные, ливерные фарши, паштеты, котлеты, творожно-сырковые массы, сметана и др.

Для измерения давления вязко-пластичных продуктов нельзя устанавливать обычные механические манометры, пьезометры, дифманометры и другие приборы, так как чувствительные элементы приборов имеют сложную конфигурацию и не поддаются мойке и стерилизации. Эту группу приборов нельзя устанавливать на аппаратах и трубопроводах для измерения давления вязко-пластичных систем, потому что транспортируемая среда проникает в измерительный элемент и прибор оказывается нечувствительным к изменению давления и дальнейшему использованию. Следовательно, нужны приборы и датчики, у которых чувствительный орган должен только соприкасаться с продуктом. Приборы для измерения давления вязко-пластичных масс должны удовлетворять следующим требованиям: легкость очистки, свободный доступ к чувствительному элементу, точность и воспроизводимость показаний, надежность в работе. В наибольшей степени этим требованиям отвечают специальные механические и электрические приборы и манометры, конструкции которых чрезвычайно разнообразны.

Механические датчики. В механических датчиках (рис. 5.26) с буферной жидкостью в качестве регистрирующего прибора применим обычный или контактный манометр, позволяющий регулировать процесс в данном интервале давлений.

Для измерения давления вязко-пластичных систем с помощью обычного механического манометра фирма Veb Messgeratewerk Veier Feld (Германия) использует промежуточные обменники (рис. 5.26, а). Они состоят из двух полостей, разъединенных между собой

мембраной. Полость в сторону манометра заполнена буферной жидкостью для передачи давления, а другая полость соприкасается с измеряемой средой. Давление измеряемой вязко-пластичной среды, например фарша, действует на мембрану, которое через буферную жидкость передается на измерительную систему обычного манометра. При превышении допустимой для манометра рабочей температуры предлагается между промежуточным обменником давления и манометром устанавливать капилляр. Использование промежуточного обменника увеличивает погрешность используемого манометра всего на $+0,05 \text{ кг/см}^2$. Датчик № 050 не всегда возможно устанавливать на трубопровод диаметром менее 75 мм. Поэтому для устранения этого недостатка в Московском технологическом институте мясной и молочной промышленности (МТИММПе) разработан датчик, аналогичный предыдущим (рис. 5.26, б). Манометр ввертывается в бобышку, приваренную на трубопроводе, в котором между корпусом и шайбой помещают резиновую мембрану с двумя прокладками. Штуцер манометра рассверливается до диаметра 10... 12 мм. Внутренняя полость чувствительного элемента и корпус тщательно заливают буферной жидкостью (глицерином или маслом). При завинчивании манометра в корпус резиновая мембрана деформируется и манометр показывает избыточное давление $(0,1...0,5) \cdot 10^5 \text{ Па}$. Это устройство неприменимо для измерения высоких давлений, так как трубка Бурдона имеет поперечное сечение в долях миллиметра и ее трудно заполнить маслом. Если трубка не полностью заполнена маслом, то воздух может настолько сжаться, что резина лопнет. Верхний температурный предел определяется термостойкостью резиновой мембраны. Для более широкого использования аналогичных датчиков давления в трубопроводах при транспортировании по ним сильновязких и вязко-пластичных жидкостей и материалов с механическими включениями С. Ф. Коган разработал устройство (рис. 5.26, в), снабженное дополнительным цилиндром с фланцами, которые расположены коаксиально чувствительному элементу. Внутренняя поверхность цилиндра образует с наружной поверхностью патрубка герметичную камеру, которая заполнена буферной жидкостью и соединена с измерительным манометром и компенсационным устройством.

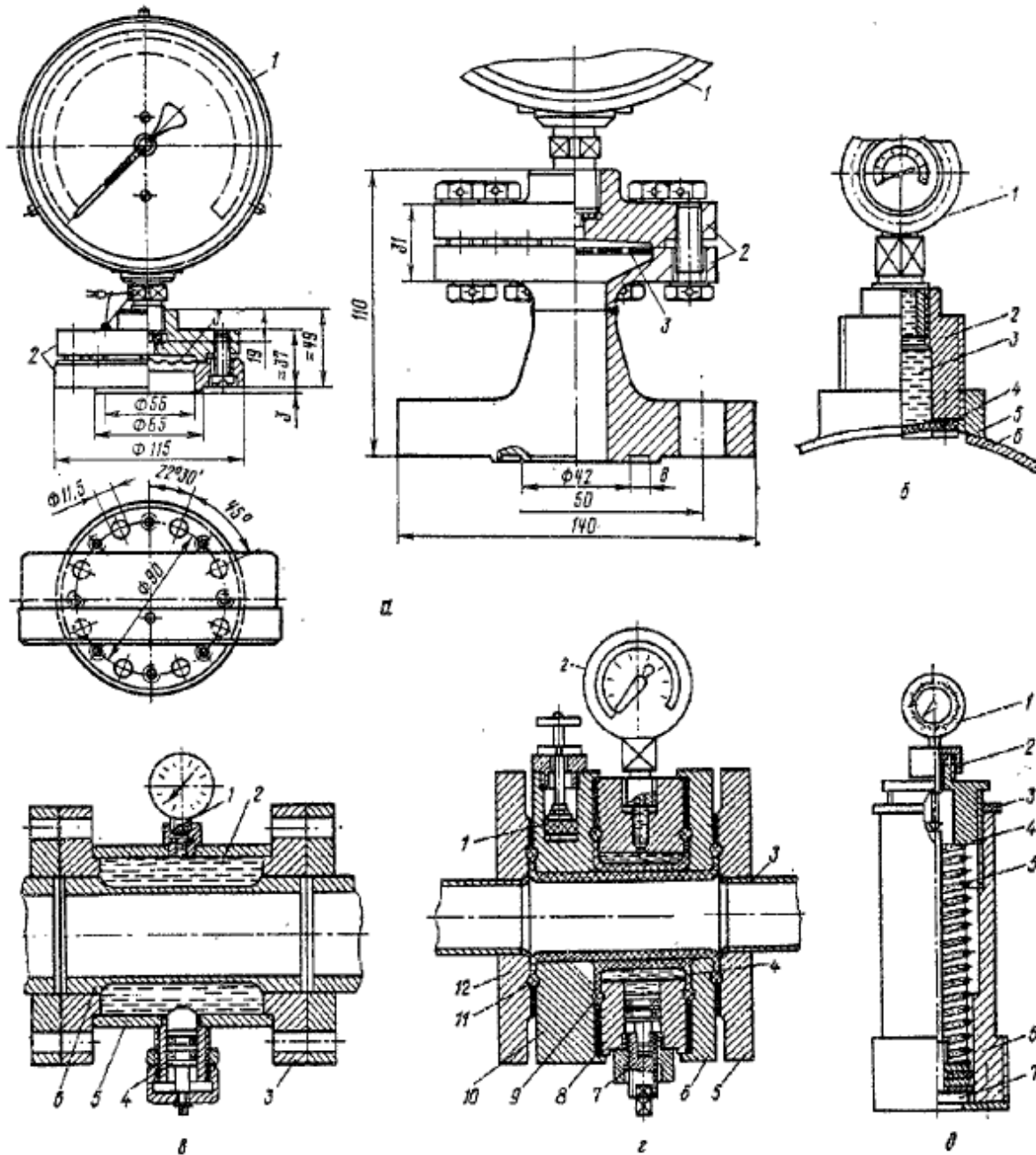


Рис. 5.26. Механические датчики для измерения давления вязко-пластичных продуктов:

а — манометры 2/М531, ND-50 и ND-100: 1 — манометр; 2 — фланцы; 3 — мембрана;

б, в, г — манометры с буферной жидкостью;

б: 1 — манометр; 2 — цилиндрический корпус; 3 — буферная жидкость; 4 — резиновая мембрана; 5 — бобышка; 6 — трубопровод;

в: 1 — манометр; 2 — буферная жидкость; 3 — фланцы; 4 — компенсационное устройство; 5 — дополнительный цилиндр; 6 — чувствительный элемент;

г: 1 — аварийный сигнализатор; 2 — манометр; 3 — трубопровод; 4 — буферная жидкость; 5, 6, 10, 12 — фланцы; 7 — компенсатор; 8 — корпус; 9 — эластичный чувствительный элемент; 11 — предохранительная диафрагма;

д — прибор с пружиной и индикатором: 1 — индикатор; 2 — гайка со втулкой для крепления индикатора; 3 — контргайка; 4 — установочная втулка; 5 — сменная пружина; 6 — цилиндрический корпус с резьбой; 7 — поршень с кожаным уплотнением и хвостовиком

При заполнении камеры буферной жидкостью с помощью компенсационного устройства создают давление, величину которого выбирают такой, чтобы напряжение в стенке чувствительного элемента не превышало расчетного. Затем устройство тарируют. В датчике (рис. 5.26, *з*) повышенная надежность измерения достигается тем, что чувствительный элемент снабжен предохранительной трубчатой отбортованной эластичной диафрагмой. Контактная цилиндрическая поверхность между ними сообщается с аварийным сигнализатором с помощью канала. К корпусу датчика, снабженного двумя гнездами под манометр и компенсатор, присоединен трубчатый эластичный чувствительный элемент, прижатый фланцами. Дополнительная предохранительная диафрагма закреплена между фланцами трубопровода. Внутренняя полость, образованная кольцевой проточкой корпуса и герметически присоединенным к нему чувствительным элементом, заполнена буферной жидкостью. При полном износе предохранительной диафрагмы или его местном разрыве перекачиваемый продукт поступает через канал в цилиндрическую проточку, перемещая вверх поршень аварийного сигнализатора, указывая на разрыв визуально или с помощью световой или звуковой сигнализации. Данное устройство используют при перекачке вязко-пластичных продуктов с крупными механическими включениями.

Механические датчики с буферной жидкостью просты по конструкции, но требуют частых смен резиновых мембран и диафрагм. С целью устранения этого недостатка в МТИММПе (МГУПБ) разработан датчик давления, у которого силовым элементом служит пружина, а регистрирующим — индикатор часового типа (рис. 5.26, *д*). Датчик ввертывается в бобышку, приваренную на трубе (см. рис. 5.26, *б*). В нижней части цилиндрического корпуса датчика установлена ограничительная шайба, а в полированной части свободно перемещается поршень с кольцевыми кожаными уплотнениями и хвостовиком. Поршень под действием давления продукта сжимает сменную пружину, а его хвостовик перемещает головку индикатора часового типа, который с помощью конической разрезной втулки и гайки устанавливается неподвижно. Датчик тарируют на прессе для тарировки манометров. В него можно вставлять пружины различной жесткости, которые поджимаются установочной втулкой и фиксируются контргайкой, что позволяет измерять дав-

ление в широком диапазоне. Для непрерывной записи давлений вместо индикатора можно использовать, например, индукционный датчик перемещений.

Механические приборы с буферной жидкостью и пружиной дают устойчивые показания в области от $0,2 \cdot 10^5$ до $50 \cdot 10^5$ Па.

Электрические датчики давления. В этих датчиках силовым элементом является упругая стальная мембрана, регистрирующим — тензомер, пьезоэлемент, потенциометр (рис. 5.27). У тензометрического (рис. 5.27, а) датчика прогиб мембраны под действием давления продукта вызывает удлинение тензомера и, следовательно, изменение его электрического сопротивления и силы тока в цепи, что записывается или регистрируется вторичным прибором. Датчик тарируют на прессе.

Мембрану с рабочим тензомером устанавливают на заплечики корпуса и с помощью гайки через втулку жестко закрепляют по периметру. В зависимости от интервала измеряемого давления меняется толщина мембраны, которую определяют по уравнению

$$\delta = 0,86R \sqrt{\frac{p}{\sigma}}, \quad (5.115)$$

где R — радиус незащемленной части мембраны, м; p — максимальное давление продукта, Па; σ — допустимое напряжение, Па (около $1000 \cdot 10^5$ Па).

В датчике (рис. 5.27, б) с целью повышения чувствительности, линейности показаний и надежности в работе между стаканом и цилиндром установлена прокладка из материала с малой жесткостью; Тензодатчик приклеен в двух точках, одна из которых находится на поверхности цилиндра, а другая — на поверхности стакана. Точность замера повышается также в результате снижения температурных погрешностей. Для этого датчик снабжен дополнительным полупроводниковым тензорезистором, установленным параллельно рабочему и закрепленным с ним в одной точке, расположенной на цилиндре. Устройство работает следующим образом. Подводимое давление воздействует на стенки цилиндра, прокладку и на поверхность дна стакана, который под действием приложенного давления растягивает прокладку вдоль оси датчика.

Измерительный рабочий тензорезистор воспринимает растяжение прокладки, изменяя свое сопротивление пропорционально давлению. Компенсационный тензорезистор нагревается одновре-

менно с рабочим тензорезистором при прохождении через него измерительного тока

Ввиду того, что температура обоих тензорезисторов равна, достигается высокая точность компенсации влияния температуры на тензочувствительность полупроводниковых тензорезисторов.

С целью повышения точности замера А. С. Лев и Г. И. Гераскин разработали тензометрический датчик, состоящий из упругого элемента, выполненного в виде цилиндрической тонкостенной трубки, закрытой с одной стороны штуцером, а с другой — крышкой (рис. 5.27, в). Внутри трубки эксцентрично ее оси расположен стержень. По наружной поверхности упругого элемента в диаметрально противоположных точках наклеены тензорезисторы. Оси тензорезисторов расположены в плоскости, проходящей через продольные оси упругого элемента и стержня. При создании давления в системе, где установлен датчик, упругий элемент деформируется. При этом деформация стенки, близлежащей к стержню, очень незначительна по сравнению с удаленной стенкой, так как напряжение в стенке, создаваемое измеряемой средой, компенсируется напряжением, возникающим от изгибающего момента.

Для упрощения конструкции тензодатчиков В. К. Зайцев предложил рабочий и компенсационный тензорезисторы выполнить в виде одного витка тензопровода в стеклоизоляции, уложенного в прорези на торце упругого элемента (рис. 5.27, г). Тензопровод выполнен с предварительным натяжением. Датчик (см. рис. 5.27, г) работает следующим образом. Возникающий прогиб мембраны в результате воздействия на нее давления передается на упругий элемент, который испытывает деформацию сжатия. Под воздействием растягивающих напряжений в проводе рабочего тензорезистора уменьшается величина этих напряжений, а следовательно, и сопротивление тензорезистора, которое пропорционально измеряемому давлению. Термокомпенсационный тензорезистор помещен в преобразователь без предварительного натяжения, поэтому сопротивление не изменяется.

Датчики с пьезоэлементами. В датчике давления (рис. 5.28, а) с частотным выходом в качестве возбудителя и преобразователя колебаний упругой пластинки использованы пьезокерамические элементы. Изменение частоты упругой пластины вызывается сжатием пластины со стороны торцов. Датчик состоит из корпуса, выпол-

ненного вместе с другой вогнутой внутрь мембраной. Внутри корпуса находится упругая стальная пластина, нижний и верхний концы которой опираются на металлические прокладки. Нижний преобразующий пьезоэлемент помещен между двумя металлическими прокладками и находится на мембране. Верхний возбуждающий пьезоэлемент расположен между металлической и изолирующей прокладками.

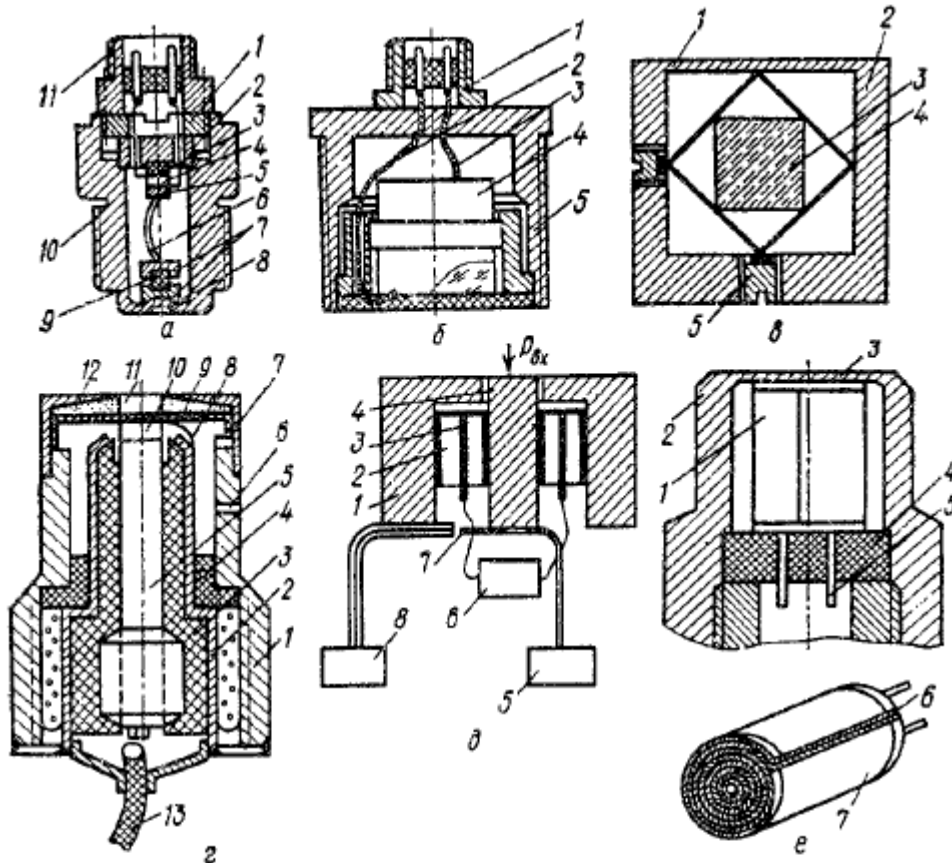


Рис. 5.28. Пьезоэлектрические датчики давления:

а — датчик давления с частотным выходом: 1 — поджимная гайка; 2, 5, 7 — металлические прокладки; 3 — возбуждающий пьезоэлемент; 4 — изолирующая прокладка; 6 — упругая пластина; 8 — мембрана; 9 — преобразующий пьезоэлемент; 10 — корпус; 11 — штепсельное соединение;

б — пьезоэлектрический датчик; 1 — штепсельное соединение; 2, 3 — выводы; 4 — пьезокристалл; 5 — корпус с уступом;

в — датчик с пьезорезонатором: 1 — мембрана; 2 — корпус; 3 — пьезорезонатор; 4 — упругий элемент; 5 — винты для регулировки частоты пьезорезонатора;

г — датчик с волноводным стержнем и пьезометрической пластиной: 1 — корпус; 2 — металлическая втулка; 3 — изолятор; 4 — направляющая втулка; 5 — стержень; 6 — дренажное отверстие; 7 — крышка; 8 — тонкая проволока; 9 — мембрана; 10 — пьезоэлектрическая пластина; 11 — теплозащитный элемент; 12 — резиноподобный герметик; 13 — кабель;

д — датчик с пьезопреобразователем: 1 — корпус; 2 — пьезопреобразователи; 3 — электроды; 4 — элемент, воспринимающий давление; 5 — источник света; 6 — цепь демпфирования; 7 — световоды; 8 — фотоприемник;

е — датчик с рулонным пьезоэлементом: 1 — пьезоэлемент; 2 — корпус; 3 — мембрана; 4 — основание; 5 — электроды; 6 — слой материалов пьезоэлемента; 7 — токопроводящие части пьезоматериала

Пьезоэлементы выполнены в виде плоского диска с электродами на торцах и имеют продольную поляризацию. Сигнал преобразующего элемента подается на вход усилителя, выход которого электрически соединен с возбудителем. От усилителя идет сигнал к регистратору частоты. Для получения изгибных колебаний упругую пластину сжимают до некоторого прогиба поджимающей гайкой. Пьезоэлектрический датчик давления (рис. 5.28, б), разработанный Г. Н. Сунцовым, состоит из корпуса с уступом для опоры и крепления цилиндрического пьезокристалла, который разделен на две симметричные части, имеющие выводы от активных поверхностей и экран, соединенный с корпусом. Под действием давления деформируется нижняя часть пьезокристалла до кольцевой опоры, верхняя часть остается недеформированной. Полезный сигнал снимается с выводов.

В датчике, сконструированном С. З. Мамян (рис. 5.28, в), между мембраной и корпусом установлен упругий элемент в виде рамки, внутри которой размещен пьезорезонатор, имеющий форму многоугольника. Частоту пьезорезонатора регулируют специальными винтами, которые выполняют также функцию скрепления пьезорезонатора с упругим элементом, а последнего — с корпусом датчика. Пьезорезонатор включен в электрическую измерительную схему для формирования и регистрации сигнала, зависящего от прикладываемого к мембране давления. При действии давления на мембрану она деформируется вместе с упругим элементом, в результате чего пьезорезонатор оказывается нагруженным по углам, вызывая тем самым изменения собственной частоты. Это приводит к появлению в измерительной схеме электрического сигнала, пропорционального давлению.

Известны также датчики с чувствительным элементом, состоящим из соединенных между собой пьезоэлектрической пластинки и наружного теплозащитного элемента, скрепленного с волноводным стержнем (рис. 5.28, г). Внутри цилиндрического корпуса датчика в изоляторе закреплен волноводный стержень. Изолятор заключен в металлическую втулку, служащую токопроводом и экраном, которая закреплена в корпусе при помощи клея и направляющей втулки. Наружный электрод пьезоэлектрической пластинки соединен при помощи тонкой проволоки с втулкой.

Между пластиной и элементом зажата мембрана из эластичного материала, например фторопласта, с вырезом в центре. Площадь выреза составляет 70...80% площади пьезоэлектрической пластинки. На торце корпуса поверх мембран закреплена крышка с отверстием в центре. Зазор между крышкой и теплозащитным элементом составляет 0,05...0,1 мм. Пространство между ними заполнено резиноподобным герметиком. Электрический сигнал с пьезоэлектрической пластинки снимается кабелем. В корпусе датчика имеется дренажное отверстие. Датчик работает следующим образом. При действии давления на торец датчика чувствительный элемент деформируется и на пьезоэлектрической пластине возникает электрический сигнал. Мембрана и герметик предохраняют боковую поверхность пьезоэлектрической пластины от действия измеряемого давления.

В датчике давления (рис. 5.28, *д*), разработанном М. С. Хлыстуновым, для повышения точности измерений к выходу пьезообразователя подключена цепь демпфирования его колебаний. К элементу и корпусу жестко прикреплены концы находящихся в оптическом контакте сканирующего и приемного световодов, другие концы которых соединены соответственно с источником света и фотоприемником. Датчик работает следующим образом. При воздействии давления на элемент он смещается относительно корпуса, а пьезопреобразователи деформируются. Смещение элемента вместе со световодом приводит к изменению освещенности световода и появлению на фотоприемнике сигнала, пропорционального давлению. Возникающие при деформации пьезопреобразователей электрические заряды вызывают протекание тока и выделение энергии в цепи демпфирования. Это обеспечивает быстрое затухание колебаний в датчике, что повышает его помехоустойчивость и термостабильность, а демпфирование колебаний повышает точность измерений быстро изменяющегося давления.

Одним из недостатков рассмотренных датчиков является сложность конструкции при большом числе пьезопластин. С целью упрощения конструкции пьезодатчика для измерения давления Ю. В. Чувыкин и др. предложили чувствительный пьезоэлемент выполнять из свернутой в рулон ленты, состоящей из двух слоев пьезоматериала, поляризованных по толщине (рис. 5.28, *е*). Поверхности имеют одинаковую полярность, причем каждый слой пьезома-

териала покрыт с двух сторон проводящими слоями, к которым прикреплены электроды, размещенные на одном из торцов рулона. Чувствительный пьезоэлемент установлен на основании, расположенном в корпусе. Электроды закреплены на токопроводящих слоях, нанесенных на внутренние и внешние поверхности пьезоматериала. Давление через мембрану передается чувствительному элементу, на слоях которого возникают электрические заряды противоположных знаков. Величина заряда пропорциональна давлению и длине ленты.

На рис. 5.29 показаны различные типы электрических датчиков давления (токовихревые, электромеханические и потенциометрические). У токовихревых измерительных преобразователей давления обычно невысокая чувствительность из-за того, что зоны максимального прогиба мембраны и максимальной чувствительности преобразователя не совмещены. С целью устранения указанного недостатка В. М. Карповым и В. Г. Запускаловым предложен датчик (рис. 5.29, *а*),

у которого в центре мембраны расположен упор, а катушка индуктивности расположена над зоной максимального прогиба мембраны. Датчик работает следующим образом. В результате воздействия давления на мембрану меняется зазор между нею и измерительной катушкой, что вызывает изменение импеданса катушки. Чувствительность токовихревого измерительного преобразователя давления повышается за счет локализации прогиба мембраны по кольцу.

Электромеханические датчики обычно содержат упругую мембрану и емкостный преобразователь перемещения упругой мембраны в электрическое напряжение. С целью повышения точности и надежности измерения Л. В. Новиков и др. предложили изготавливать корпус в виде серебряного стакана, а мембраны — посеребренные, стержень — из графита, а наполнитель — посеребренный рубидий. Датчик (рис. 5.29, *б*) работает следующим образом. Давление, создаваемое продуктом, действует на мембрану. За счет деформации мембраны меняется расстояние между нею и графитовым стержнем. Одновременно меняется и плотность наполнителя, в результате чего вырабатывается ток. Выходной сигнал снимается с графитового стержня и корпуса. Несмотря на дороговизну датчика, он имеет существенное преимущество: не нуждается в подаче на

него напряжения, так как сам является источником тока. Это обеспечивает повышенную помехоустойчивость, высокую чувствительность и дистанционность работы.

В потенциометрическом датчике (рис. 5.29, г), разработанном в МГУПБ, чувствительным элементом служит гофрированная мембрана, соединенная с корпусом методом диффузионной сварки. Шток, закрепленный в центре мембраны, передает ее деформацию на щетку, которая скользит по реохорду. Изменение сопротивления измеряют осциллографом (без усилителя) или потенциометром. Входная зона к мембране в противоположность предыдущим устройствам у этого датчика отсутствует. В МГУПБ используют также различные модификации этого датчика.

Непрерывная запись показаний на открытой для визуального наблюдения ленте значительно облегчает проведение экспериментов и их дальнейшую обработку. На базе этих датчиков разработано устройство (рис. 5.29, в) для измерения перепада давления на участках трубопровода или в рабочих органах машин и аппаратов, которое состоит из двух датчиков и моста постоянного тока. С моста сигнал разбаланса подается на выход электронного самопишущего потенциометра, отградуированного в единицах давления. Проволочные резисторы датчиков давления включены в плечи моста, состоящие из регулируемых

и нерегулируемых резисторов. Для установки моста в равновесное состояние в его плечах предусмотрены регулируемые резисторы. Равновесное состояние моста контролируют с помощью индикатора нуля. Питание устройства предусмотрено от источника напряжением не более 6,5 В, который включается коммутирующим устройством.

Для определения величины давления продукта в оболочке из эластичного материала на базе потенциометрического датчика в МГУПБ разработано устройство, которое можно использовать для снятия эпюры давления по сечению трубопровода (рис. 5.29, д). Устройство снабжено трубкой, охватывающей преобразователь, и чувствительным элементом, выполненным в виде стакана из эластичного материала. С целью устранения истечения фарша из оболочки трубка снабжена манжетой. Устройство работает следующим образом.

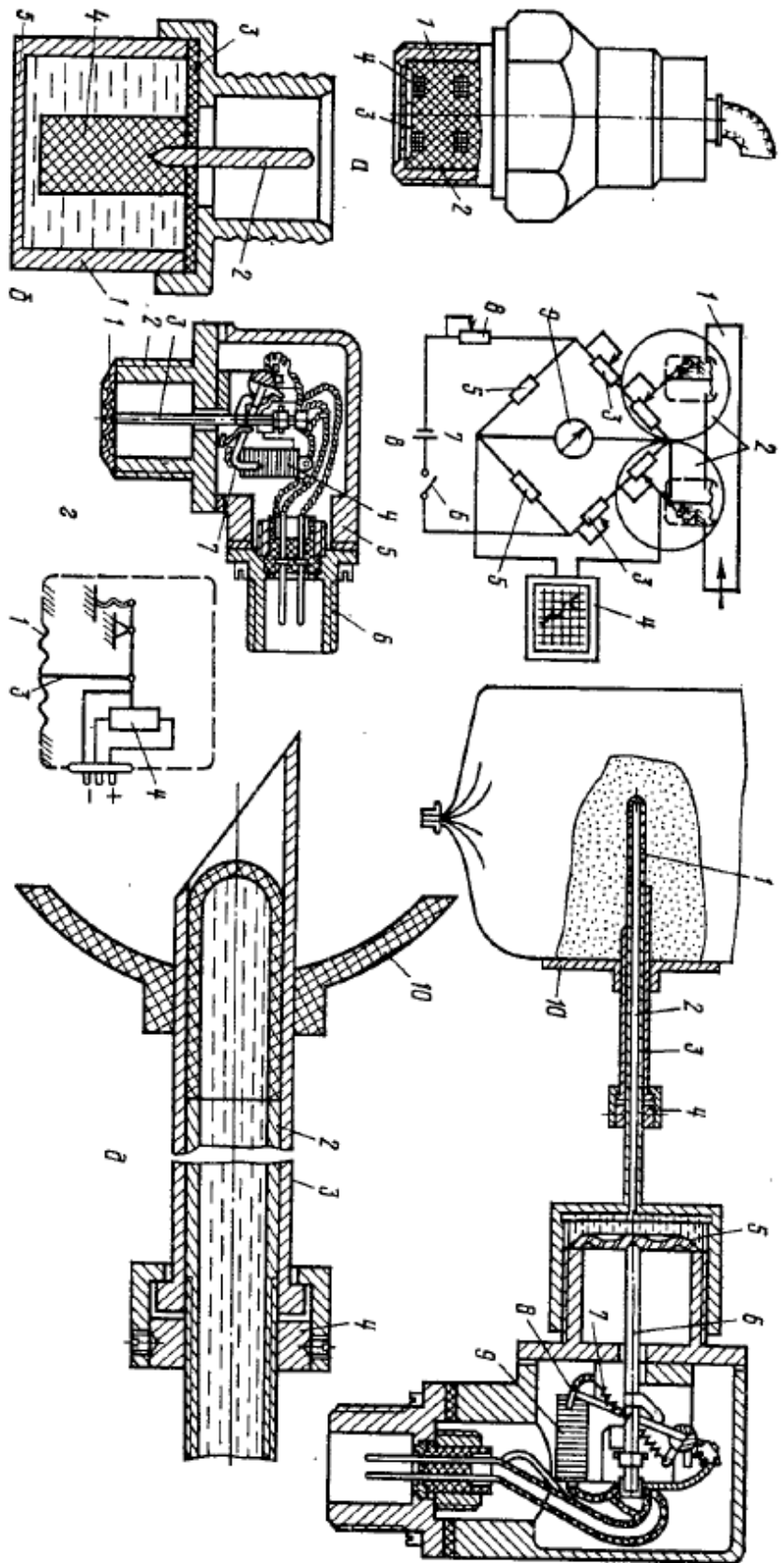


Рис. 5.29. Электрические датчики давления:

а — термопаровой: 1 — корпус с мембраной; 2 — каркас; 3 — осевой упор; 4 — измерительная катушка; б — электромеханический: 1 — корпус; 2 — поперечный рубильник; 3 — крышка из изоляционного материала; 4 — графитовый стержень; 5 — серебряная мембрана;

в — устройство для определения перепада давления: 1 — трубопровод; 2 — потенциометрический датчик давления; 3 — резисторы для установки моста в равновесное состояние; 4 — потенциометр; 5 — регулируемые резисторы; 6 — коммутлирующее устройство; 7 — источник тока; 8 — резистор; 9 — индикатор нуля;

г — потенциометрический: 1 — мембрана; 2 — корпус; 3 — шток; 4 — реостат; 5 — крышка; 6 — штепсельное соединение; 7 — сетка; д — потенциометрический датчик для измерения давления в продукте: 1 — чувствительный элемент; 2 — трубка с буферной жидкостью; 3 — защитная трубка; 4 — гайка; 5 — мембрана; 6 — передаточный механизм; 7 — пружина; 8 — сетка; 9 — реостат; 10 — уплотнение

Вращением гайки защитная трубка надвигается на чувствительный элемент, придавая гидропреобразователю необходимую жесткость. Затем устройство гидропреобразователем подводится к батону колбасы, манжета слегка прижимается к оболочке и за счет адгезии плотно прилегает к оболочке. Гидропреобразователь острым концом протыкает оболочку и входит в батон. Вращением гайки в обратную сторону защитная трубка сдвигается с чувствительного элемента. Фарш, находящийся под давлением, воздействует на чувствительный элемент, который, испытывая объемное сжатие, передает его через буферную жидкость на мембрану.

Прогиб последней через передаточный механизм вызывает сдвиг щетки реостата, изменяя его омическое сопротивление, что фиксируется вторичным прибором. Устройство позволяет измерить избыточное давление фарша внутри колбасных батонов и по сечению трубопровода. В этом устройстве имеется свободный доступ к чувствительному элементу, что облегчает санитарную обработку. Устройство обладает высокой точностью, воспроизводимостью показаний и надежностью в работе.

Таким образом, датчики и устройства для измерения давления вязких и вязко-пластичных продуктов позволяют контролировать, регулировать и автоматизировать процесс трубопроводного транспортирования мясопродуктов, а также шире использовать расходомеры переменного перепада давления.

2. Вопросы и задания для самоконтроля

1. Чем отличается гидромеханическое давление от гидростатического?
2. Какое давление измеряют барометры, тягомеры и напорометры, манометры, вакуумметры и мановакуумметры?
3. Классификация приборов для измерения давления по принципу действия.
4. Преимущества и недостатки жидкостных манометров и область их применения.
5. Принцип действия манометра с одновитковой трубчатой пружиной.
6. Область применения контактных манометров.
7. Чем отличаются образцовые манометры от контрольных?

8. Каковы правила установки пружинных манометров и вакуумметров?
9. Область применения манометров с пластинчатой и гармонической мембраной.
10. Каковы особенности конструкции манометров для измерения малых перепадов при высоких значениях статических давлений?
11. Принцип действия устройства для определения пульсирующего давления.
12. Каковы особенности и требования к манометрам для измерения давления вязко-пластичных продуктов?
13. Каким условиям и требованиям удовлетворяют механические и электрические датчики для измерения давления вязко-пластичных продуктов?
14. 14'. Как выбирается и рассчитывается толщина мембраны для тензо-метрического датчика давления?
15. Какие конструктивные отличия в тензометрических, пьезометрических, потенциометрических и других электрических датчиках давления?
16. Как можно измерить давление внутри колбасного батона?

Практическое занятие №27 Приборы и устройства для контроля и регулирования параметров движения среды. Расходомеры. Расходомеры переменного перепада давления. Расходомеры постоянного перепада давления. Турбинные расходомеры. Объемные и массовые расходомеры. Бесконтактные расходомеры.

План занятий

1. Теоретическая часть
2. Вопросы и задания для самоконтроля

1. Теоретическая часть Расходомеры

В мясной промышленности при выработке говяжьего, свиного, бараньего, костного и других топленых жиров, мясокостных, желатиновых и других бульонов, крови, медпрепаратов, колбасных фаршей широко применяют межоперационный трубопроводный транспорт. При этом важное место занимает учет расхода сырья, готовой продукции, воды и пара.

Рассмотрим один из наиболее важных участков мясного производства — колбасный на примере приготовления фарша в процессе тонкого измельчения на куттере. Для получения колбасных изделий со стабильным и хорошим качеством и выходом для каждого вида изделий необходимо поддерживать эталонные показатели, что почти невозможно без применения расходомеров и дозаторов.

Здесь сталкиваемся с учетом расхода и дозированием вязкопластичных (измельченное на волчке мясное сырье, сливочное масло), жидких (добавляемая в фарш вода, молочная сыворотка, жировая эмульсия, яйцо и др.) и сыпучих (меланж, сухое молоко, специи и др.) продуктов. Выполнение этих операций вручную с использованием разрозненных приборов вносит субъективный фактор, который может отразиться на качественных показателях готовой продукции. Необходимы приборы, обеспечивающие автоматизацию процесса дозирования и учета расхода. Внедрение в мясной промышленности систем, позволяющих контролировать количественный состав компонентов фарша, измеряющих его расход при пере-

мещении по трубопроводам, создает предпосылки для механизации и автоматизации процесса фаршеприготовления.

В процессе технологического производства продукции создается необходимость учета расхода жидких, вязких, вязкопластичных и сыпучих продуктов, пара, протекающих через сечение трубопровода. При этом надо иметь данные о физическом состоянии этого продукта: для жидкостей — температуру, вязкость и плотность, для газов и пара, кроме того, и давление. У вязкопластичных продуктов плотность незначительно изменяется от давления (см. гл. 1), которое необходимо учитывать для более точного замера расхода вязкопластичных продуктов.

Расход за бесконечно малый промежуток времени, или мгновенный расход (отношение количества вещества, протекающего за некоторый промежуток времени, к этому промежутку при условии, что значение последнего стремится к нулю), можно выразить формулами: объемный $V_c = dV/dt$; массовый $M_c = dm/dt$.

Если расход не изменяется во времени, то для его определения можно пользоваться соотношением

$$V_c = \frac{V}{\tau_2 - \tau_1} = \frac{V}{\tau} \quad (5.116)$$

или

$$M_c = \frac{m}{\tau_2 - \tau_1} = \frac{m}{\tau}, \quad (5.117)$$

где τ — промежуток времени, которому соответствует количество протекающего вещества V или m .

$$\tau = \tau_2 - \tau_1.$$

Связь между объемным и массовым расходом выражается зависимостью

$$M_c = \rho V_c, \quad (5.118)$$

где ρ — плотность измеряемого вещества.

Приборы, измеряющие расход, называются расходомерами, количество жидкости — счетчиками. К этим терминам необходимо добавлять вещество, для которого приборы предназначены, напри-

мер воды, жира, пара и т. д. Если же данный прибор тарировался для одного вещества, а предполагается измерять другое аналогичное вещество, необходимо получить коэффициент корреляции.

Расходомер может быть снабжен особым механизмом — интегратором, по показателям которого количество измеряемого вещества определяется в какой-либо промежуток времени, а указателем является счетчик, входящий в конструкцию расходомера, показывающий и записывающий расход измеряемого вещества в единицу времени. В зависимости от требуемых условий приборы применяются для стационарных и временных измерений, особенно при исследовании различных технологических процессов.

В мясной промышленности расходомеры являются важным звеном в автоматизации ряда процессов. Создание автоматизированной системы управления качеством хотя бы на таком важном процессе колбасного производства, как приготовление фарша, использование реологических приборов, расходомеров и трубопроводного транспорта, позволит не только улучшить качество готовых изделий, но и сэкономить значительное количество мясного сырья.

Классификация приборов для измерения расхода чрезвычайно сложна из-за большого разнообразия принципов действия этих приборов, конструкции и областей применения.

Общая схема классификации приборов для измерения расхода жидкостей, газа и пара приведена на рис. 5.31. В этой схеме указаны только основные приборы, наиболее широко применяемые при измерении расхода вещества, протекающего в трубопроводах.

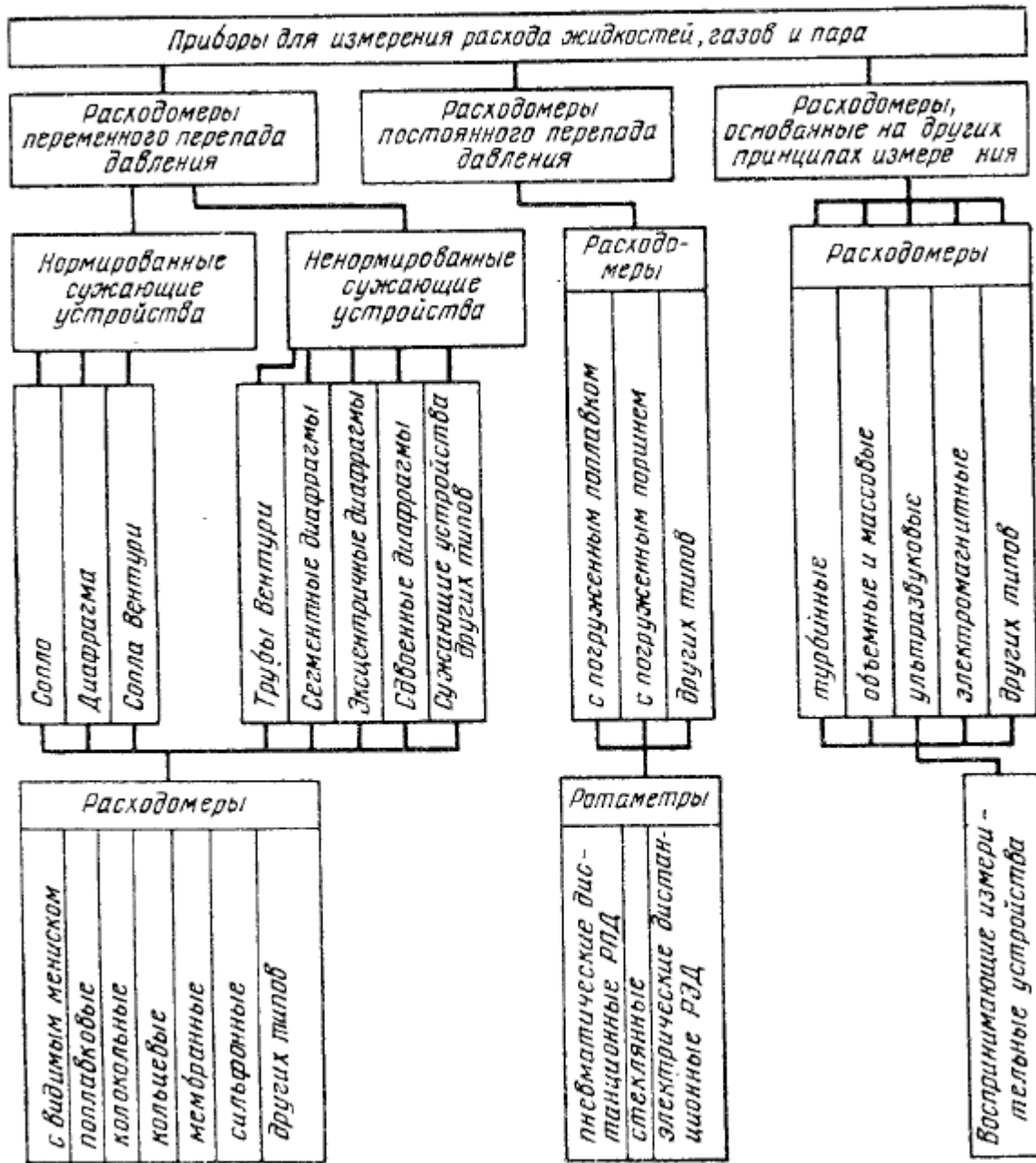


Рис. 5.30. Общая схема классификации расходомеров

Расходомеры переменного перепада давления

Большое распространение из рассмотренных приборов получили расходомеры, работа которых основана на принципе переменного перепада давления. Такой расходомер представляет собой измерительное устройство, состоящее из установленного в трубопроводе сужающего устройства (рис. 5.31) и дифманометра-расходомера.

Дифманометр-расходомер воспринимает перепад давлений, по которому определяют расход. В зависимости от устройства он может показывать или записывать расход, а при помощи интегратора

суммировать количество вещества как в единицах объема, так и в единицах массы.

Классическая труба Вентури состоит из двух участков: плавно сужающегося — сопло и постепенно расширяющегося — диффузор (рис. 5.31, *a*).

При движении жидкости в сужающих устройствах скорость в сопле возрастает, а давление падает, в диффузоре происходит обратное. Возникающий перепад давления замеряется дифманометром или двумя пьезометрами и связан с расходом зависимостью

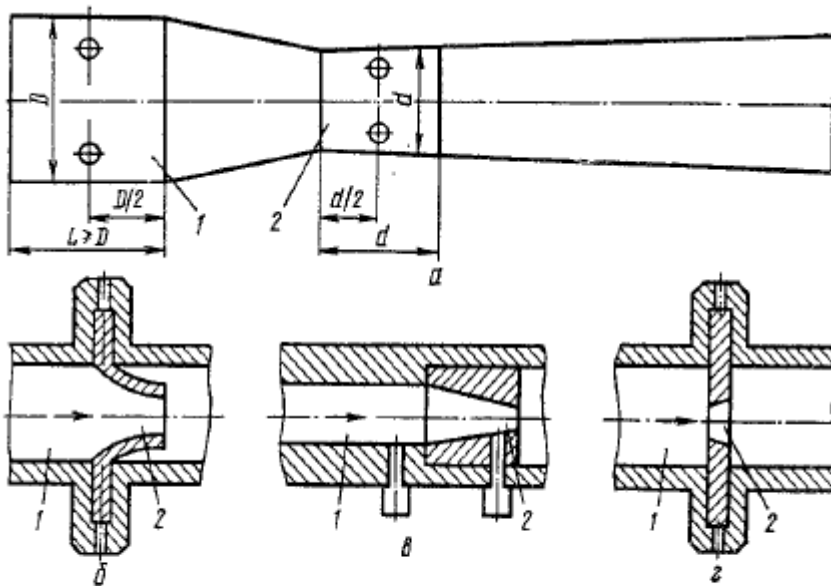


Рис. 5.31. Схемы сужающих устройств:

a — труба Вентури; *b* — сопло, зажатое между фланцами; *в* — сопло, впрыснутое в трубу; *г* — расходомерная диафрагма; 1 — магистральный трубопровод; 2 — место сужения потока

$$V = C\sqrt{\Delta H}, \quad (5.119)$$

где C — постоянный коэффициент для определенного расходомера, зависит от геометрических размеров; ΔH — перепад давлений, м.

$$C = F_2 \sqrt{\frac{2g}{1 + \zeta - (F_2/F_1)}}, \quad (5.120)$$

где F_1, F_2 — площади «живого» сечения перед сужением (равна площади трубопровода) и в самом узком месте потока жидкости, м; g — ускорение свободного падения, м/с²; ζ — коэффициент местного сопротивления самого измерительного устройства.

Коэффициент C более точно получают экспериментально в результате тарировки расходомера. Для получения прямолинейной графической зависимости между расходом и перепадом давления, которая является параболической, рекомендуется откладывать на оси абсцисс квадрат расхода.

Для дроссельного расходомера не является обязательным наличие диффузора, как у водомера Вентури, который может быть выполнен в виде одного сопла, например зажатого между фланцами (рис. 5.31, б) или впрессованного в трубу (рис. 5.31, в). Недостаток этих устройств в том, что расширение за соплом будет происходить самопроизвольно и сопровождаться вихреобразованиями, в результате чего сопротивление в таких соплах больше, чем у сопел с диффузором.

На практике часто используют расходомеры, выполненные в виде диафрагмы (шайбы), которые просты в устройстве и легко изготавливаемы (рис. 5.31, г). При использовании их в промышленности необходимо знать, что вследствие дополнительного сжатия потока наименьшее его сечение (несколько меньше диаметра отверстия диафрагмы) будет находиться на некотором расстоянии от диафрагмы.

Для перечисленных устройств также справедлива формула (5.119), но с некоторыми поправочными коэффициентами, которые для стандартных форм расходомеров можно найти в соответствующих справочниках. Обычно заводом на расходомерных устройствах выбито значение постоянной величины C .

В США фирмой «Даниэл» разработаны диафрагменные фитинги марки «Сениф» (рис. 5.32). Они имеют двухкамерную конструкцию, которая обеспечивает быструю и безопасную замену диафрагмы на напорной линии. В результате систематического контроля и своевременной замены изношенной диафрагмы достигается высокая точность замера. Диафрагменные фитинги выпускают диаметром от $0,05 \cdot K^3$ до 1 м при давлении до $700 \cdot 10^5$ Па с пластинами типа лопаток.

При возможности наличия обводного трубопровода эта фирма разработала диафрагменные держатели марки «Симплекс» (рис. 5.34, а), которые более удобны в эксплуатации и экономичны в обслуживании, чем фитинги. В них используются круглые диафрагменные пластины (шайбы), которые дешевле пластин типа лопаток.

Их можно устанавливать на трубопроводах диаметром от 0,38 до 1,52 м. Уплотнение или диафрагменную шайбу заменяют следующим образом. Направляя пуск продукта по свободному каналу, отключают участок трубопровода, где установлен держатель, снимают прижимную планку и приподнимают уплотнительную планку вместе с диафрагменным держателем и шайбой. Затем производят

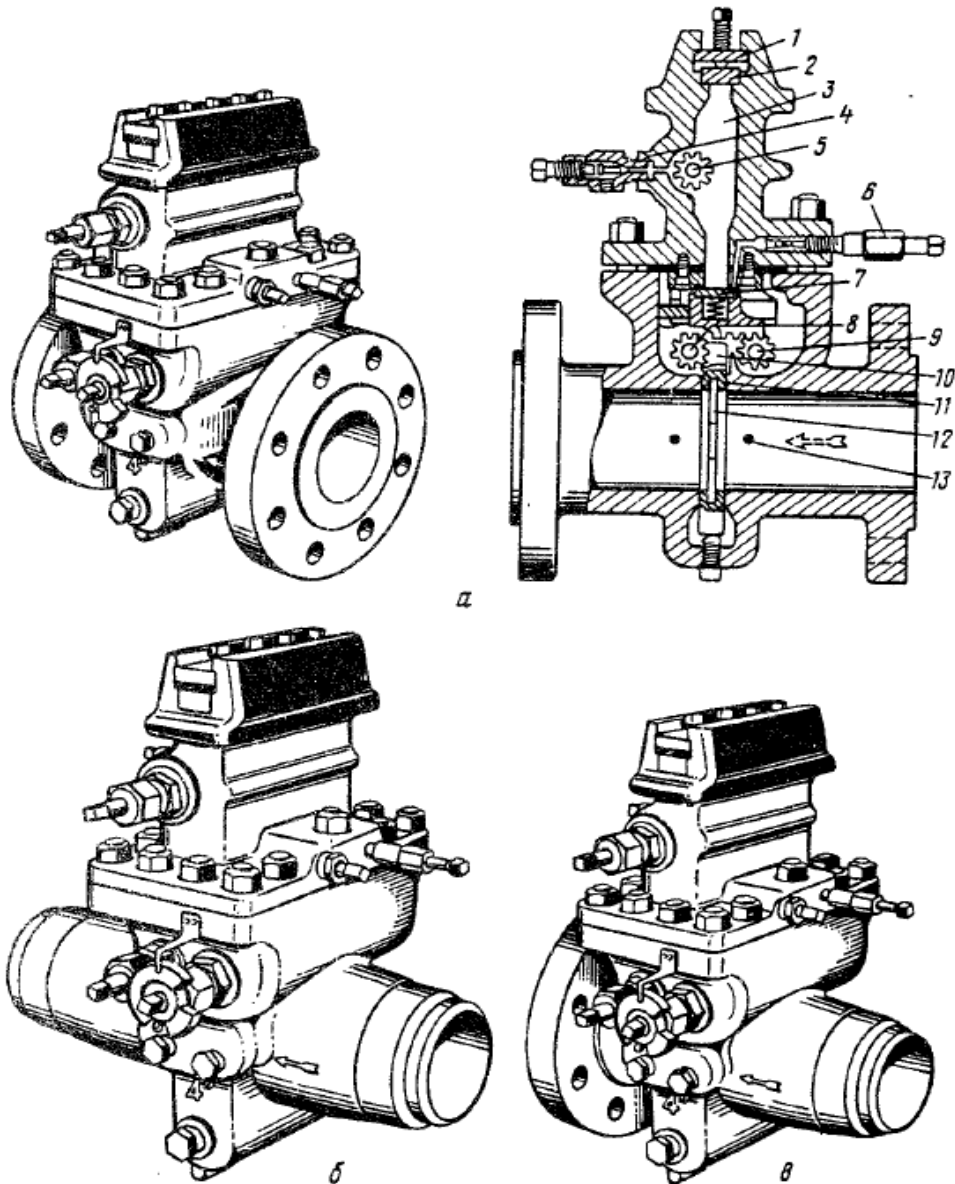


Рис. 5.32. Двухкамерные диафрагменные фитинги с фланцевым (а), сварным (б) и смешанным (фланцево-сварным) соединениями с трубопроводом:

1 — зажимное устройство; 2 — уплотнительный элемент; 3 — верхняя камера; 4 — выпускной клапан; 5 — стержень держателя верхней пластины; 6 — винт для смазки; 7 — золотниковый клапан; 8 — стержень держателя нижней пластины; 9 — держатель пластины (съёмный); 10 — золотниковый клапан работающего стержня; 11 — уплотнение пластины; 12 — пластина измерительной диафрагмы; 13 — отверстия для отбора давления

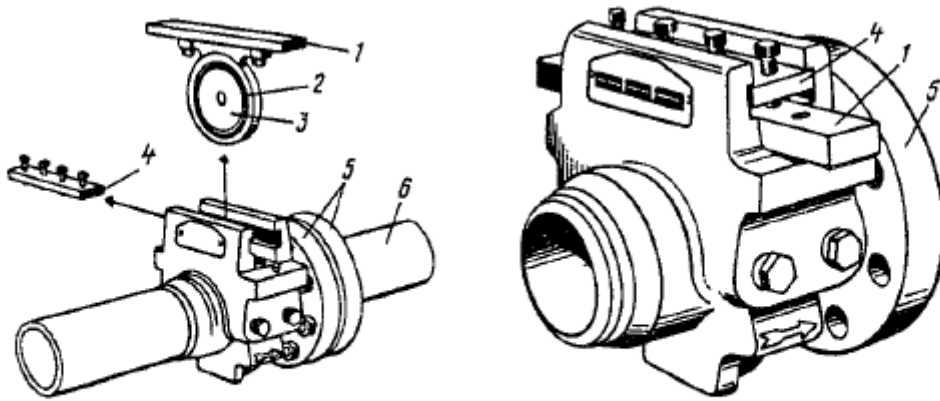


Рис. 5.33. Диафрагменный держатель:

1 — уплотнительная планка; 2 — уплотнение; 3 — диафрагменная шайба; 4 — прижимная пластина с болтами;
5 — фланцы; 6 — трубопровод

нужную замену. Фирма применяет два типа уплотнения для диафрагменных шайб: для некоррозионных жидкостей (ДС) в виде двойного резинового уплотнения и для коррозионных потоков (ТС) — двухсекционное тефлоновое уплотнение, которое выдерживает избыточное давление до $84 \cdot 10^5$ Па за счет того, что в кольце, расположенном по направлению потока, проделан паз, обеспечивающий плотное прилегание уплотнения в гнезде диафрагменного фитинга.

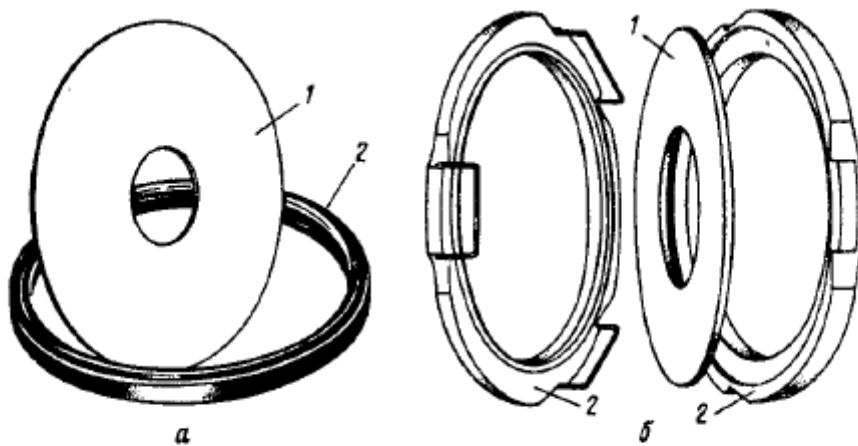


Рис. 5.34. Уплотнение диафрагменных шайб:

а — для некоррозионных жидкостей: 1 — шайба; 2 — резиновое уплотнение;
б — для коррозионных жидкостей: 1 — шайба; 2 — тефлоновое двухсекционное уплотнение

Перепад давления в жидких средах измеряют пьезометрами или дифманометрами. Так, фирма «Даниэл» (США) использует компьютеры для вычисления расхода потока, которые имеют широкий диапазон применения.

Они имеют две программы и высокую точность $+0,25\%$ при цене деления шкалы 25:1. Одна программа используется при малом дав-

лении или при одной измерительной трубе (рис. 5.35), вторая — при высоких давлениях или при двух измерительных трубах (рис. 5.35,б).

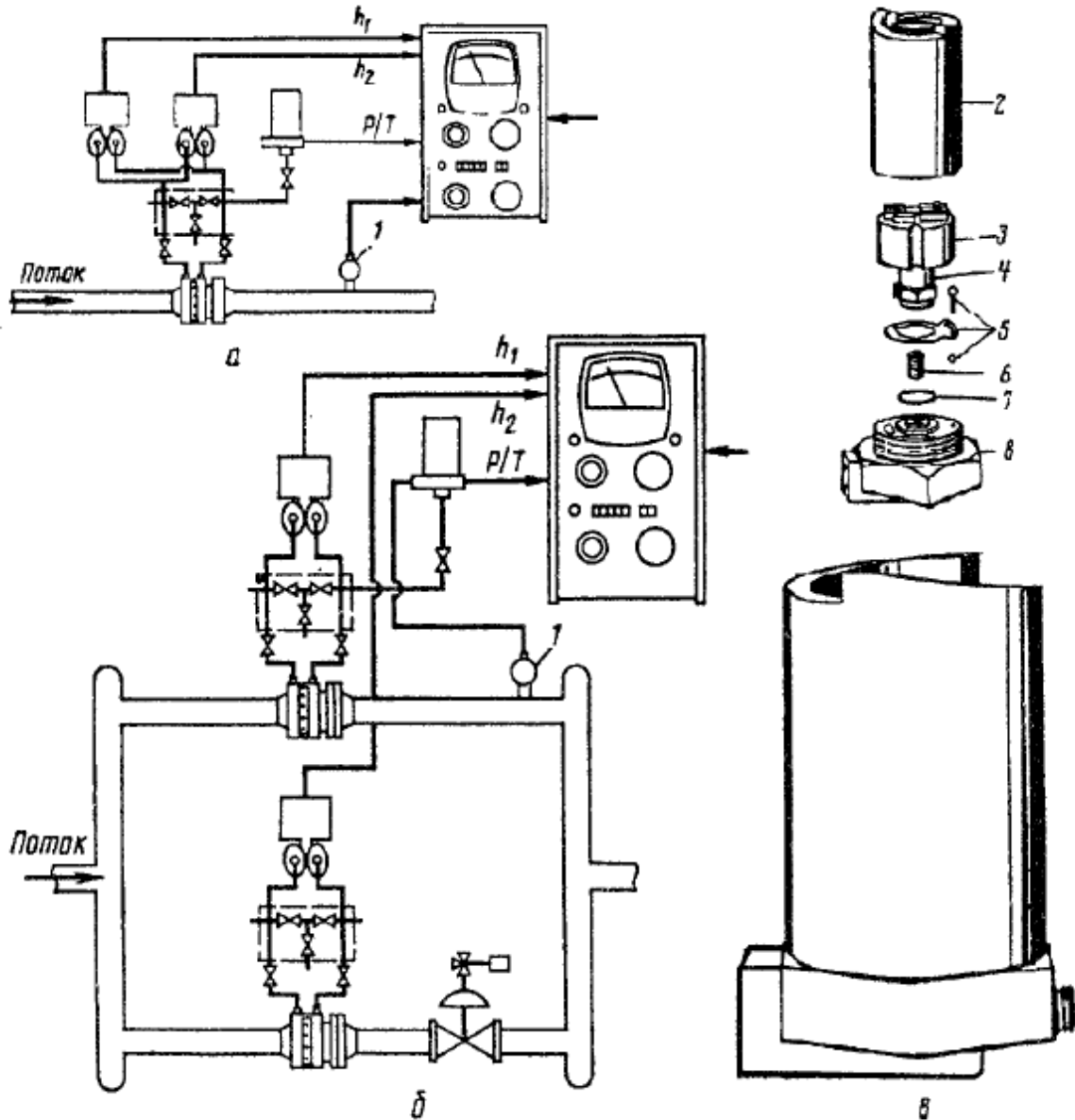


Рис. 5.35. Измерение расхода с помощью диафрагменной пластины или шайбы с использованием компьютера:

а — схема замера с одной измерительной трубой;

б — с двумя измерительными трубами;

в — тензометрический датчик статического давления; *1* — датчик-преобразователь потока жидкости; *2* — крышка; *3* — электронный блок; *4* — тензометрический элемент; *5* — фиксатор; *6* — полый штифт; *7* — кольцо; *8* — корпус

В первом случае для измерения параметров газа в широких пределах используют два датчика дифференциального (перепада) давления (модель 1151). Они имеют разные диапазоны измерения давления

первый от 0 до $51 \cdot 10^2$ Па, второй от 0 до $51 \cdot 10^3$ Па. Входы преобразователей соединены параллельно и подсоединены к тензометрическим датчикам (модель 20) давления (рис. 5.35, в) до и после диафрагменной пластины. Компьютер автоматически выбирает истинный сигнал преобразователя (разницу показаний) для необходимых вычислений.

Во втором случае дифференциальные датчики преобразователя давления работают параллельно и в компьютере их показания усредняются перед вычислением функции квадратного корня.

Однако при движении вязких мясопродуктов возможны пульсации. Если величина пульсации соизмерима с величиной перепада давления, то показания прибора будут недостоверны.

Правила монтажа диафрагм и соединительных линий следующие:

10. диафрагмы можно устанавливать в горизонтальных, вертикальных и наклонных трубопроводах;
11. диафрагмы должны устанавливаться на прямом участке постоянного диаметра трубопровода, длина которого до и после них должна соответствовать нормам (несоблюдение этих условий может привести к ошибкам в измерениях);
12. непосредственно перед диафрагмой не должно быть выступающих прокладок, грубых сварных швов, иногда остающихся после приварки фланцев, и т. п.;
13. центр диафрагмы должен строго совпадать с осью трубопровода;
14. внутренний диаметр камеры диафрагмы должен быть равен внутреннему диаметру трубопровода;
15. цилиндрическая расточка отверстия диафрагмы должна быть обращена навстречу потоку, а коническая — в сторону выхода потока;
16. соединительные трубки, идущие от диафрагмы к вторичному прибору, должны прокладываться в местах, доступных для обслуживания и контроля, иметь плавные изгибы и быть герметичными;
17. при горизонтальном монтаже соединительных трубок необходимо выдерживать уклон не менее 1:10, который обеспечит отвод воздуха при измерении расхода пара или жидкости;
18. во избежание запаздывания показаний соединительные трубки должны иметь диаметр не менее $9 \cdot 10^{-3}$ м, при измерении расхо-

да вязких жидкостей диаметр должен быть больше; длина трубок от диафрагмы до вторичного прибора должна быть не более 50 м;

19. после монтажа соединительных трубок их испытывают на герметичность воздухом под давлением $(0,4...0,5) \cdot 10^5$ Па; если в течение 600 с давление упадет не более чем на 3 % от начального, то герметичность линии считается удовлетворительной.

Применение расходомеров переменного перепада давления для измерения расхода мясопродуктов ограничено, так как при перекачивании дисперсных систем (бульон с белковыми частицами, кровь и проч.) частицы будут засорять отверстие пьезометра, а в случае перекачивания жидкостей при повышенной температуре (расплавленный жир, бульон и др.) они будут остывать в пьезометре, что повлечет за собой либо изменение объемной массы, либо закупорку отверстия. Последнее будет происходить и при транспортировании вязко-пластичных (колбасные и мясные фарши, паштеты и т. д.) продуктов. Применение расходомеров, основанных на создании перепада давления, возможно в том случае, если давление до и после прибора измеряется датчиками, чувствительный орган которых соприкасается непосредственно с продуктом. К таким датчикам относятся мембранные, принцип работы которых основан на измерении величины упругой деформации мембраны механическим, тензометрическим, потенциометрическим или каким-либо другим способом.

Расходомеры постоянного перепада давления

В расходомерах, работающих по принципу постоянного перепада давления, измеряемое вещество протекает через прибор, воздействует на находящийся в нем подвижный элемент (поплавок, поршень, крыло и т. п.), перемещает его, изменяя при этом площадь, через которую проходит вещество между элементом и стенками прибора, в зависимости от расхода. При протекании вещества перепад давления как перед подвижным элементом прибора, так и за ним остается постоянным. Величина перемещения подвижного элемента является мерой расхода.

Из расходомеров, работающих по данному принципу, наибольшее распространение в различных отраслях промышленности получили ротаметры. Они имеют вертикальную коническую труб-

ку, расширяющуюся вверх по направлению потока жидкости, с центральным направляющим стержнем, на котором помещен поплавок. Скоростной напор поднимает поплавок до точки равновесия массы поплавка в жидкости и силы сопротивления, которая зависит от скорости жидкости в данном сечении.

Ротаметры обладают рядом достоинств. Они просты по конструкции, имеют значительный диапазон измерения и почти равномерную шкалу отсчета; применимы для вязких, но освобожденных от крупных частиц жидкостей; показания можно снимать визуально либо записывать прибором.

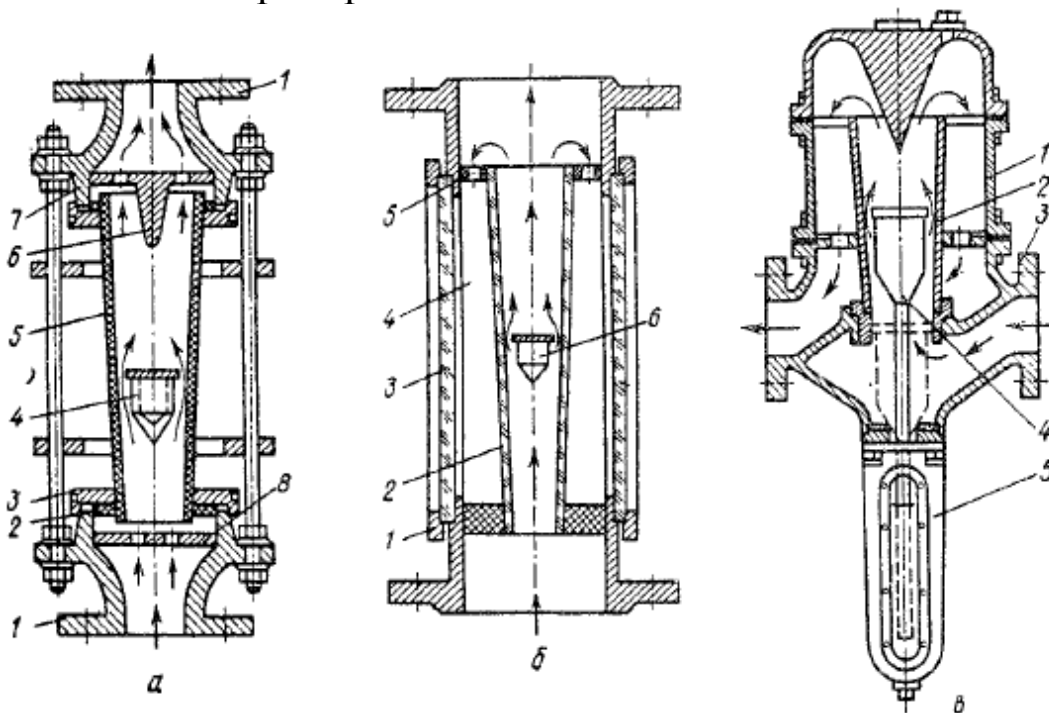


Рис. 5.36. Ротаметры:

- а* — типовой: 1 — патрубки; 2 — сальниковое уплотнение; 3 — накидные гайки; 4 — поплавок; 5 — стеклянная коническая трубка; б — упор; 7 — стержни с кольцами жесткости; 8 — седло;
- б* — для повышенных давлений: 1 — металлический корпус; 2 — стеклянная трубка; 3 — толстостенное стекло; 4 — полость противодавления; 5 — отверстия; 6 — поплавок;
- в* — для горизонтального трубопровода: 1 — кожух с крышкой и пробкой для удаления воздуха; 2 — металлическая трубка; 3 — корпус вентильного типа; 4 — поплавок с проволочным хвостовиком и диском-указателем; 5 — стакан со стеклом и пробкой для удаления жидкости

Ротаметр (рис. 5.36, *а*) состоит из стеклянной конической трубки, укрепленной в патрубках с помощью сальниковых уплотнений и накидных гаек. Для механической разгрузки стекла патрубки связаны между собой болтовыми стержнями. Длинные ротаметры (до 0,64 м и выше) укрепляются кольцами жесткости на стержнях посредством стопорных винтов. Седло и упор является ограничителями хода поплавка.

Для повышения предельно допустимого давления в ротаметре применяют разгруженную стеклянную трубку (рис. 5.36, б), которая помещена в металлический корпус с двумя плоскими толсто-стенными стеклами. В полости, окружающей стеклянную коническую трубку, измеряемой средой, поступающей через отверстия, создается противодействие.

Расход жидкостей с повышенным давлением измеряют с помощью ротаметров с металлической трубкой и с верхним или нижним хвостовиком-указателем (рис. 5.36, в). Он состоит из корпуса вентильного типа, конусной металлической трубки, поплавка, снабженного проволочным хвостовиком с диском-указателем, который движется в стакане. Сверху ротаметр закрыт кожухом с крышкой. Для удаления воздуха из прибора и жидкости из стакана имеются специальные пробки. Ротаметр работает следующим образом. Жидкость поступает в корпус справа налево, поднимается по корпусной трубке и, переливаясь через нее, выходит из корпуса. Преимущества данного ротаметра в том, что его устанавливают на горизонтальном трубопроводе, что позволяет гораздо проще использовать индукционный, фотоэлектрический, магнитный и другие методы для дистанционной передачи показаний.

Ротаметры применяют для измерения небольших расходов жидкостей и газов, имеющих незначительное давление.

Расходомеры поплавковые и поршневые применяют при более значительных расходах и давлении, чем ротаметры. Они отличаются тем, что ход поплавка или поршня во много раз меньше, чем у ротаметров, и отсутствуют стеклянные части, обеспечивая надежность приборов и возможность их использования в пищевой промышленности.

Поплавковые расходомеры (рис. 5.37, а, б) отличаются в основном формой проточной части, которые можно условно разбить на две группы: расходомеры первой группы имеют конический поплавок, перемещающийся в круглом цилиндрическом отверстии высотой 2...3 мм; такую поплавковую пару имеют расходомеры ПИР и РП с пневматической передачей, а также РЭ с электропередачей; расходомеры второй группы имеют различной формы (цилиндрической, дисковой) поплавок, перемещающийся в коническом отверстии. С такой парой изготавливают расходомеры РЭ и РП на малые расходы.

Расходомеры ПЭ, имеющие дифференциально трансформаторную передачу, и РП с пневматической передачей выпускают различной производительности: от 0,025 до 63 м³/ч для воды.

Расходомеры, изображенные на рис. 5.37, д имеют тарельчатые поплавки диаметром 6 и 18 мм, перемещающиеся в коротких трубках, обеспечивая следующий максимальный расход по воде: 0,025; 0,04; 0,063; 0,1; 0,16; 0,25; 0,4 м³/ч. Возрастание максимального расхода достигается увеличением угла наклона конической трубки.

На рис. 5.37, д представлены модели с коническими поплавками с верхним диаметром 40 и 100 мм, перемещающиеся в цилиндрическом отверстии, обеспечивая восемь средних пределов расхода: 0,63; 1,0; 1,6; 2,5; 4,0; 6,3; 10; 16 м³/ч. С увеличением предела измерения угол наклона конуса поплавка возрастает.

Расходомер, изображенный на рис. 5.37, е, пятая модель, обеспечивает три больших расхода: 25; 40; 63 м³/ч. Она имеет кольцевой цилин-дрический поплавок диаметром 151 мм, перемещающийся в коническом отверстии, которое имеет в центре необходимо обеспечить прямой участок трубопровода одинакового диаметра с отверстиями расходомера — не менее 0,5 м перед ним и 0,4 м после него; для удобства проведения ремонта расходомера рекомендуется устанавливать его в доступном месте и на высоте не менее 0,5 м от пола.

Расходомеры с поворотной лопастью основаны на зависимости измерения угла поворота от расхода жидкости в трубопроводе. Основным достоинством этих расходомеров является большой диапазон измерений (до 15:1, а иногда и выше). Последнее время приборы снабжают электрическими или пневматическими преобразователями величины угла поворота лопасти. Имеются приборы с малым углом поворота лопасти, где замеряют уравнивающее динамическое давление потока.

Основным недостатком данного типа расходомеров является использование перекачиваемого продукта постоянной плотности; и вязкости. При изменении этих величин необходимо производить пересчет градуировки или новую тарировку прибора.

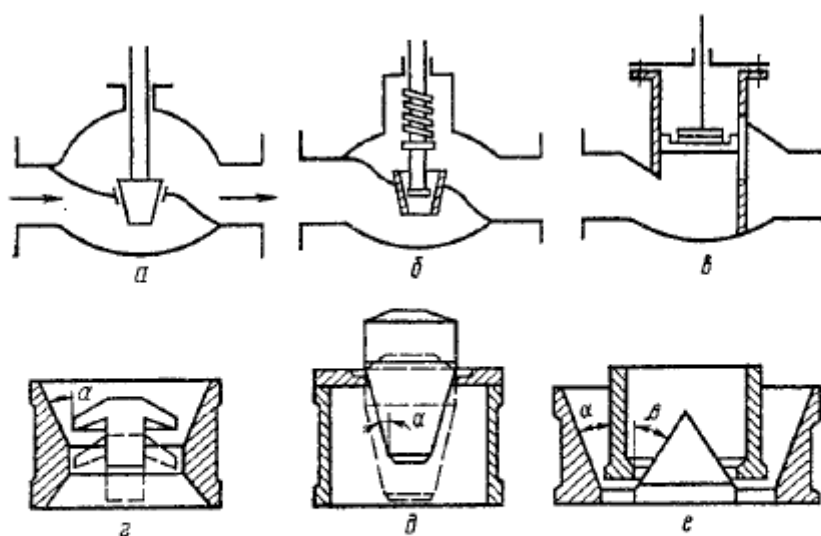


Рис. 5.37. Принципиальные схемы поплавковых и поршневых расходомеров и конструкции поплавковых пар:
a, б — поплавковые расходомеры; *в* — поршневые расходомеры; *г, д, е* — поплавковые пары

Турбинные расходомеры

Турбинные, или скоростные, расходомеры основаны на суммировании частоты вращения рабочего органа, помещенного в потоке, за определенный промежуток времени.

Скорость вращения этого органа пропорциональна средней скорости протекающей жидкости, следовательно, и расходу. Если вал турбинки или другого рабочего органа расходомера связать через редуктор со счетным механизмом, то получим измеритель суммарного расхода (рис. 5.38). Погрешность измерения этих расходомеров составляет $\pm 2\%$. Такие приборы широко применяют в промышленности. В последнее время получили распространение тахометрические расходомеры, которые имеют дополнительно устройство для измерения скорости вращения рабочего органа. Они состоят из двух основных частей: тахометрического преобразователя скорости вращения вала в частоту электрических импульсов и счетчика для измерения частоты и количества импульсов. Погрешность измерения этих расходомеров составляет $0,05 \dots 1\%$.

Турбинные расходомеры в отличие от диафрагменных характеризуются малыми потерями напора (от $0,005$ до $0,3\%$ рабочего давления среды). Это вызывает уменьшение осевых нагрузок на

подшипники, а, следовательно, и увеличивает срок службы расходомера.

Точность измерения расхода среды турбинными расходомерами зависит от его пропорциональности средней аксиальной скорости течения потока, которая должна быть пропорциональна угловой скорости вращения турбинки. В зависимости от того, насколько строго выдерживаются эти положения, и будет зависеть точность измерения расхода. Так, площадь поперечного сечения потока через турбинку не всегда остается постоянной во времени вследствие присутствия в бульонах, рассолах и других измеряемых потоках твердых и загрязняющих веществ, а также состояния поверхности труб и т. д.

Средняя аксиальная скорость измеряемого потока не строго пропорциональна угловой скорости турбинки ввиду влияния на это соотношении инерции ротора, угла наклона лопастей по отношению к потоку, формы лопастей, силы торможения ротора и т. д.

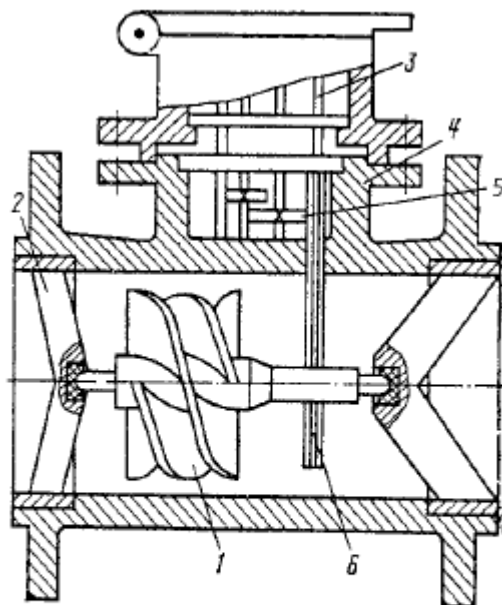


Рис. 5.38. Турбинный измеритель суммарного расхода:

1 — турбинка; 2 — струевыпрямитель; 3 — счетный механизм; 4 — корпус; 5 — передаточный механизм; 6 — червячная пара

Вращающий момент ротора уравновешивается моментами торможения

$$M_{вр} = M_{тр} + M_{в} + M_{м.т} + M_{ин}, \quad (5.121)$$

$$\omega_f \varphi d_p l_p n_p = f_p d_p l_p m_p S_p + \omega_f \varphi D_p \Delta_p l_p n_p x + D_p p_m y + D_p m_p (\omega_n - \omega_y), \quad (5.122)$$

где $M_{вр}$ — вращающий момент ротора; $M_{тр}$, $M_{в}$ — тормозящий момент механического и вязкостного трения; $M_{м.т}$ — момент магнитного торможения; $M_{ин}$ — инерционный момент ротора; ω_f — средняя по сечению скорость текущей среды; φ — угол наклона лопастей ротора к оси потока; d_p , l_p , n_p , m_p — диаметр, длина, число лопастей и масса ротора; f_p — коэффициент трения ротора в опорах; S_p — уравновешенность ротора (разбаланс ротора, качество прогонки опор); D_p — диаметр поверхности опоры ротора; Δ_p — шероховатость поверхности ротора; x — расстояние между ферромагнитным материалом ротора и катушкой связи; p_m — магнитная сила взаимодействия между катушкой связи и ротором; y — расстояние между ободом ротора и корпусом; ω_n , ω_y — скорость ротора соответственно при неустановившемся и установившемся режиме течения.

Геометрические размеры ротора для определенного расхода являются постоянными величинами, не изменяющимися в процессе его работы. К переменным величинам можно отнести угол наклона лопастей, который может измениться за счет воздействия, например, абразивных или других твердых веществ в измеряемой среде; уравновешенность ротора, которая может быть нарушена воздействием твердых частиц или коррозии; изменения профиля скоростей потока, на который воздействуют любые неровности и нарушения геометрии проточной части расходомера (изгибы, переходники, неточность крепления фланцев, наросты на стенках корпуса). Поэтому для более точной работы расходомера перед ним необходим ровный участок трубопровода не менее 10 диаметров трубопровода, а после него — 5. Кроме этого, на точность замера расхода влияют завихрения текущей среды, которые усредняются установкой струевыпускателя перед турбинным расходомером, конструкции которых будут рассмотрены в дальнейшем.

На надежность работы и точность замера влияет трение в опорах ротора и подшипниках, которое зависит от чистоты поверхности опор вращения и смазывающей способности измеряемой среды.

Для оценки качества расходомеров в номенклатуру показателей входят следующие основные характеристики: допускаемая погрешность и диапазон измерения, допускаемая потеря напора, диапазоны рабочей температуры и давления измеряемой среды, габариты, инерционность и др. Диапазон измерения оценивается отно-

шением максимального значения расхода в рабочем диапазоне измерения преобразователя к минимальному значению и составляет от 1:10 до 1:100.

Турбинные расходомеры широко используют для измерения расхода различных жидкостей и реже газов, так как при этом необходимо учитывать влияние на замеряемый объем давления и температуры, которые значительно изменяют плотность. Ввиду того что параметры газа (давление, температура, плотность, состав) не постоянны, для повышения точности замера производят корреляцию расхода по фактическим величинам с использованием компьютеров. Фирма «Даниэл» (США) выпускает турбинные расходомеры как для жидкостей (рис. 5.39, *а, б*), так и для газов (рис. 5.39, *в*). Для замера больших расходов жидкостей применяют расходомеры РТ (рис. 5.39, *а*) с диаметром трубопроводов от 63,5-1 (Г³ до 610-1СГ³ м. При малых расходах жидкости используют расходомеры СК (см. рис. 5.39, *в*) с диаметром трубопроводов от 16,5 • 10⁻³ до 50 • КГ³ м. Эти расходомеры снабжены электрическим датчиком, состоящим из катушки и усилителя, сигнал с которого подается на вторичный прибор (сумматор, компьютер и др.) для расчета, изображения или записи.

В цехах с повышенной влажностью и электроопасностью фирма «Даниэл» предлагает использовать для турбинных расходомеров сумматор с магнитным приводом и питанием от батарей (рис. 5.39, *г*). Прибор во взрывобезопасном и защищенном от атмосферного воздействия корпусе присоединяют непосредственно к катушке датчика расходомера. При необходимости получения показаний небольшой магнит соприкасается с лицевой поверхностью счетчика, в результате чего магнитный переключатель возбуждает светоизлучающие диоды. Общее время освещения для получения показаний составляет 15 с, после чего необходимо повторное возбуждение с помощью магнита. Этот метод обеспечивает защиту от умышленного повреждения.

Используются также обычные сумматоры (модель 1863) с температурным компенсатором (рис. 5.39, *д*). Объемы протекающего потока при соответствующей температуре и скорректированного при стандартной температуре воспроизводятся на двух отдельных цифровых счетчиках в любых необходимых технических единицах. Они позволяют на значительных расстояниях от места замера реги-

стрировать и анализировать показания. Более дорогостоящим вторичным прибором для турбинных расходомеров является компьютер (модель 2281), который обрабатывает данные для газа и жидкостей и компенсирует влияния давления, температуры, сверхсжимаемости и других переменных величин процесса. Данные потока могут быть изображены в технических единицах. Прибор модели 2239 (фирма «Даниэл») для расходомеров РТ позволяет замерять не только расход, но и общее количество протекающей жидкости.

Фирма «Зингер» (США) выпускает турбинные газовые расходомеры (рис. 5.39, *e*), у которых калиброванная измерительная гильза обеспечивает взаимозаменяемость капсул рабочих и контрольных расходомеров (того же типоразмера и рассчитанных на то же рабочее давление) без его демонтажа с трубопровода. В этих расходомерах сумматор расхода вмонтирован непосредственно в расходомер.

Тахометрические турбинные расходомеры с электрическим преобразователем имеют повышенную точность измерения, погрешность которых составляет $\pm 0,5\%$, и повышенную надежность. Их применяют для измерения самых различных жидкостей и газов (за исключением сильновязких и вязко-пластичных).

Турбинные расходомеры делятся на две группы — аксиальные (см. рис. 5.38) и тангенциальные: у аксиальных ось вращения совпадает с направлением потока, а у тангенциальных она перпендикулярна. Основным рабочим органом у этих расходомеров является турбинка. Различные конструкции турбинок показаны на рис. 5.40. При малых диаметрах применяют аксиальные турбинки с винтовыми лопастями (рис. 5.40, *a*), имеющие обычно перед собой струевыпрямитель, при больших диаметрах — с лопастями, укрепленными на ободке, который соединяется со ступицей, диском или ребрами (рис. 5.40, *b*). Тангенциальные турбинки в основном отличаются характером подвода жидкости в виде одной общей струи (рис. 5.40, *в, г*) или же в виде нескольких отдельных струй, поступающих тангенциально со всех сторон (рис. 5.40, *д*). вязкости предложен ряд средств. Турбинный расходомер (см. рис. 5.41, *a*) рекомендуют для измерения сильновязких жидкостей, содержащих твердые включения, который исключает влияние вязкости, увеличивает точность измерения и повышает надежность. С этой целью снаружи измерительной турбины по всей ее длине установлен промежуточный ра-

диальный струенаправляющий аппарат. Для уменьшения потери напора входная часть струенаправляющего аппарата имеет винтовую линию с переменным ходом. Измеряемая жидкость, проходя через входной струенаправляющий аппарат, приводит во вращение измерительную турбину. Промежуточный радиальный струенаправляющий аппарат исключает влияние пограничного слоя на наружную радиальную поверхность турбины, обеспечивает равномерное распределение поля скоростей вращения в области измерительной части прибора.

Компенсаторы вязкости (см. рис. 5.41, б, в, г) для крыльчатотажо-метрических расходомеров выполнены в виде плоских или профилированных пластин или отрезков труб, установленных неподвижно в корпусе расходомера в сечении установки ротора. В основном применяют компенсаторы вязкости, связанные с вращающимися элементами ротора, что усложняет конструкцию расходомера. Компенсатор представляет собой набор пластин, установленных внутри корпуса расходомера, имеющего чувствительный элемент — турбинку и тахометрическое регистрирующее устройство, например магнитно-индукционного типа. Пластины, образующие компенсатор, ориентированы вдоль оси потока. На их поверхностях возникает пограничный слой. Чем больше пограничный слой, тем быстрее при прочих равных условиях вращается ротор расходомера. При изменении вязкости жидкости одновременно изменяется и коэффициент вязкого трения между ротором расходомера и толщиной пограничного слоя.

Подбором периметра поперечного сечения компенсатора и длины его участка, расположенного перед ротором, достигается устранение влияния вязкости потока на скорость его вращения.

При необходимости увеличения площади поверхности компенсатора пластинки могут быть профилированными, например в виде гофра, или заменены на отрезки труб (см. рис. 5.41, г).

Правила установки и обслуживания турбинных или скоростных расходомеров следующие:

20. тип и калибр расходомера выбирают по расходу, а не по диаметру трубопровода: при расходе выше максимально допустимого для данного калибра расходомера происходит быстрый износ прибора вследствие большой скорости вращения турбинки, при расхо-

де меньше минимально допустимого — к значительным погрешностям замера;

21. при установке расходомера в систему необходимо обеспечить со стороны входа жидкости прямой участок длиной не менее 10 диаметров трубопровода;

22. для правильной работы расходомера трубопровод, где он установлен, должен быть при работе полностью заполнен жидкостью;

23. расходомеры с крыльчатой турбинкой можно устанавливать только на горизонтальных трубопроводах, а со спиральной — на горизонтальных и вертикальных трубопроводах при направлении потока жидкости снизу вверх;

24. при использовании расходомера с крыльчатой турбинкой для замера засоренной жидкости перед прибором необходимо устанавливать дополнительный фильтр;

25. при монтаже расходомеров калибром до 0,08 м рекомендуется иметь обводную линию для обеспечения снятия прибора без нарушения эксплуатации трубопровода;

26. необходимо регулярно один-два раза в год осматривать и очищать водомеры, находящиеся в эксплуатации.

Объемные и массовые расходомеры

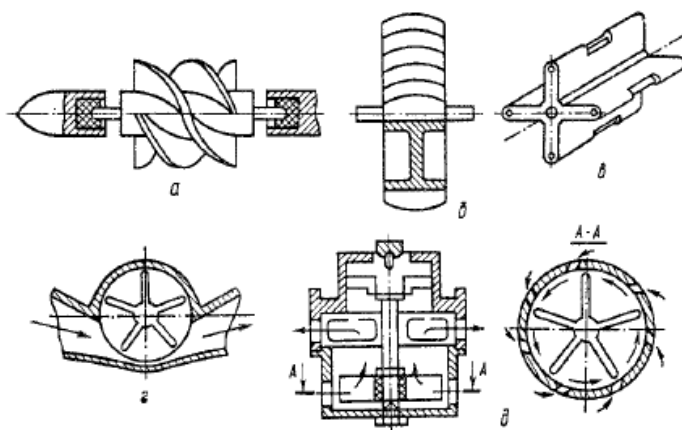


Рис. 5.40. Турбинки расходомеров:

a, б — аксиальные при малом и большом диаметре; *в* — тангенциальная со светоотражательными пластинками; *г* — тангенциальная в однострунных счетчиках воды; *д* — тангенциальная в многоструйных счетчиках воды

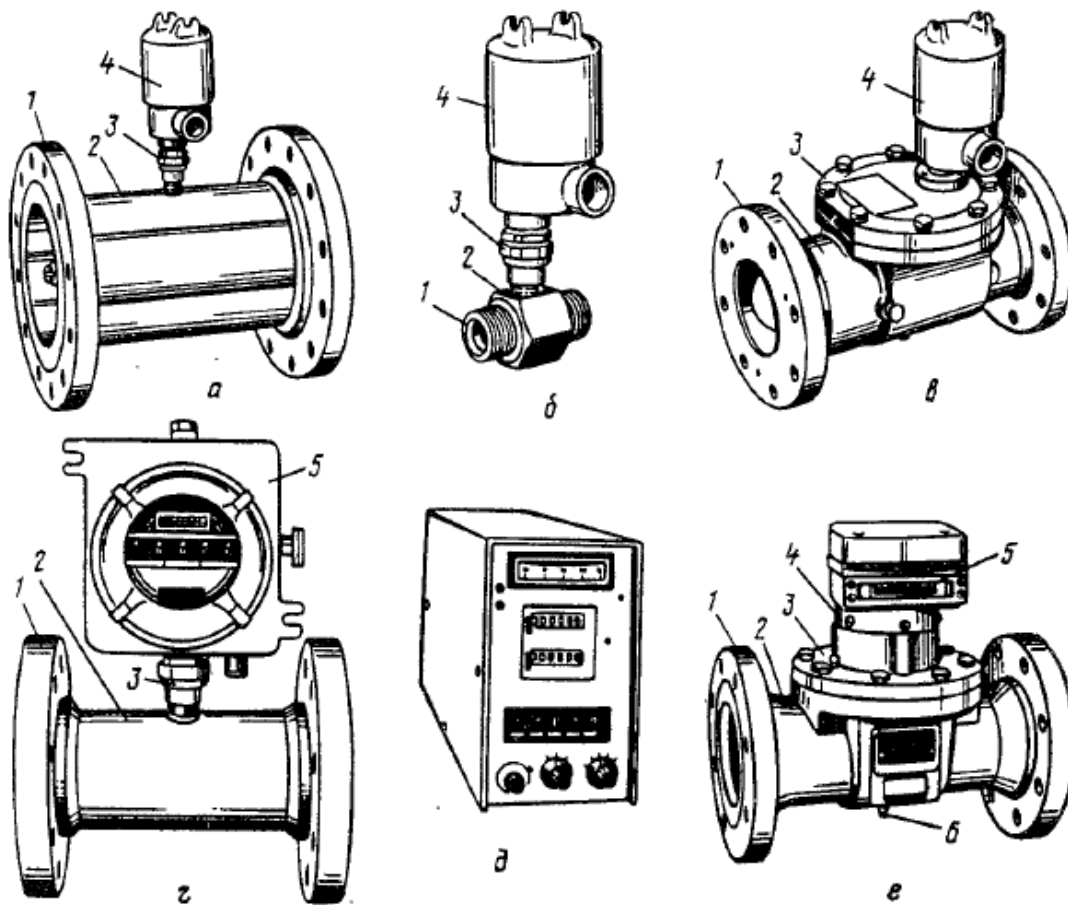


Рис. 5.39. Турбинные расходомеры с датчиками:

а, б, в — электрическими; *в, е* — электромагнитными;

1 — фланец или резьбовое соединение; *2* — корпус; *3* — катушка электрического или электромагнитного датчика; *4* — усилитель датчика; *5* — вторичный прибор (сумматор); *б* — ниппель для смазки; *д* — регистрирующий блок

Объемные (камерные) и массовые расходомеры занимают основное место среди приборов для измерения количества жидкости. Достоинствами рассматриваемых приборов являются высокая точность и большой диапазон измерения. В объемных расходомерах поток жидкости вращает легкий ротор эксцентриковолопастного, кулачкового мотора (обращенного насоса). Частота вращения подсчитывается суммирующим устройством, отградуированным на единицу объема жидкости. При необходимости для измерения массового расхода их снабжают дополнительным устройством, например плотномером, и необходимой счетно-решающей схемой.

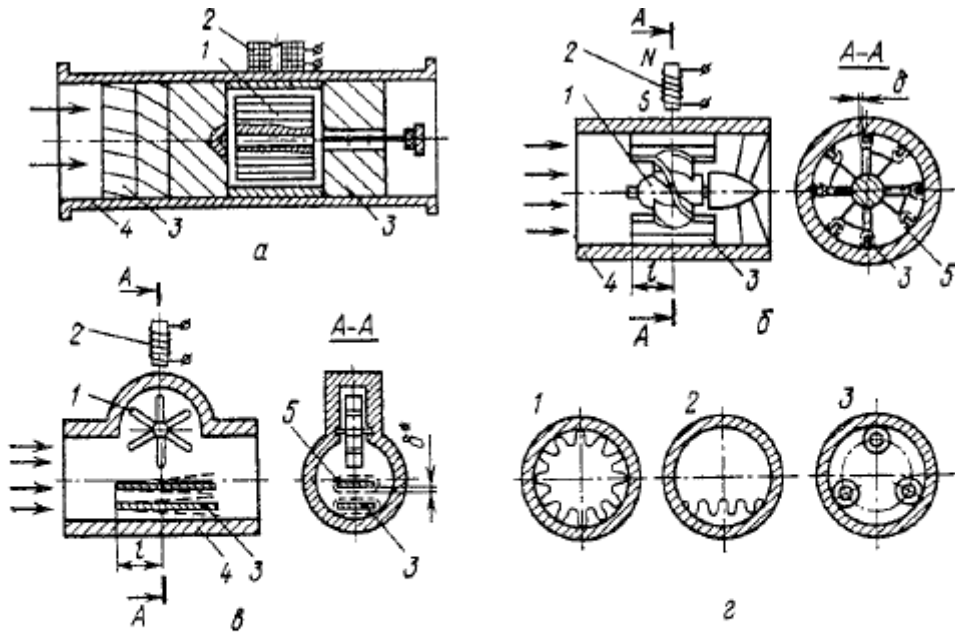


Рис. 5.41. Схемы турбинных аксиальных и тангенциальных расходомеров с различными компенсаторами вязкости:

a, б — аксиальные; *в* — тангенциальные; 1 — турбинка; 2 — регистрирующий узел; 3 — компенсатор; 4 — корпус; 5 — пограничный слой;
г — пластины компенсатора: 1, 2 — пластины выполнены в виде гофра; 3 — в виде отрезков труб

Почти у всех расходомеров данного типа основной рабочий орган движется непрерывно со скоростью, пропорциональной объёмному расходу.

Объёмные расходомеры (счетчики) можно разбить на две группы: с движущимися разделительными элементами и без них. Расходомеры и счетчики без движущегося разделительного элемента состоят из одной или нескольких мерных камер, которые последовательно заполняются и опорожняются. К ним можно отнести массовый — гравиметрический (рис. 5.42, *a*), объёмные — опрокидывающиеся (рис. 5.42, *б*), барабанные (рис. 5.42, *г*) и другие расходомеры.

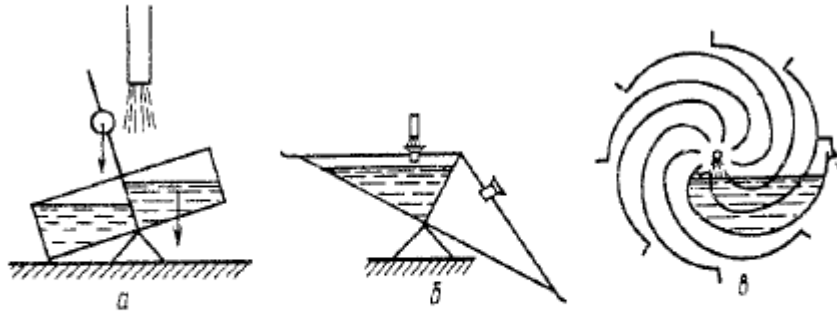


Рис. 5.42. Объемные расходомеры и счетчики без движущегося разделительного элемента:

a — опрокидывающийся гравиметрический; *б* — опрокидывающийся объемный;
в — барабанный для жидкости

Рис. 5.42. Объемные расходомеры и счетчики без движущегося разделительного элемента:

a — опрокидывающийся гравиметрический; *б* — опрокидывающийся объемный; *в* — барабанный для жидкости

Продукт, жидкость или газ отмеряются с помощью непрерывно движущихся одного или нескольких разделительных элементов (поршень, диск, ротор, ковш, овалы, шестерни и т. д.) расходомеров и счетчиков, расположенных в жесткой камере. К ним можно отнести поршневые (рис. 5.43, *a*), роторные с различным профилем: восьмеркообразные (рис. 5.43, *б*) и трапецеидальные (рис. 5.43, *в*), а также зубчатые с овальными (рис. 5.44) и другими шестернями, ковшовые (рис. 5.43, *г*), кольцевые (рис. 5.43, *д*) и дисковые (рис. 5.43, *е*). Наиболее точными среди рассматриваемых объемных приборов являются серийно изготавливаемые счетчики жидкости с овальными шестернями. Они имеют класс 0,5, несмотря на механическую связь со счетным механизмом. Их применяют для измерения вязких и высоковязких жидкостей. В мясной промышленности их можно использовать при замере расхода крови, расплавленного жира и бульона, суспензий, а также фарша для сосисок и сарделек (см. рис. 5.44). Принцип работы этих счетчиков заключается в следующем. В корпусе прибора расположены две овалы, находящиеся в непрерывном зубчатом зацеплении и обкатывающие друг друга.

Со стороны входа жидкости на шестерни действует давление, а выхода — разрежение за счет расхода жидкости потребителем. Разность давлений в трубопроводе до и после прибора является движущей силой, которая и вращает шестерни. В различные перио-

ды вращения ведущая шестерня меняется. На рис. 5.44, а видно, что верхняя шестерня является ведущей и имеет меньший радиус в точке зацепления, а нижняя шестерня — ведомой. На рис. 5.44, б, наоборот, ведущей является нижняя шестерня. Каждая из шестерен за пол-оборота отсекает и вытесняет определенный объем жидкости, равный одной четверти, а за полный оборот — половину общего объема измерительной камеры. За один оборот обе шестерни вытесняют жидкости в количестве, равном объему измерительной камеры. Корпус счетчика имеет два патрубка с фланцами для присоединения к трубопроводу. На корпусе имеется стрелка, указывающая направление потока жидкости. Сетчатые фильтры, устанавливаемые перед входом и выходом жидкости из измерительной камеры, предохраняют шестерни счетчика от попадания в них твердых частиц, которые смогли бы привести к поломке прибора. Погрешность измерений при соблюдении условий градуировки составляет +5%.

Счетчики с овальными шестернями выпускают на 4 диапазона вязкости с различными пределами измерения и различных калибров (табл. 5.17).

Таблица 5.17

Характеристики счетчиков с овальными шестернями по расходу

Диаметр условного прохода $d \cdot 10^3, \text{ м}$	Расход при вязкости $\nu \cdot 10^6, \text{ м}^2/\text{с}$											
	0,55...1,1			1,1...6,0			6...60			60...300		
	мин.	ном.	макс.	мин.	ном.	макс.	мин.	ном.	макс.	мин.	ном.	макс.
15	0,6	2,0	3,0	0,5	1,6	2,5	0,3	1,1	1,8	0,2	1,0	1,5
25	0,9	3,0	4,5	0,8	2,8	4,2	0,4	2,5	3,8	0,3	2,2	3,3
40	2,5	8,5	12,5	2,1	7,0	10,5	0,9	5,6	9,0	0,8	5,0	8,0
60	4	17	25	3,0	16	24	1,8	12	18	1,7	11	17
80	7,2	36	54	6,0	32	48	4,2	28	42	3,8	25	38

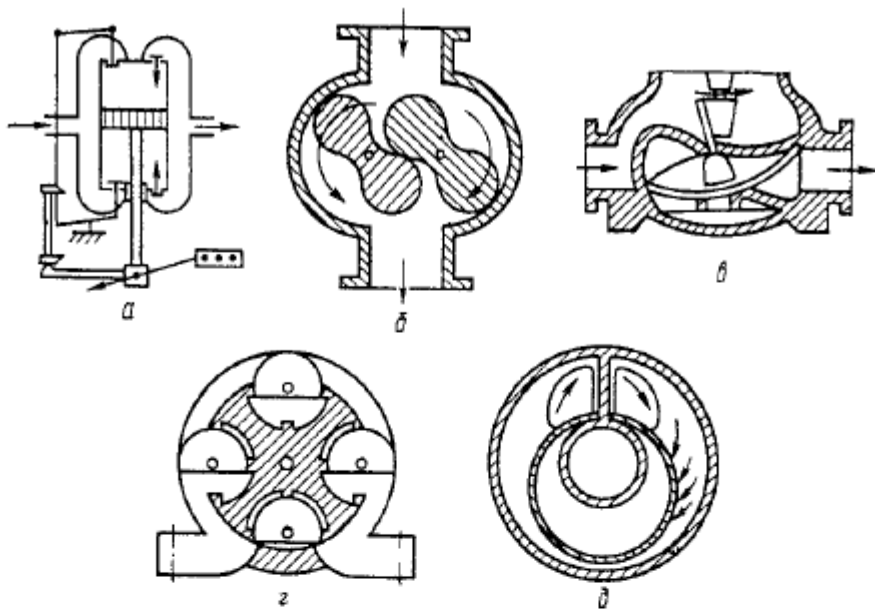


Рис. 5.43. Объемные расходомеры и счетчики с движущимися разделительными элементами:

a — поршневой; *b* — ротационный с восьмеркообразными роторами; *в* — ротационный с трапециевидальными роторами; *г* — ковшовый; *д* — кольцевой

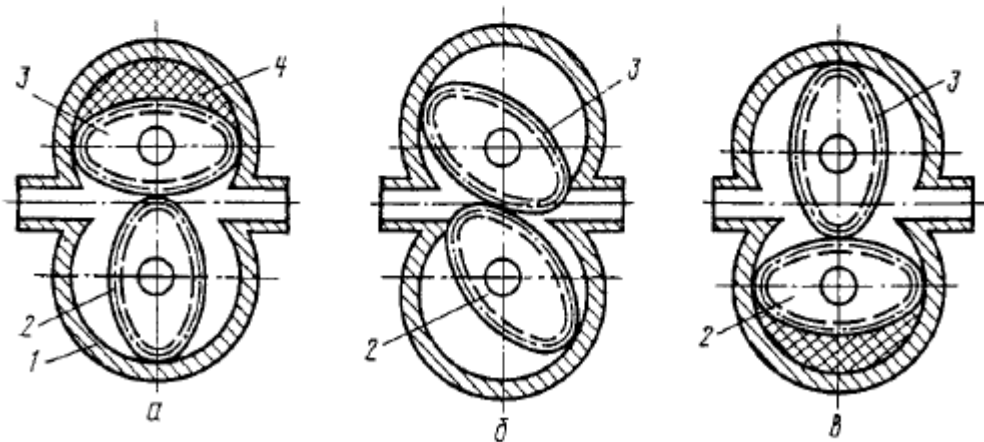


Рис. 5.44. Схема работы съемного счетчика с овальными шестернями:

a, б, в — режимы работы счетчика: 1 — корпус; 2, 3 — шестерни; 4 — вытесняемый объем жидкости

В табл. 5.17 приведены значения максимального, номинального и минимального расхода ($\text{м}^3/\text{ч}$).

Для жидкостей с вязкостью свыше $0,5 \text{ м}^2/\text{с}$ предложены различные профили зубчатой нарезки овальных шестерен (рис. 5.45), которые способствуют уменьшению потерь давления, соответственно увеличивается максимальная производительность. С этой целью у шестерен следующие два, причем зубья одной из них попадают в срез другой. У шестерен (рис. 5.45, *в*) зубья, за исключением

трех на одной и четырех на другой, срезаны через один на две пятые длины. Срезы на находящихся в контакте зубьях шестерен выполнены с противоположных торцов. Данные расходомеры (счетчики) применяют в мясной промышленности для вязких и высоковязких жидкостей.

Предприятие «Тельтов» (Германия) по производству приборов и регуляторов выпускает систему узлов функциональных элементов для регистрации и обработки измеряемых: величин объема и расхода. Система узлов подразделена на две группы: устройства измерения и управления на базе счетчика с овальными шестернями (рис. 5.46) и установки измерения, управления и регулирования (рис. 5.47).

Конструкцию измерительного механизма типа WG (рис. 5.46, а) применяют только при малых расходах и диаметрах трубопровода. В нем корпус измерительного механизма одновременно является и измерительной камерой, так же как в конструкциях типа WGS и WMS (рис. 5.46, б, в). В этих расходомерах возможным является подход к измерительным элементам без демонтажа передач механизма и последующих элементов. Расположенный на трубопроводе измерительный механизм расходомера легко открывается и очищается. С целью значительного разгружения от воздействия давления измерительной камеры она выполнена в виде отдельного элемента, вставленного в корпус механизма (рис. 5.46, г). При этом измерительная камера полностью соприкасается с жидкостью, статическое давление которой поглощается корпусом механизма. Поэтому камера нагружается только возникающим на механизме перепадом давления жидкости. Этим конструктивным решением существенно уменьшается также постороннее влияние теплового расширения и напряжения, а также других эластичных деформаций. Для автоматизации технологических процессов в мясной промышленности необходимо шире применять трубопровод как межоперационный транспорт с учетом расхода продукта. С этой целью можно использовать систему (см. рис. 5.47), состоящую из конструктивных блоков функциональных элементов для регистрации и обработки измеряемых величин объема и расхода.

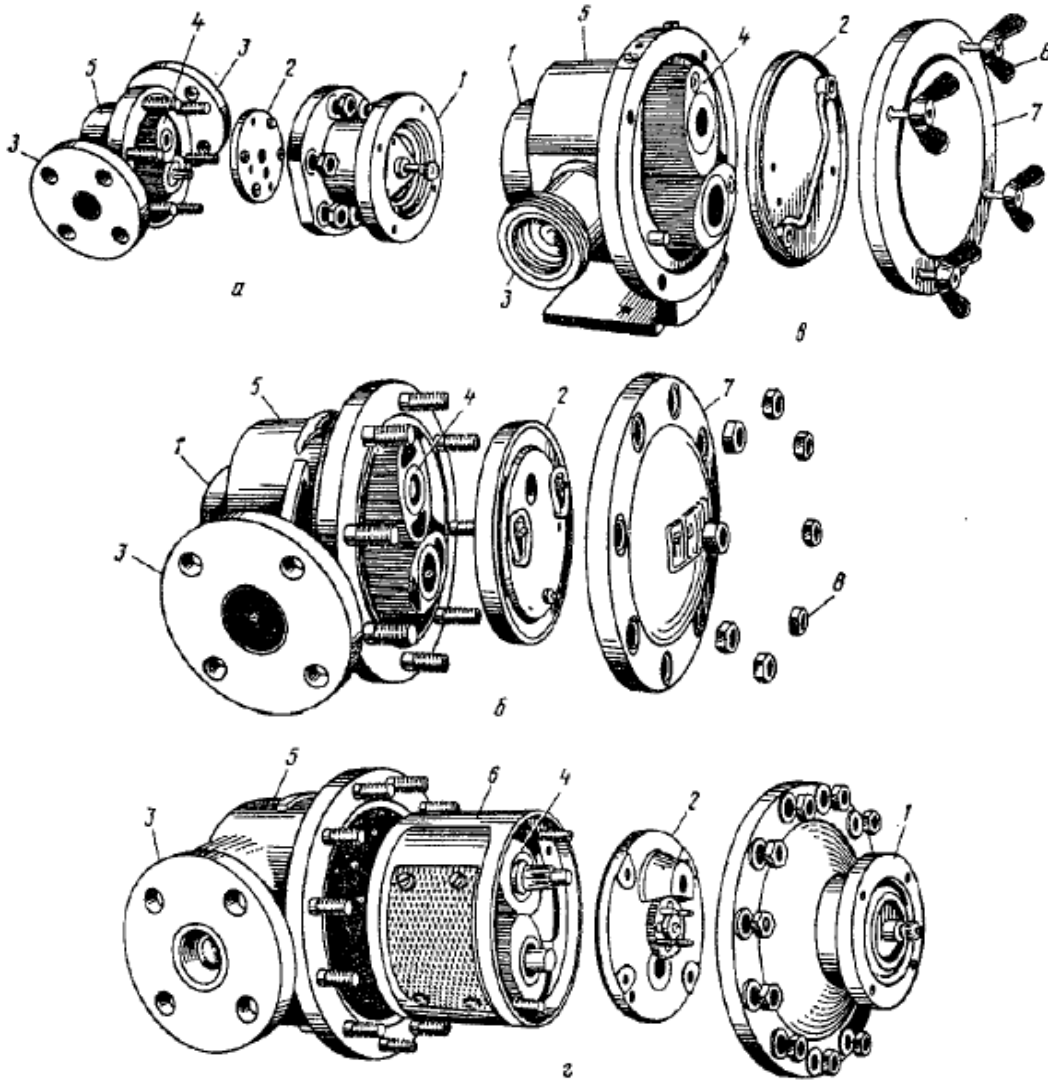


Рис. 5.46. Измерительные механизмы расходомера с овальными шестернями:

a, б, в — конструкции, у которых корпус является измерительной камерой; *г* — с отдельной разгруженной от давления измерительной камерой; *1* — фланец для подключения конструктивных блоков; *2* — крышка измерительной камеры; *3* — фланцевые или резьбовые соединения с магистральным трубопроводом; *4* — овальные шестерни; корпус; *б* — измерительная камера; *7* — крышка корпуса; *8* — крепление крышки

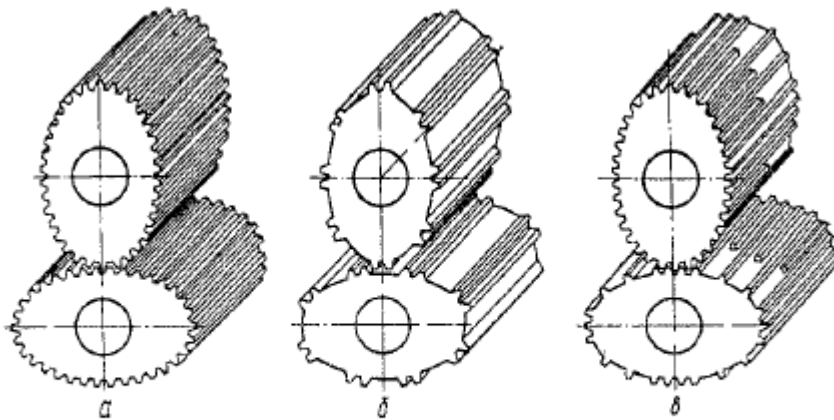


Рис. 5.45. Профиль зубьев овальных шестерен:

a — обычный; *б, в* — для вязких жидкостей

2. Вопросы и задания для самоконтроля

1. Чем отличается массовый расход от объемного и как они связаны между собой?
2. Что такое расходомер и счетчик, и чем они отличаются друг от друга?
3. По каким признакам классифицируют расходомеры для жидкостей, газа и пара?
4. Принцип работы расходомеров переменного перепада давления, область их применения и формула расчета коэффициента.
5. Каковы перспективы использования диафрагменных фитингов, правила монтажа диафрагм и соединительных линий.
6. Чем отличаются расходомеры постоянного перепада давления от переменного?
7. Конструктивные особенности ротометров.
8. Каковы отличия поплавковых и поршневых расходомеров от ротаметров, и возможность их использования для биотехнологических сред?
9. Принцип работы турбинных расходомеров и область их использования для контроля биотехнологических жидкостей.
10. Чем отличаются аксиальные от тангенциальных турбинных расходомеров?
11. Принцип работы объемных и массовых расходомеров, их преимущества и недостатки.
12. Какова перспектива использования объемных и массовых расходомеров для автоматизации технологических процессов производства биотехнологических сред?
13. Какими расходомерами можно измерять расход вязкопластичных биотехнологических сред?
14. Принцип работы индукционного расходомера.

Список рекомендуемой литературы

1. Ауэрман Л. Я. Технология хлебопекарного производства: [Текст]: учебник / Лев Янович Ауэрман. - 9-е изд., перераб. и доп. - М.: Профессия, 2009. - 416 с.
2. Авроров В. А. Основы реологии пищевых продуктов: [Текст]: учебное пособие / Валерий Александрович Авроров, Николай Дмитриевич Тутов. - Старый Оскол: ТНТ, 2014. - 268 с
3. Кузнецов О.А., Волошин Е.В., Сагитов Р.Ф. Реология пищевых масс: Учебное пособие. - Оренбург: ГОУ ОГУ, 2005. - 106 с. / Электронная библиотека «Единое окно доступа к образовательным ресурсам» -<http://window.edu.ru/>
4. Косой В. Д. Инженерная реология биотехнологических сред: [Текст]: учебное пособие / В. Д. Косой, Я. И. Виноградов, А. Д. Мильшев. - СПб.: ГИОРД, 2005. - 648 с.
5. Реометрия пищевого сырья и продуктов: Справочник / Под ред. Ю. А. Мачихина. - М.: ВО Агропромиздат, 1990. - 269 с.