Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Локтионова Оксана Геннадьевна
Должность: проректор по учебной работе
Дата подписания: 27.01.2021 17:29:32
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

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

Курск 2018

УДК: 664

Составитель: А.Г. Беляев.

Рецензент

Кандидат фармакологических наук, доцент *Л.А. Горбачева*

Реология методические указания по выполнению лабораторных работ / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: А.Г. Беляев. Курск, 2018. 104с.: Библиогр.: с.104

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

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

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать 15.02.18. Формат 60x84 1/16.
Усл. печ. л. 6,04 Уч.-изд. л.5,47 Тираж 50 экз. Заказ. 1676 Бесплатно.
Юго-Западный государственный университет.
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
5 семестр	
Лабораторная работа №1 Исследование реологических моделей	7
Лабораторная работа №2 Прочностные и компрессионные свойства твердых пищевых продуктов.	13
Лабораторная работа №3 Физико-механические свойства сыпучих пищевых масс. Определение относительных реологических характеристик сыпучих пищевых масс	17
Лабораторная работа №4 Исследование реологических свойств ньютоновских и неньютоновских жидкостей с помощью капиллярного вискозиметра.	20
Лабораторная работа №5 Структурообразование и физико-механические свойства упруговязкопластичных материалов. Исследование реологических свойств неньютоновских жидкостей с помощью ротационного вискозиметра	27
Лабораторная работа №6 Реометрия пищевого сырья, полуфабрикатов и готовой продукции. Определение коэффициентов трения пищевых материалов.	32
Лабораторная работа №7 Определение предельного напряжения сдвига пищевых материалов	37
Лабораторная работа №8 Изучение адгезионных свойств пищевых продуктов	45
6 семестр	
Лабораторная работа №1 Изучение ползучести пищевых материалов в условиях всестороннего осевого сжатия	50
Лабораторная работа №2 Определение физико-механических характеристик пищевых материалов из опыта на ползучесть	55
Лабораторная работа №3 Расчет трубопроводной установки для транспортирования пластично-вязкого продукта	61
Лабораторная работа №4 Определение ударной вязкости готовых изделий	64
Лабораторная работа №5 Определение предельного напряжения сдвига методом пенетрации и проверка его инвариантности	69
Лабораторная работа №6 Исследование процесса релаксации	72

Лабораторная работа №7 Измерение реологических свойств на ротационном вискозиметре с постоянным крутящим моментом	74
Лабораторная работа №8 Определение и расчет прочностных свойств пищевых материалов при динамической нагрузке	80
Лабораторная работа №9 Расчеты по некоторым разделам реологии (Определение коэффициента динамической вязкости. Процесс релаксации напряжений. Процесс течения жидкостей)	82
Список рекомендуемой литературы	102

ВВЕДЕНИЕ

Методические указания к выполнению лабораторных 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 лабораторных 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. Студенты должны ознакомиться с содержанием и порядком выполнения лабораторной работы.

Каждое занятие содержит цель его выполнения, материальное обеспечение, рекомендуемые для изучения литературные источники, вопросы для подготовки, краткие теоретические сведения, задания для выполнения. При выполнении лабораторных 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 лабораторной работы студента осуществляется комплексно: по результатам выполненного задания, устному сообщению и качеству оформления работы, что может быть учтено в рейтинговой оценке знаний студента.

Правила оформления работ

1. Отчеты по каждой теме лабораторного занятия оформляются в отдельной тетради.
2. Перед оформлением каждой работы студент должен четко написать ее название, цель выполнения, краткие ответы на вопросы для подготовки, объекты и результаты исследования. Если предусмотрено оформление работ в виде таблиц, то необходимо все результаты занести в таблицу в тетради. После каждого задания должно быть сделано

заключение с обобщением, систематизацией или обоснованием результатов исследований.

3. Каждую выполненную работу студент защищает в течение учебного семестра.

Выполнение и успешная защита лабораторных работ являются допуском к сдаче теоретического курса на экзамене.

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ 5 СЕМЕСТР

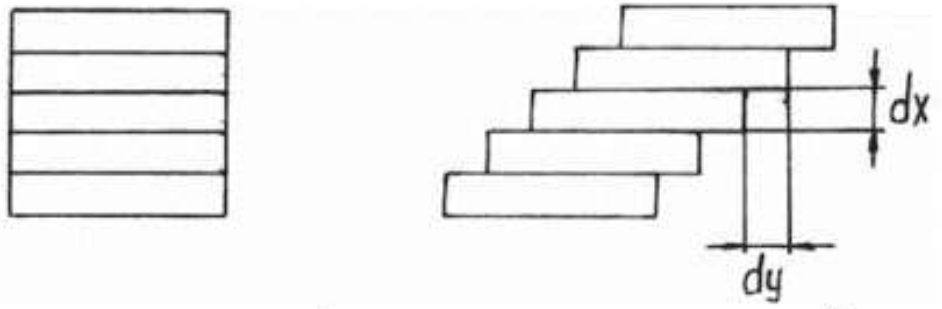
Лабораторная работа №1 Исследование реологических моделей

Цель работы:

Изучить методы математического описания реологических моделей по их феноменологическим (механическим) моделям.

Теоретические сведения

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.



а - исходное состояние; б - схема деформируемого тела.

Рисунок 1. Деформация сдвига

Относительная деформация сдвига двух элементарных слоев деформируемого тела определяется зависимостью:

$$\gamma = \frac{dy}{dx} \qquad (1)$$

Есть так же понятие скорости сдвига

$$\gamma = \frac{dVy}{dx} \qquad (2)$$

Для идеальноупругого тела (тела Гука) связь напряжений и деформации при чистом сдвиге описываются зависимостью

$$\tau = G\gamma \qquad (3)$$

Тело Гука идеально, так как оно восстанавливает свою исходную форму после снятия приложенных нагрузок, какими бы они не были. Кроме тела Гука существуют еще 2 простейшие модели реальных тел – Сен-Венана и Ньютона.

Для тела Сен-Венана деформации начинаются все после достижения напряжениями предельного значения, например при чистом сдвиге $\tilde{\tau}_0$. До этого тело идеально твердое. Причем велечина ϒ и ϓ не связана с $\tilde{\tau}_0$. Такое тело называется идеально пластичным.

Тело Ньютона – это идеально вязкая жидкость. У него скорость сдвиговых деформаций ϓ

Определяет возникающие касательные напряжения

$$\tau = \mu\gamma \qquad (4)$$

Где μ постоянный коэфициент, называемый коэфициентом вязкости.Реальные тале отличаются от идеальных тем, что в них одновременно присутсвуют и упругие и пластические и вязкие свойства.

Выражать реологические свойства реальных тел можно механическими моделями.

Для тела Гука это пружина, для тела Ньютона это гидравлический амортизатор, для тела Сен-Венана поступательная кинематическая пара сухого трения

Модели реальных тел показаны на рисунке2

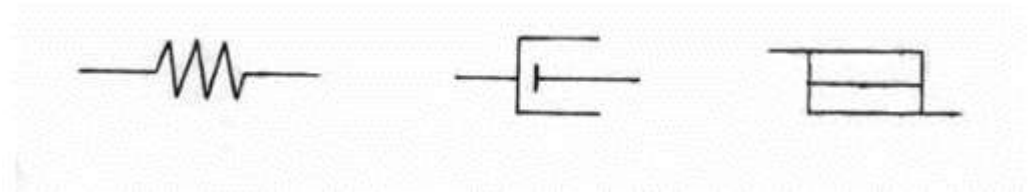


Рисунок 2 Модели реальных тел

Из формул 3- 4 и рисунка 2 следует, что тело Гука характеризуется жесткостью пружины G, а тело Ньютона вязкостью μ.

Приме сложной модели, состоящее из двух простых, тело Кельвина рисунок 3

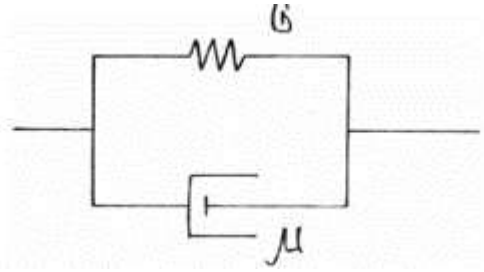


Рисунок 3тело Кельвина, механическая модель

Для описания механической модели Кельвина используем то обстоятельство, что при параллельном соединении элементов деформации сложного тела $\Upsilon_к$ равна деформации каждого элемента, а так же напряжение суммарного элемента $\tilde{\imath}_к$ равно сумме напряжений в отдельных элементах $\tilde{\imath}_г$и $\tilde{\imath}_н$. Эти соображения позволят записать систему уравнений

$$\gamma_k = \gamma_r = \gamma_H \qquad (5)$$

$$\tau_k = \tau_r + \tau_H \qquad (6)$$

Воспользуемся реологическими уравнениями Гука и Ньютона

$$\tau_r = G\gamma_r (7)$$

$$\tau_H = \mu\gamma_H (8)$$

Рассмотрим две совокупности уравнений 5 и 6, получим математическую модель тела Кельвина

$$\tau = G\gamma + \mu\gamma (8)$$

Кельвин ввел это мягкое тело для того, что бы иметь возможность показать свойства вязкого трения для твердого тела, то есть явление ползучести, когда деформация развивается при постоянной величине приложенных напряжений.

Возможен другой способ сочетания упругих и вязких свойств, когда жидкость проявляет упругие свойства. Для описания такого явления можно взять другую реологическую модель – тело Максвелла, показано на рисунке 4

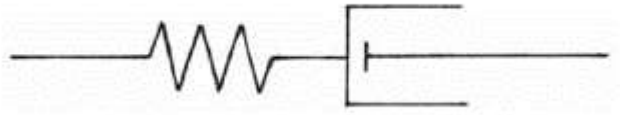


Рисунок 4 механическая модель тела Максвелла

Рассуждая аналогично тому как это было сделано для модели Кельвина, получаем реологическое уравнения тела Максвелла

$$\tau + \frac{\mu}{G} = \mu\gamma (9)$$

Решение уравнения 9 позволяет объяснить такое явление как релаксация напряжений.

Для более точного описания свойств реальных тел нужно использовать более сложные модели, например, трехпараметрическая модель называется обобщенным линейным телом. Рисунок 5.

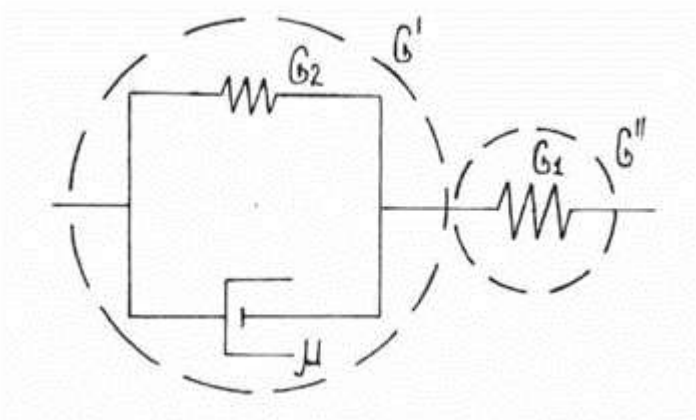


Рисунок 5 Механическая модель обобщенного линейного тела

Математическая модель образуется следующим образом из тел Кельвина и Гука

$$\gamma_{олт} = \gamma_r + \gamma_k \quad (10)$$

Затем, так как Ньютоновский элемент в теле Кельвина содержит ϒ продеференцируем выражение 10

$$\gamma_{олт} = \gamma_r + \gamma_k (11)$$

Далее воспользуемся символическим методом построения математической модели, по имеющийся механической. Вводится оператор δ, означающий операцию дифференцирования элементов с которыми соседствуют символы. Все операции производятся по законам алгебры. И упругие и вязкие элементы приравниваются к упругим, но модель упругости вязкого элемента формально получают умножением символа δ на символ μ. Вводится понятие жесткости модели обозначающейся G.

Суммарная жесткость параллельно соединенных гуковских элементов и считают равной сумме этих жесткостей.

$$G_{\Sigma} = G_1 + G_2 \quad (12)$$

Сумараня жесткость последжовательно соединенных элементов вычисляется из выражения

$$\frac{1}{G_{\Sigma}} = \frac{1}{G_1} + \frac{1}{G_2} (13)$$

Применив этот способ для получения модели ОЛТ. Сначала будем считать это двумя последовательно соединенными упругими элементами

$$\frac{1}{G_{\Sigma}} = \frac{1}{G'} + \frac{1}{G''} (14)$$

Элемент G" рассмотрим как два параллельных элемента

$$G' = G_2 + \partial\mu (15)$$

Окончательно

$$\frac{1}{G_{\Sigma}} = \frac{1}{G_2 + \partial\mu} + \frac{1}{G_1} (16)$$

Отсюда

$$\frac{1}{G_{\Sigma}} = \frac{G_1 + G_2 + \partial\mu}{G_1(G_2 + \partial\mu)} (17)$$

Учитывая, что

$$\frac{1}{G_{\Sigma}} = \frac{\gamma'}{\tau} (18)$$

Затем

$$G_1\tau + G_2\tau + \partial\mu\tau = G_1G_2\gamma + \partial\mu\gamma G_1 (19)$$

Математическая модель будет иметь вид

$$\tau + \frac{\mu}{G_1 + G_2}\partial\tau = \frac{G_1G_2}{G_1 + G_2}\gamma + G_1\frac{\mu}{G_1 + G_2}\gamma \qquad (20)$$

Окончательно запишем

$$\tau + \frac{\mu}{G_1 + G_2}\tau = \frac{G_1G_2}{G_1 + G_2}\gamma + G_1\frac{\mu}{G_1 + G_2}\gamma \qquad (21)$$

Для моделей из 4х элементов в процессе вывода появляются члены содержащие произведение символов $\delta\delta$, что интерпретируется как взятие второй производной.

Практическая часть

На основании вышеизложенного составьте математические модели механических моделей, предложенных преподавателем.

Контрольные вопросы

1 Назовите определение реологии.
2 Чем отличаются реальные тела от моделей?
3 Охарактеризуйте тело Гука
4 Охарактеризуйте тело Ньютона.
5 Какие свойства проявляет тело Кельвина?
6 Что такое релаксация напряжений?

Лабораторная работа №2 Прочностные и компрессионные свойства твердых пищевых продуктов.

Цель работы:

Изучить методику расчета сжимающего напряжения. Изучить особенности прочностных и компрессионных свойств твердых пищевых продуктов.

Теоретические сведения

Прочностью называют сопротивление тела действию внешних сил которые приводят тела к течению или разрушению. У гуковских тел скорость деформации не влияет на предел прочности, так что различий в статической и динамической прочности не существует. У негуковских тел (к которым принадлежат почти все твердые пищевые продукты), которые обладают как упругими, так и пластичными и вязкими свойствами, прочность зависит от скорости деформации. Минимальной прочностью обладают тела при статическом или квазистатическом нагружении, при котором вязкоупругие напряжения полностью релаксируют. Разрушение наступает только после повышения предела текучести и развития пластичной деформации. Максимальной прочности негуковские тела достигают при крайне высокой скорости нагружения. В этом случае вязкоупругие напряжения практически не релаксируют, предел прочности наступает непосредственно за пределом текучести, пла-

стичная деформация отсутствует, поэтому наблюдается хрупкий излом. На практике нагружение проводят при скорости деформации, которая лежит между граничными условиями, так что соответствующая динамичская прочность достигается при скорости выше минимального и ниже максимального значения. Твердость – это комплексное свойство негуковских тел оказывать сопротивление проникновению другого тела вследствие необратимых «упругой и вязкой» деформаций. При негомогенном структурном строении тел микротвердость в различных точках неодинакова. Вследствие этого прямой зависимости между твердостью и прочностью не существует. Твердость нельзя выразить как физическую величину с однозначной размерностью. Она является некоторым техническим параметром, который выражается в относительных величинах в зависимости от метода определения. Простейшим видом нагружения для анализа реологического поведения твердых пищевых продуктов является сжатие межу двумя плоскопараллельными пластинами на универсальных измерительных приборах типа «Инстрон», «Цвик», «Кегель» или пенетрометрах. Схема нагружения представлена на рисунке 1.

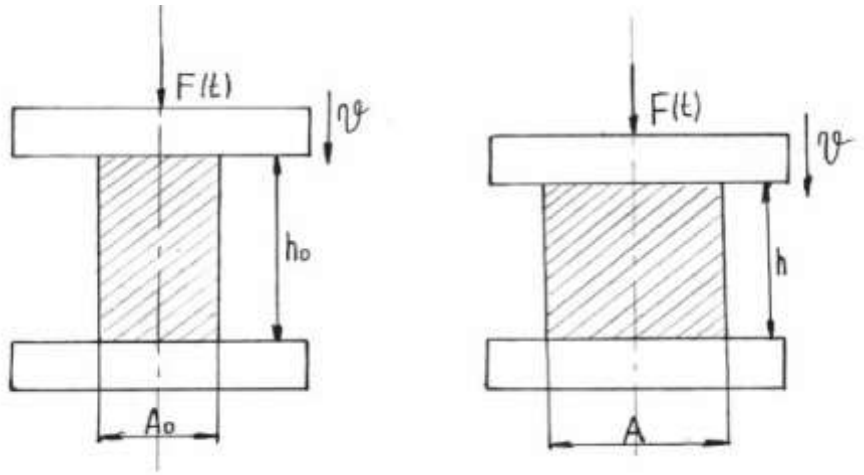


Рисунок1 – Схема нагружения исследуемого образца

Исследуемый образец кольцевого или призматического поперечного сечения с первоначальной площадью A0 и первоначальной высотой h0 нагружают с постоянной скоростью V возникающую при этом силу сжатия измеряют как функцию высоты пробы f(h) . Для определенияреологических констант необходимо

рассчитать напряжение деформации возникающее при сжатии образца.

У хрупких материалов до разрушения наблюдаются большие деформации, которые предшествуют разрушению и ведут к существенному изменению величин A0 и h0. Обозначим высоту образца, уменьшающуюся при сжатии как функцию времени. Возрастающая при этом площадь поперечного сечения A. Сжимающая сила, которая измеряется прибором, является функцией относительного сжатия K и растет при увеличении деформации.

$$K = \frac{h_0 + h}{h} \cdot 100\% \qquad (1)$$

При постоянной скорости нагружения высота образца будет изменятся по следующей зависимости:

$$h = h_0 - \nu \cdot t \qquad (2)$$

Деформация образца в направлении действия силы определяется по следующей формуле:

$$\varepsilon = \frac{h_0 - h}{h} \qquad (3)$$

А скорость деформации по

$$\varepsilon = \frac{\nu}{h} = \frac{\nu}{h_0 - h} \qquad (4)$$

Разделив числитель и знаменатель выражения на h0 получим

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon_0}/(1 - \dot{\varepsilon_0} \cdot t) \qquad (5)$$

Где ε_0 – это начальная скорость деформации

$$\dot{\varepsilon_0} = \nu/h_0 \qquad (6)$$

Соотношение изменения поперечного сечения образца составляют

$$\frac{A}{A_0} = b_0 + b_1\dot{\varepsilon}_0 t/(1^{\cdot} - \dot{\varepsilon}_0 t) \qquad (7)$$

Коэфициенты b_0 и b_1 являются константами материала идолжны быть определены эксперементально для несжимаемых материалов $b_0 = b_1 = 1$, для сжимающего напряжения справедлива зависимость

$$\sigma(t) = f(t)/A \qquad (8)$$

$$\sigma(t) = f(t)/A_0(b_0 + b_1\dot{\varepsilon}_0 t/(1^{\cdot} - \dot{\varepsilon}_0 t)) \qquad (9)$$

Реологические параметры получают преобразуя измеряемую прибором сжимающую силу по уравнению 7-9, при этом учитывают,что большинство твердых пищевых продуктов обладают сложно вязкоупругими и упругопластичными свойствами, по этому у них наблюдается нелинейная зависимость между напряжением и деформацией.

Материальное оснащение

Лабораторный пресс, две металлические пластины, штангенциркуль, испытуемый материал.

Ход работы

Исследуемый образец равномерно сжимаем между двумя плоскопараллельными пластинами при помощи лабораторного винтового пресса. Время сжатия измеряется секундомером.

Определяем в двух точках величину A1 и A2, соответственно h1 и h2.

Данные опыта и вычислений заносим в таблицу 1

Таблица 1 Результаты эксперимента

образец	A_0	A_1	A_2	h_0	h_1	h_2	ν	K	ε	$\dot{\varepsilon}_0$	b_0	b_1	$\sigma(t)$
№1													
№2													

f (t) рассчитываем по формуле (9) для нескольких возможных значений σ(t), по результатам расчета строим график зависимости f (t) от σ (t).

Проанализируйте результаты работы и сделайте выводы.

Вопросы для контроля:

1 Что такое прочность?

2 У каких тел прочность зависит от скорости деформации?

3 В каком случае негуковские тела достигают максимальной прочности?

4 Дайте определение твердости?

5 Что происходит при сжатии образца?

6 Какими свойствами обладают твердые пищевые продукты?

Лабораторная работа №3 Физико-механические свойства сыпучих пищевых масс. Определение относительных реологических характеристик сыпучих пищевых масс

Цель работы:

Определить относительные параметры, характеризующие трение, адгезию и аутогезию сыпучих пищевых масс.

К относительным реологическим параметрам сыпучих пищевых масс относятся время истечения и угол естественного откоса. Для оп-

ределения времени истечения используется модель бункера для сыпучих пищевых масс. Работа выполняется в следующей последовательности:

- взвешивают 500 грамм исследуемого сыпучего материала (зерно, мука, сахар и др.),
- загружают им бункер при закрытом выходном отверстии,
- открывают выходное отверстие бункера,
- измеряют время истечения сыпучего материала,
- опыт с каждым исследуемым образцом выполняется трижды.

Рисунок 1 - Определение относительных реологических характеристик сыпучих пищевых масс

Полученные данные заносят в таблицу 1.

Таблица 1 – Определение времени истечения сыпучих пищевых масс

Наименование сыпучего образца	Время истечения (с) для образцов			
	1	2	3	среднее

Для определения угла естественного откоса формируют конус (рисунок 1) путем истечения сыпучего образца из воронки. Размеры конуса: высота h, диаметр основания d и тангенс краевого угла $tg\alpha = h/ d/2$. Полученные данные заносят в таблицу 2.

Таблица 2 – Определение угла естественного откоса

№	Наименование сыпучего образца	Диаметр основания конуса, d			Ср. ар. диаметр	Высота конуса, h			Ср. ар. высота	tgα	α
		1	2	3		1	2	3			

Обобщенные результаты измерений двумя относительными методами заносят в таблицу 3. По результатам измерений располагают сыпучие образцы по мере увеличения времени истечения и угла естественного откоса и делают вывод о влиянии адгезии и аутогезии и на эти параметры.

Таблица 3 – Результаты измерения времени истечения (τ) и угла естественного откоса (α)

№	Наименование сыпучего образца	Время истечения, τ, с.	Угол естественного откоса, α град.

Выводы:

Вопросы для контроля

1. Что такое относительные параметры, характеризующие трение, сыпучих пищевых масс.

2. Что такое относительные параметры, характеризующие адгезию, сыпучих пищевых масс.

3. Что такое относительные параметры, характеризующие аутогезию, сыпучих пищевых масс.

Лабораторная работа №4 Исследование реологических свойств ньютоновских и неньютоновских жидкостей с помощью капиллярного вискозиметра.

Цель работы:

Освоение методики определения вязкости жидких пищевых продуктов методом капиллярной вискозиметрии.

Применяемые приборы и материалы: капиллярный вискозиметр типа ВПЖ-2, ареометр общего назначения АОН-1, стеклянный цилиндрический сосуд, мешалка, вода, сахар, соль, подсолнечное масло.

Основные сведения

Ньютон в 1867 году предположил, что внутреннее при течении жидкости зависит от относительной скорости передвижения ее частиц. Закон вязкого течения жидкости установленный Ньютоном постулируется так: сила внутреннего трения применяющеяся при течении одного слоя жидкости относительно другого, прямопропорциональна ингредиенту относительной скорости этого перемещения поповерхности слоев.

Математическая запись закона Ньютона такова

$$F = \eta \cdot S \frac{d\omega}{dx} \qquad (1)$$

Где F – сила, действующая на поверхность слоя в направлении противоположном его движению Н

S- площадь слоя $м^2$

dw –относительная скорость движения слоев, находящаяся на расстоянии dx

η- коэфициент пропорциональности, зависящий от природы жидкости и являющийся одной из важнейших характеристик

Введем следующие понятия. Сила, приходящаяся на единицу площади слоя в направлении его движения называется касательным напряжением или напряжением сдвига $Н/м^2$ ĩ

По определению ĩ = F/S величина dw/dx называется скоростью деформации и обозначается ε. Разность напряжений сдвига $Н/м^2$, скорости деформации – $с^{-1}$

С учетом изложенного 1 принимает вид

$$\tau = \eta \cdot \varepsilon \quad (2)$$

Чтобы найти вязкость необходимо решить уравнение 1 или 2 применительно к конкретным условиям течения жидкости.

Теория капиллярныхвискозиметров

Теория, кроме гипотез сплошности и непрерывности использует следующие допущения и ограничения: скорость жидкости на стенке принимается равной 0, продукт считается несжимаемым, реологические свойства неизменны по длине и не зависят от времени, т.е. на течение не оказывают влияние процессы реолексии, релаксации и изотропии. Однако отмечены случаи проскальзывания продукта относительно стенки, т.е. скорость на стенки не равна 0. Теория предусматривает, например, для степенных жидкостей при индексе течения = 0, стержневой режим движения, при котором вся масса перемещается как твердый стержень и скорость на стенке равна среднеобъёмной скорости потока, а градиент скорости на стенке стремится к бесконечности.

Основной предпосылкой научной обоснованности и объективности данных полученных на капиллярныхвискозиметрах, являетсяотсутствие турболизации потока т.е. режим движения должен быть ламинарным или структурным. Режим движения характеризуется критерием Рейнольдса, который представляет собой безразмерное числовое значение, пропорциональное отношению кинетического потока $m*w^2 / 2$ где m- масса, w- средняя объёмная скорость к работе сил вязкого сопротивления PI. P- сила сопротивления I- длинна.

$$Re = \frac{p \cdot d \cdot w}{\eta} \quad (3)$$

Где p – плотность жидкости кг/м^3

d – диаметр трубки м

η – вязкость жидкости

Критерий Рейнольдса не должен превышать 150, а длительность истечения жидкостей не должна быть меньше 100.

В общем случае теория капиллярной вискозимитрии рассматривает равномерное прямолинейное движение в горизонтальной трубке.

Касательное напряжение θ на боковой поверхности выделенного циллиндра

$$\Theta = \left({}^{p}/_{2l} \right) \cdot r \qquad (4)$$

Где p – перепад давления на торцах цилиндра Па

L – длинна цилиндра м

R – радиус цилиндра м

Вискозиметрыкапиллярного типа применяются для определения вязкости материалов, обладающих относительно небольшой ее величиной: мясокостного бульона крови и топленого жира, подсолнечных и соевых мицелл, растворов мыла и арахисовых масел, кондитерского жира. В капиллярныхвискозиметрах задаются либо постоянным во всех опытах расходом жидкостей, либо постоянным перепадом давления в капиллярах. В вискозиметрах с постоянным расходом измеряется перепад давления между концами капилляра, в приборе с постоянным давлением – расход материала.

Каждый вискозиметр состоит из нескольких частей: емкости для исследуемого материала, калиброванного капилляра, приспособления для определения и регулировки давления, определение скорости течения материала, определения температуры.

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

В опытах на капиллярныхвискозиметрах получают зависимость расхода массы θ от перепада давления Δp. Если проводят на одном капилляре то напряжение сдвига на стенке капилляра ĩ рассчитывают по формуле

Где r – радиус капилляра м

L – длинна капилляра

N – поправка

Когда используют два капилляра одинакового радиуса но разной длинны, то τ̃ определяют по формуле

$$\tau = R \cdot \frac{(p_1 - p_2)}{[2(L_1 - L_2)]} \qquad (5)$$

Скорость сдвига ϒ в c^{-1} на стенке капиллярарассчитывают по формуле

$$\gamma' = \gamma'_{cp} \cdot \left[3 + dlq\gamma'_{cp} \Big/ (dlq\tau) \right] \qquad (6)$$

Капилярные вискозиметры можно условно разделить на 3 группы:

Стеклокапилярные, цилиндр – поршень и приборы истечения. К первой группе приборов относят простейшие вискозиметры, представляющие собой U – образные трубки, в одном из колен которых помещен капиляр.

В вискозиметре Уббелоде, представленном на рисунке 3.1 для истечения жидкости одного из колен необходимо принудительно создавать давление и разрежение. Капиляр в приборе располагается вертикально, что представляет определенные трудности при работе с жидкостями, обладающих значительной вязкостью и поверхностным натяжением.

Далее трубки соединяются с атмосферой и определяется время истечения жидкости из резервуара через капилляр в резервуар. Время истечения отсчитывается при снижении уровня жидкости в трубке с резервуарами от риски m1 до m2.

При определении вязкости ньютоновских жидкостей в капиллярных вискозиметрах воспользуемся формулой Пуазейля

$$Q = \frac{\Pi \rho g h d^4}{128\eta(l + md)} \qquad (7)$$

Где q – расход жидкости через капиляр мм^3
P – потери давления в капиляре Па
D – диаметр капилляра мм
η – ньютоновская вязкость
l - длинна капиляра мм
m – поправка длинны капиляра

Давление на входе в капиляр является гидроскопическим и определяется по формуле

$$P = \rho g H \qquad (8)$$

Где ρ – плотность жидкости г/мм^3
g – ускорение свободного падения м/с^2
h – высота столба жидкости мм
Подставив получаем

$$Q = \frac{\Pi \rho g h d^4}{128\eta(l + md)} \qquad (9)$$

Отсюда следуют что расход через капилляр линейно зависит от высоты h. Интегрируя выражение 3.3 по всему объёму полости из которой вытекает жидкость в капиляр можно определить время истечения жидкости. Эта задача существенно упрощается тем, что полость изготовленна симметрична относительно плотности со средней высотой столба жидкости. Поэтому расход можно принять постоянным и равным, тогда

$$Q(h_{\text{ср}}) = \frac{V}{t} \quad (10)$$

Где V – объём полости мм^3
T – время истечения жидкости с

Подставляя выражение 3.3 в 3.4 получим

$$\eta = \frac{\Pi \rho d_c h_{\text{ср}} d^4}{128V(l + md)} t \qquad (11)$$

Выделив постоянные для данного капилярного вискозимитра параметры получим

$$\eta = \rho \frac{g}{g_c} kt \qquad (12)$$

$$K = \frac{\Pi \rho d_c h_{\text{ср}} d^4}{128V(l + md)} \qquad (13)$$

Где К – постоянная вискозимитра

g_c– стандартная велечина ускорения свободного падения

Чтобы исключить влияние плотности жидкости обычно определяют ее кинематическую вязкость

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \qquad (14)$$

Получаем окончательную формулу для определения кинематической вязкости

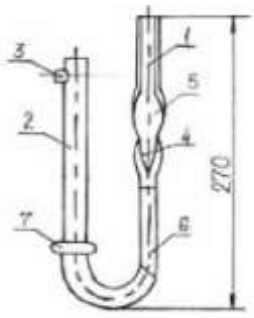
$$\nu = \frac{\rho}{g_c} kt \quad (15)$$

Важным является обеспечение постоянной и строго фиксированной температуры в процессе определения вязкости. Это достигается термостатированием вискозиметра.

Вязкость двух жидкостей связанных в одном капилляре будут связаны выражением

$$\eta = \eta_0 \frac{\rho}{\rho_0} \frac{t}{t_0} \qquad (16)$$

Вискозиметр капиллярный стеклянный типа БПЖ-4, показанный на рисунке 3.1, представляет собой U – образную трубку, в колено 1 которого впаян капилляр 6. Измерение вязкости основано на определение времени истечения через капилляр фиксированного объёма жидкости, заключенного между отметками М1 и М2.



1 – рабочее место; 2 – вспомогательное калено; 3 – отводный патрубок; 4,5 – расширение рабочего калена; 6 – капилляр; 7 – расширение вспомогательного колена.

Перед определением вязкости жидкости вискозиметр должен быть тщательно промыт и высушен. Промывают их спиртом – ректификатом или ацетоном. Затем вискозиметр просушивают.

Порядок выполнения работы

Для заполнения вискозиметра на отводной патрубок надевают резиновый шланг. Далее, зажав пальцем колено 2 и перевернув вискозиметр, опускают колено 1 в сосуд с жидкостью и засасывают ее с помощью груши до отметки М2 следя за тем, чтобы в жидкости не образовывались пузырьки воздуха. Затем вискозиметр поворачивают в нормальное положение. Снимают с внешнего конца колена 1 избыток жидкости. После этого устанавливают вискозиметр на штативе. Если в этом есть необходимость, засасывают жидкость в колено 1 примерно до одной трети высоты расширения 5, затем сообщают колено 1 с атмосферой и определяют время истечения опускания менисков жидкости от отметки М2 до отметки М1. Вязкости вычисляется по формуле (3.8) по среднему из трех измерений времени истечения жидкости при значениях параметров К=0,2703*(10)-6; g=9,807 м/(с)2

Результаты измерений заносят в таблицы

Таблица 3.1 – Результаты эксперимента

№ опыта	Наименование жидкости	Время истечения, с	Среднее время истечения, с	Кинематическая вязкость

Расчеты вязкости представляют в таблице 3.2

Таблица 3.2 – Расчет Ньютоновской вязкости

Плотность жидкости	Ньютоновская вязкость

Отчет должен содержать дату выполнения, цель работы, сведения о необходимом для выполнения работы оборудования, схему лабораторной установки, заполненную таблицу результатов измерений, выводы.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается закон вязкого течения Ньютона?
2. Какие допущения и ограничения имеет теория капиллярных вискозиметров?
3. Какой режим движения жидкости должен быть в капиллярном вискозиметре?
4. Какие виды материалов исследуются данным методом?
5. Почему время истечения одинакового объема различных жидкостей через капилляр различно?
6. Запишите формулу касательных напряжений и ньютоновской жидкостей?
7. Назовите основные элементы капиллярного вискозиметра?
8. Каков принцип действия капиллярного вискозиметра?
9. Охарактеризуйте вискозиметр Уббелоде.

Лабораторная работа №5 Структурообразование и физико-механические свойства упруговязкопластичных материалов. Исследование реологических свойств неньютоновских жидкостей с помощью ротационного вискозиметра

Цель работы:

Усвоение методики определения вязкости методом ротационной вискозиметрии.

Теоретические сведения

Семейство ротационных вискозиметров включает в себя системы с соосными цилиндрами, конусами, сферами и некоторыми другими поверхностями вращения. Помимо типа рабочих поверхностей (цилиндры, конусы и др.), ротационные вискозиметры отличаются друг от друга также устройствами для измерения момента вращения. В последнее время для изучения биологических жидкостей стали применяться приборы в которых внутренний цилиндр свободно плавает в испытуемой жидкости. Передавая к этому цилиндру момент вращения с помощью магнитного поля или через промежуточную жидкость, по его угловой скорости можно оценивать вязкость. Известны приборы для определения вязкости по скорости затухания колебаний. Среди них назовем ультразвуковые вискозиметры. Измерительным элементом их служит металлическая пластина, совершающая возвратно-поступательное движение с ультразвуковой частотой. К ним относится один из первых приборов для измерения вязкости, сконструированный Кулоном. В приборе Кулона вязкость оценивалась по затуханию колебаний в жидкости цилиндра, подвешенного на упругой нити. В лабораторной практике вязкость иногда оценивают по скорости движения шарика в жидкости. Если используется метод падения шарика, то измеряют его скорость ω , и вязкость вычисляют по уравнению Стокса:

$$\eta = \frac{2}{9} \cdot \frac{r^2 \cdot (d_r - d_ж)}{\omega} \cdot q \qquad (1)$$

Ротационная вискозиметрия проводиться на приборах, где исследуемую массу помещают в зазоре между вращающейся и неподвижной частями, например, между коаксиальными цилиндрами. Масса, соприкасаясь вращающейся частью вискозиметра, увлекает за собой всю имеющуюся в зазоре массу. Фиксируя частоту вращения и усилие для его осуществления, определяют напряжение и скорость сдвига. Меняя частоту вращения, можно получить достаточное количество точек для построения кривой течения Для многих пищевых

масс, имеющих высокую вязкость, употребление ротационного вискозиметра не представляется возможным по ряду причин.

Например, при использовании прибора типа цилиндр-цилиндр, где исследуемую массу помещают в узком зазоре между наружным и внутренним цилиндрами. Возникают две противоположные задачи: необходимо иметь большой зазор для удобного, равномерного заполнения.

его довольно густой исследуемой массой, в то же время, зазор должен быть возможно меньшим, так как только при небольшом отношении его толщины к диаметру цилиндров можно считать, что во всех точках находящейся в зазоре массы скорости сдвига одинаковы, что необходимо для простого применяемого метода расчета по экспериментальным данным реологических характеристик массы. Ротационная вискозиметрия широко применяется в исследовании пищевых масс. Например бараночного и хлебопекарного теста, конфетной массы пралине, сливочной помадки, мясного фарша, а также мыла и т. п. Так данные ротационной вискозиметрии можно использовать для определения оптимальной продолжительности перемешивания масс.

Техника вискозиметрического исследований.

Ротационную вискозиметрию можно проводить на установке, включающей в себя ротационный вискозиметр. Кроме вискозиметра РВ-8, известно очень много конструкций приборов ротационного типа. Многие из них существенно сложнее по устройству, но зато они позволяют и более точно и строго строить кривые течения исследуемых материалов.

Описание лабораторной установки

Вращающаяся часть вискозиметра - ротор - приводится в движение действием падающих грузов, тянущих нити, навитые на барабаны жестко связанные с ротором. Ротор расположен внутри неподвижного цилиндра – статора. Внешний диаметр ротора и внутренний диаметр статора несколько отличается, благодаря чему меж-

ду ними есть зазор, в который помещается исследуемая масса. Вокруг неподвижного цилиндра циркулирует подаваемая термостатом вода определенной температуры. Скорость вращения ротора под действием грузов определяется по времени 7-10 оборотов. Для отсчета времени используется секундомер, включаемый и выключаемый контактами, срабатываемыми от соприкосновения с движущимися грузами.

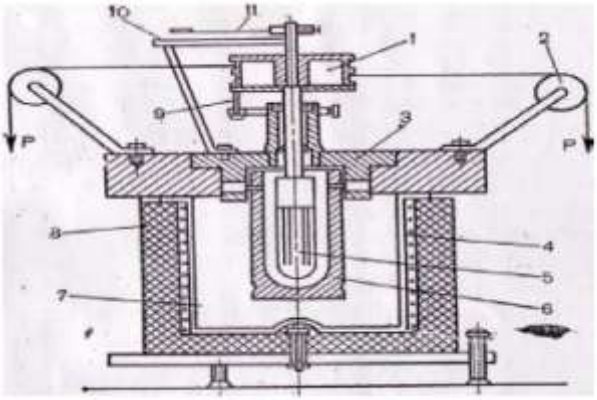


Рисунок 1 Установка для проведения ротационной вискозиметрии на базе вискозиметра РВ-8

1-шкив; 2 - блоки; 3 - установочная гайка; 4 - стакан для термостатирующей жидкости; 5 – ротор; 6 - стакан; 7 - спираль электронагрева; 8 - изоляция; 9 - стопор; 10 - шкала; 11 - стрелка.

Порядок выполнения работы

Обработка результатов эксперимента ведется следующим образом. По замеренным P - массе груза в граммах и t – времени n – оборотов ротора можно подсчитать имевшие место напряжение сдвига τ и скорость сдвига γ.

Результаты эксперимента заносятся в таблицу

образец	P	t	n	K_τ	τ	$K\dot{\gamma}$	$\dot{\gamma}$
№1							
№2							

Для подсчета скорости надо знать коэфициент K_{Υ} равный для РВ-8

$$K_{\dot{\gamma}} = 42{,}2 \cdot \frac{h + 1{,}16}{h + 1{,}26} \quad (2)$$

$$\gamma = \dot{K}_{\dot{\gamma}} \cdot \frac{n}{t} \quad (3)$$

Контрольные вопросы

1. Приведите примеры способов определения вязкости в ротационных вискозиметрах.
2. Для исследования каких пищевых масс используются ротационные вискозиметры.
3. В каком случае и почему не представляется возможным использование ротационных вискозиметров.
4. Назовите основные элементы ротационного вискозиметра Воларовича.
5. Опишите работу ротационного вискозиметра

Лабораторная работа №6 Реометрия пищевого сырья, полуфабрикатов и готовой продукции. Определение коэффициентов трения пищевых материалов

Цель работы:

Изучить теоретические основы движения грузов в гравитационном транспорте; Усвоить методику определения коэффициентов трения различных материалов.

Теоретические сведения

К пищевым материалам в данной работе будем относить сырье, полуфабрикаты и готовые пищевые продукты. Во всех отраслях пищевой промышленности широко используется

гравитационный транспорт - это спускные желоба, лотки, трубы, каскадные и винтовые спуски, т.е. все те устройства, в которых движение груза происходит только под действием силы тяжести.

Такой способ используется при подаче материала в бункеры, для перемещения от затворов и питателей к конвейерам, при перегрузке с конвейера на конвейер и т.п. Для перемещения сыпучего и мелкодисперсного материала подходят спускные трубы, для крупнокускового материала чаще используются спускные лотки, желоба, винтовые спуски.

Штучный, плоскодонный груз (коробки, мешки, ящики, груз на поддонах) удобно перемещать по роликовым конвейерам, которые также относятся к гравитационному транспорту. Достоинство этого вида транспорта в отсутствии приводного устройства, невысокой стоимости, простоте.

Недостатки: износ внутренней поверхности конвейера при движении груза скольжением; разрушение, крошение, возможная деформация груза при неправильно выбранном угле наклона конвейера, образование заторов при изменившихся условиях (например, повышенная влажность транспортируемого материала). Для снижения влияния недостатков таких устройств необходимо правильно подобрать угол наклона гравитационного транспортирующего устройства с учетом коэффициента трения материала. Сила трения

скольжения направлена в сторону, противоположную возможному движению тела и достигает значения, не превышающего определенного предела. Наибольшая сила трения скольжения Fmax пропорциональна нормальному давлению N тела на поверхности и определяется законом Кулона.

$$F_{max} = f_0 \cdot N \qquad (1)$$

Схема движения тела по вертикальной поверхности представлена на рисунке

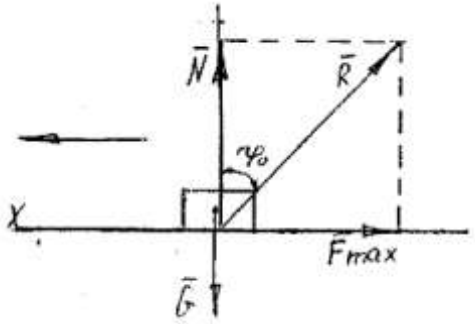


Рисунок 1- движения тела по вертикальной поверхности

Сила Fmax отклоняет реакцию R от нормали на угол Ф. Тангенс угла Ф трения в покое равен статическому коэффициенту трения f

$$tg\varphi = \frac{F_{\max}}{N} = f_o$$

Динамический коэффициент трения скольжения f всегда меньше статического коэффициента f0 и зависит от материала соприкасающихся тел и их шероховатости. Для абсолютно гладких тел коэффициент f = 0, для реальных тел f > 0.

Рассматривая условия равновесия реального шероховатого тела на наклонной плоскости, представленные на рисунке 5.2, приходим к выводу, что при угле наклона α плоскости к горизонту больше чем угол трения в покое Ф тело начнет перемещаться в направлении оси X. Таким образом замерив угол α , равный углу трения Ф и

вычислив значение tgα определим коэффициент трения скольжения в покое.

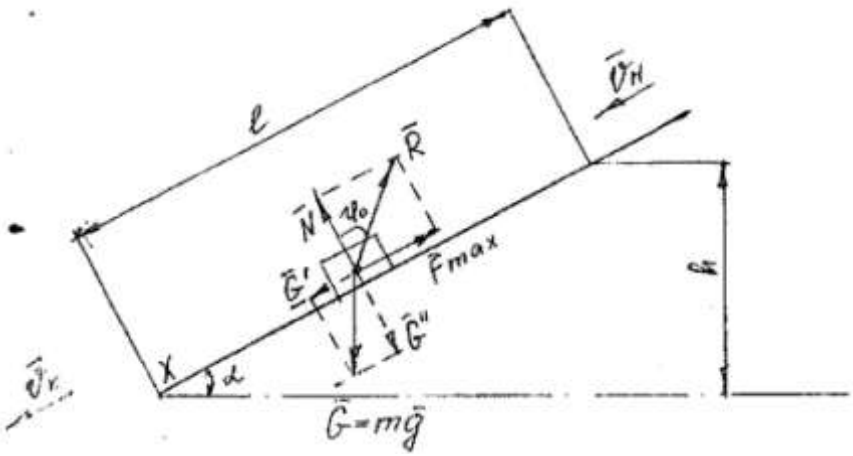


Рисунок 2 – Условия равновесия реального шероховатого тела

Как сказано выше необходимым условием перемещения груза по спуску является превышение угла наклона α над углом трения груза. Из условия равноускоренного движения тела при α > Ф можно записать, что

mg = G · sinα − f · G · cosα , (3)

Но mg = G/a , отсюда коэфициент трения скольжения f

$$f = tg\alpha - \frac{a}{g \cdot \cos\alpha} \qquad (4)$$

Где a –ускорение движения тела

$$a = \frac{2S_1 + 2S_0 - 2(S_1 + 2S_0)^2 - S_1^2}{t_1^2} \qquad (5)$$

Если принять массу груза m, начальную скорость движения V_0 а конечную V_kто величину скорости движения тела по спуску можно определить по теореме об изменении кинетической энергии

$$\frac{mV_k^2}{2} - \frac{mV_o^2}{2} = mgh - mgfl\cos\alpha \qquad (6)$$

учитывая, что h=1sinα , скорость на конечном участке определяется как

$$V_k = \sqrt{2gl(\sin\alpha - f\cos\alpha) + V_o^2} \qquad (7)$$

$$V_k = \sqrt{2gh(1 - fctg\alpha) + V_o^2} (8)$$

где f - коэффициент трения скольжения груза по спуску

Необходимо учитывать, что при большой длине конвейера скорость движения может достигнуть такой величины, при которой возможно повреждение груза. При известной начальной скорости Vo и заданной конечной скорости VK длина спуска L, обеспечивающая заданную скорость, определится из уравнения

$$L = \frac{2gh - V_k^2 + V_o^2}{2gf_o} \qquad (9)$$

Для снижения скорости спуск делается составным, причем на одном участке при α >Ф груз приобретает необходимую скорость, на другом, при α < Ф, обеспечивается торможение.

Оборудование

Установка для определения коэффициентов трения различных материалов, представленная на рисунке 3, испытуемый материал, секун-

домер.

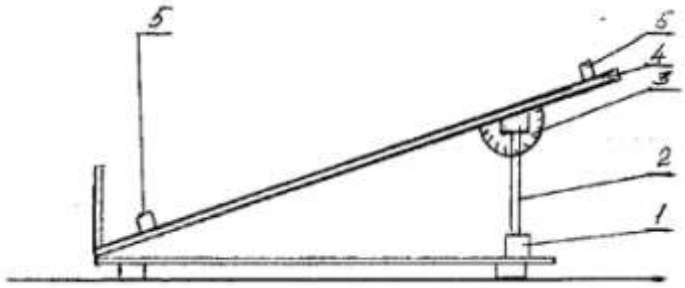


Рисунок 3 Установка для определения коэффициентов трения

1– основание; 2 – винт; 3 – шкала; 4 –поворотная платформа со сменными лотками; 5 – контакты.

Ход работы

Определение статического коэффициента трения скольжения.

1 Установить платформу в горизонтальное положение и поместить образец в сменный лоток платформы.

2 Поворачивая винт 2 медленно увеличивать угол наклона платформу до тех пор, пока образец под действием собственной силы тяжести не начнет перемещаться.

3 По шкале транспортира определить угол φ. Для каждого образца опыт провести три раза и определить среднеарифметическое значение углов ϕ.

4 По формуле (5.2) вычислить значение статического коэффициента трения скольжения испытуемого материала по стали, по дереву, по резине.

Определение динамического коэффициента трения скольжения.

1 Установить платформу со сменным лотком под углом $\alpha > \varphi$, обеспечивающим равноускоренное движение материала.

2 Установить образец в исходное положение на расстоянии S0 до первого контакта, затем дать возможность свободно скользить по лотку до второго контакта, т.е. S1.

3 Снять показания времени t по секундомеру и вычислить среднее значение t по трем опытам.

4 По формулам (4) и (5) вычислить значение динамического

коэффициента f трения скольжения исследуемого материала по стали, по дереву и по резине.
.5 Опыты повторить не менее трех раз.
Определение конечной скорости движения материала.
1 По формулам (8) и (9) определить конечную скорость движения материала и длину конвейера при заданных значениях h.
2 Сравнить значения коэффициентов трения различных материалов, представив данные в таблице
Значения коэффициентов трения различных материалов

Исследуемый материал	Коэффицент трения скольжения f	
	Статический	Динамический
	по стали, дереву, резине	по стали, дереву, резине

Контрольные вопросы

1 Какие виды гравитационного транспорта используются в пищевой промышленности?
2 Назначение и область применения гравитационного транспорта.
3 Достоинства и недостатки гравитационного транспорта.
4 Возможное регулирование скорости движения груза.
5 Пути снижения величины коэффициента трения.
6 Опишите работу лабораторной установки.

Лабораторная работа №7 Определение предельного напряжения сдвига пищевых материалов

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.

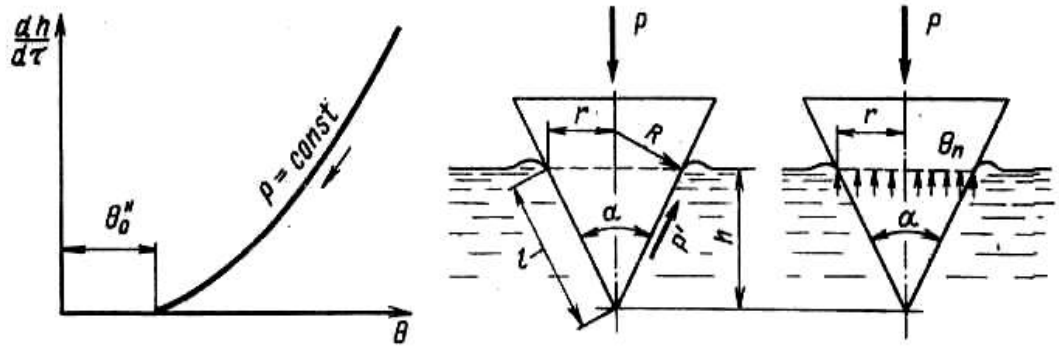
Для получения продуктов высокого качества необходимо постоянно оценивать свойства сырья на этапах его обработки, что позволит стабилизировать его качество и улучшить эффективность работы технологического оборудования.

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. Ребиндером 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. 1.1. 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.



а б в

Рис. 1.1 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.1.1 б) или предельное давление (отношение силы к горизонтальной площади сечения конуса, которое проходит по поверхности продукта, рис.1.1 в). Выталкивающей силой продукта (Архимедова сила) пренебрегают вследствие ее малости. Если снять полную кривую течения (рис. 1.1 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. 1.1 б). Условия равновесия сил на поверхности конуса получим, проектируя на образующую конуса ℓ движущую силу P и приравнивая ее силе сопротивления P':

$$P' = P cos(\alpha/2). \qquad (1.1)$$

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

$$\theta_0^H = P'/F = P\cos(\alpha/2)/\pi r l = K_\alpha mg/h^2, \qquad (1.2)$$

где K_α - константа конуса, α - угол при вершине конуса, град; m - масса конуса, кг;

g - ускорение свободного падения, м/с^2;

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 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.

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. 1.2. 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 ^{o}. Характеристика прибора: пределы измерения напряжения сдвига - от 5 до 10^4 Па; интервал температур - от 2 до 100 ^{o} С; габаритные размеры - 350×350×700 мм.

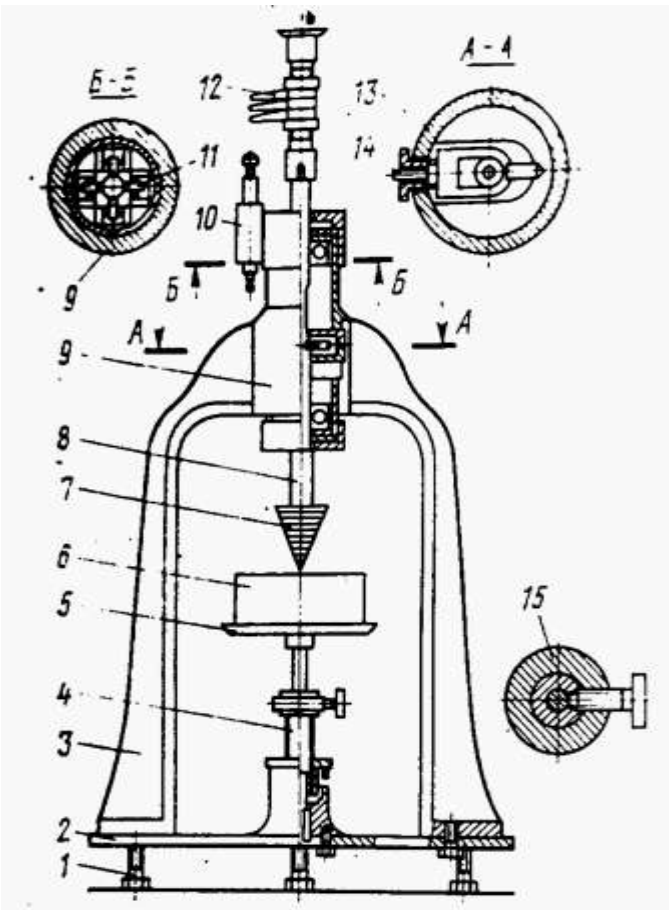


Рис. 1.2. Конический пластометр КП-3

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 рисков 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 $\alpha = 30^{o}$. Затем выбранный конус закрепляют и производят контрольный спуск штанги. По окончании времени погружения конуса в продукт, равного 180 сек, производят контрольный замер по шкале индикатора. Для правильности работы прибора глубина погружения конуса $h_{конус}$ в продукт высотой h должна удовлетворять условию $0{,}33h \leq h_{конус} \leq 0{,}75h$. 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) подвести 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 содержала 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. Длительность 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. 1.1.

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

$$m_{ист} = (m_{конуса} + m_{штанги}) - m_{тр}, \qquad (1.3)$$

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. 1.1. 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. 1.1

Таблица 1.1

Результаты испытаний

Образцы продукта	Константа Прибора, K_α	Истинная масса грузов, $m_{ист}$	Номер испытания	Предельное напряжение сдвига, θ_0, Па	Среднее значение θ_0', Па
Однократное измельчение			1 2 3		
Трехкратное измельчение					

Пятикратное измельчение					

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

Контрольные вопросы

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.

Лабораторная работа №8 Изучение адгезионных свойств пищевых продуктов

Цель работы: Изучить методику определения адгезионных свойств пищевых продуктов.

Общее положение

При проектировании и расчете механизмов и машин и технологических процессов, а также для выбора конструкционного материала и определения технологических режимов работы оборудования, необходимо знать силы взаимодействия между обрабатываемой пищевой массой и поверхностью рабочих органов. Адгезия (липкость), определяющая поверхностные свойства пищевых масс, проявляется на границе раздела между продуктом и твёрдой поверхностью. Адге-

зия имеет существенное значение в процессе производства пищевых масс, особенно в тех случаях, где возможен контакт между массой и поверхностью обрабатывающей машины. В настоящее время адгезии уделяют большое внимание, особенно при проектировании нового оборудования. Адгезия пищевых масс изучена сравнительно мало, т.к. на её величину влияют многие факторы, такие как температура и влажность массы, геометрические, кинематические и динамические условия, время контактирования массы с поверхностью машины. Приборы, которые позволяют определить адгезионные свойства пищевых масс, называются адгезиометрами. В большинстве своём адгезиометры выполнены в единичных экземплярах и используются для исследований каких-то определённых масс: кондитерских, мясных и молочных, хлебопекарных и др. По принципу действия адгезиометры делятся на две группы. Первая группа приборов характерна тем, что нарушение контакта происходит одновременно на всех участках площади (рисунок 1). Во второй группе нарушение контакта происходит путём последовательного отрыва отдельных участков, т.е. расслоением, отдиранием (рисунок 2).

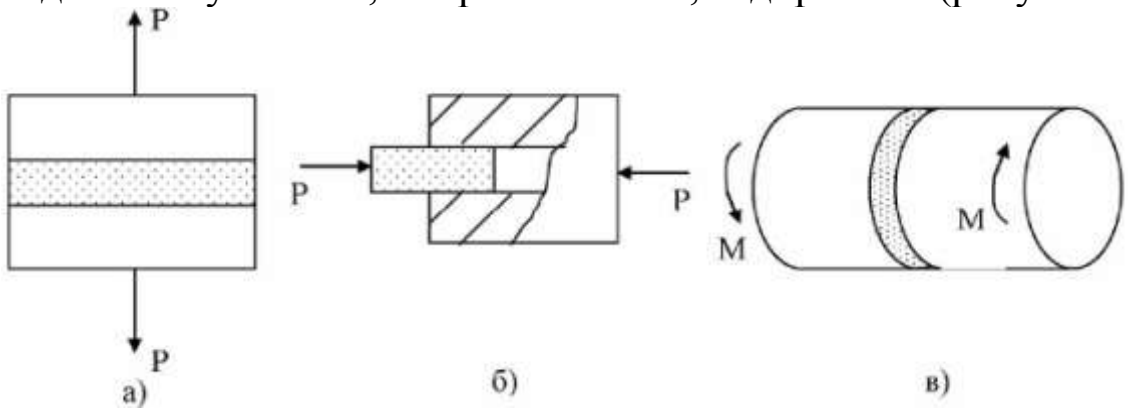


Рисунок 1 -Адгезиометры с одновременным нарушением контакта на всех участках площади

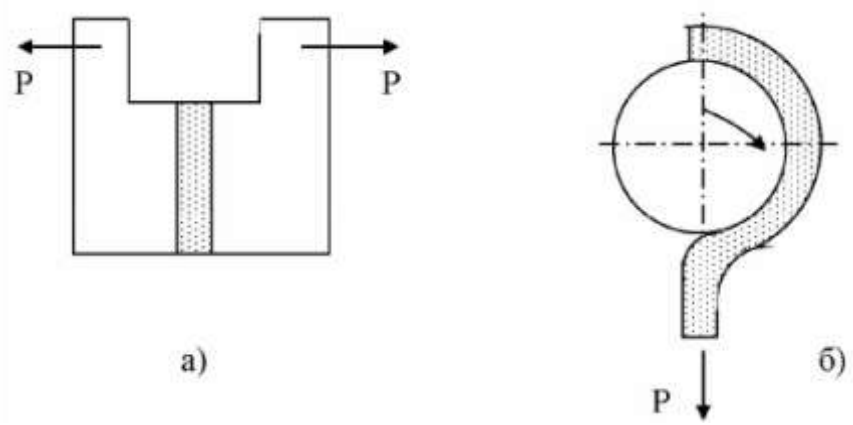


Рисунок 2 - Адгезиометры с последовательным отрывом отдельных участков

Оба метода определения адгезионной прочности нашли практическое применение. При первом методе нагрузка может быть приложена в направлении как перпендикулярном к плоскости контакта поверхностей, так и параллельном ей. Нагрузку в данном случае относят к единице площади поверхности контакта. Во втором методе нагрузку, необходимую для расслоения склейки, относят к единице длины. Наибольшее распространение в адгезиометрах получила схема а, изображённая на рисунке 1.

Порядок выполнения работы

Для исследований адгезионных свойств пищевой массы необходимо не большое количество массы поместить ровным слоем в ёмкость 1 так, чтобы она немного выступала над уровнем её краёв. Далее аккуратно накрывают массу пластинкой (из органического стекла) и лёгким нажатием уплотняют массу до тех пор, пока поверхность её не станет ровной. После этого ёмкость с массой устанавливают на основание весов под диском 2. На площадку 3 помещают груз минимальной массы, например, 50 г, чему соответствует усилие контакта Ркон =0,5 Н. Плавно поворачивают кулачок 10 и приводят прибор в рабочее положение, при этом диск 2 входит в контакт с массой. Через определённое время в чашу 7 весов наливают воду из мерного цилиндра, в который предварительно наливают 400 мл воды, до тех пор, пока не произойдёт отрыв диска 2 от массы.

Схема лабораторной установки

На рисунке 3 показана кинематическая схема прибора, предназначенного для изучения адгезионных свойств пищевых масс. Работа прибора основана на принципе отрыва конструкционного материала (субстрата) от пищевой массы (адгезива). В основе конструкции прибора (адгезиометра) использованы технические весы. Исследуемая масса помещается в емкость 1, которая устанавливается на основание весов. Стальной диск 2 вводят в контакт с массой некоторым постоянным усилием, которое создаётся грузом 4, установленным на площадке 3. Усилие отрыва диска 2 от пищевой массы определяется массой груза 8, который помещается в чаше 7 весов. В нерабочем положении коромысло 5 весов лежит на двух опорах 6. Чтобы привести весы в рабочее положение, необходимо при помощи рукоятки повернуть кулачок 10 на 1/4 оборота, который поднимает штангу 9 вместе с коромыслом 5. Перед проведением эксперимента весы уравновешиваются.

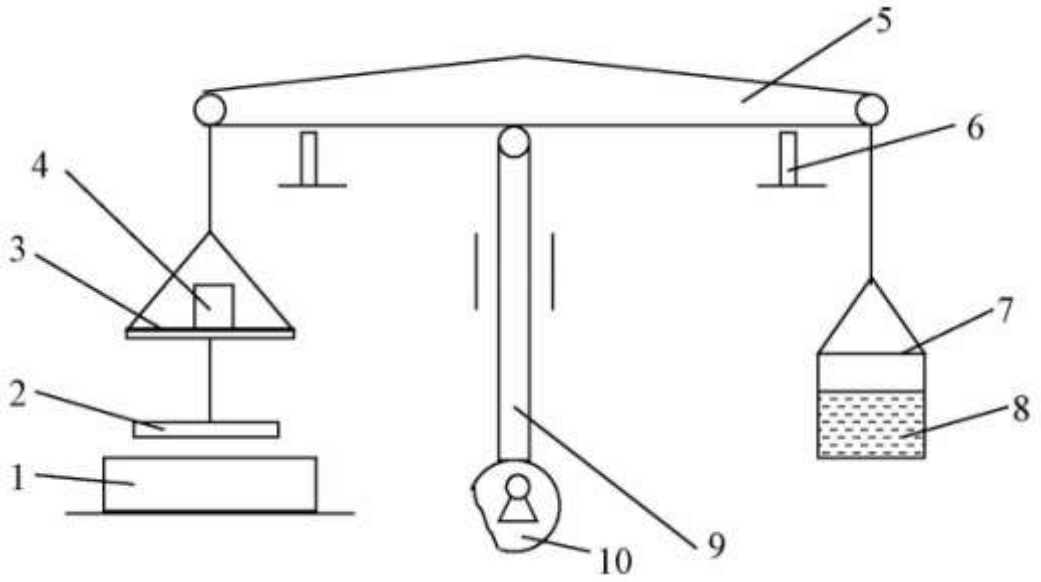


Рисунок 3 - Схема экспериментальной установки

Обработка результатов

По количеству вылитой воды из цилиндра определяют усилие отрыва $P_{отр}$

$$P_{атм} = \rho \cdot g \cdot V = 0{,}01V$$

где ρ - плотность воды, 1000 кг/м;
g- ускорение силы тяжести, ~10 м/с2
V - объём воды, вылитой из цилиндра, мл.

После окончания эксперимента воду из чашки наливают обратно в мерный цилиндр и повторяют эксперимент с той же массой и тем же грузом, но при другом времени контактирования (20, 30, 60, 90, 120 и 180 с). По окончании этой серии экспериментов проводят эксперименты с грузами массой 100, 150 и 200 г.

Контрольные вопросы

1 Что понимается под адгезией?
2 Что понимается под специфической адгезией?
3 Что понимается под механической адгезией?
4 Что влияет на формирование адгезионной связи между пищевыми и конструкционными материалами?
5 Перечислите способы влияния на адгезию пищевых материалов.
6 Требования, предъявляемые к адгезиометрам.
7 Виды адгезиометров по способу приложения нагрузки.

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ 6 СЕМЕСТР

Лабораторная работа №1 Изучение ползучести пищевых материалов в условиях всестороннего осевого сжатия

Цель работы:

- определение физико-механических характеристик пряничного теста из опыта на ползучесть при всестороннем сжатии или в условиях осевого сжатия.

1. Общее положение

При изготовлении изделий пищевой промышленности многие технологические операции осуществляются при избыточном давлении. В связи с этим возникает необходимость изучения физико-механических свойств пищевых масс в условиях всестороннего сжатия.

В условиях всестороннего сжатия в материале возникают относительные объемные деформации

$$\varepsilon = \frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta H}{H}, \qquad (1)$$

где V - первоначальный объём материала, м³;

ΔV-изменение объёма, м³;

H - высота слоя материала, м;

ΔH - изменение высоты слоя материала, м.

Деформационные процессы, происходящие с материалом в условиях объёмного сжатия аналогичны процессам при сдвиге, подробно описанным в предыдущем разделе. Так, деформационное поведение пищевых масс при объёмном сжатии можно описать с помощью четырёхэлементной модели, для которой общая деформация подсчитывается по формуле

$$\varepsilon = \varepsilon_{V1} + \varepsilon_{V2} + \varepsilon_{V3} = \frac{P}{E_{V1}} + \frac{P}{E_{V2}}\left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) + \frac{P}{\eta_{V1}} t, \qquad (2)$$

где $\varepsilon V1$ - мгновенная упругая деформация;

$\varepsilon V2$ - запаздывающая упругая деформация; $\varepsilon V3$ - пластическая деформация;

p - всестороннее давление, Па;

$EV1$- модуль мгновенной упругой объёмной деформации, Па;

$EV2$- модуль запаздывающей упругой объёмной деформации, Па, $\eta V1$- объёмная вязкость, Па*с;

$\eta V2$- объёмная вязкость упругого последействия, Па; T - период релаксации, с.

Физико-механические постоянные материала определяют на основании экспериментальных исследований материала на ползучесть — деформирование материала при постоянном напряжении.

Типичная кривая ползучести при всестороннем сжатии показана на рисунке 1. Отрезок OA характеризует мгновенную упругую деформацию, модуль которой можно подсчитать по формуле

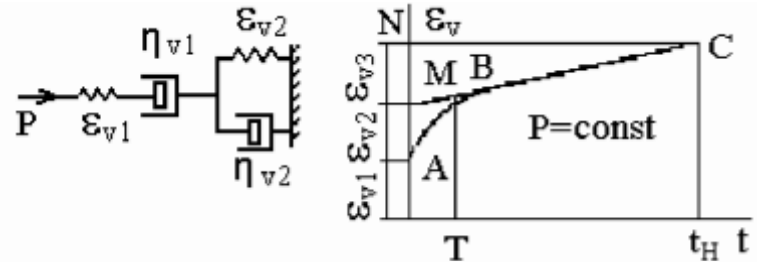


Рисунок 1 - Механическая модель и кривая ползучести пищевого материала при всестороннем сжатии

На участке AB происходит запаздывающая и пластическая деформации, параметры которой можно рассчитать следующим образом

$$E_2 = \frac{P}{\varepsilon_{V2}}, \text{Па} \qquad (3)$$

Период релаксации T определяется графически, как абсцисса точки пересечения касательной к кривой в точке A и прямой, являющейся продолжением участка вязкого течения BC. Тогда объёмная вязкость упругого последействия равна

$$\eta_{V2} = E_{V2} T, \text{Па·с} \qquad (4)$$

Объёмную вязкость можно подсчитать по формуле

$$\eta_{V1} = \frac{P}{\varepsilon_{V3}} t_H, \text{Па·с} \qquad (5)$$

Для повышения точности расчёта обычно строят семейство кривых при различных давлениях и характеристики материала определяют путём их совместной обработки.

Особый интерес представляет изучение ползучести при осевом сжатии. Такой вид деформации встречается, например, при нанесении рисунка на тестовые заготовке при производстве печенья. Процессы всестороннего и осевого сжатия имеют много общего. В связи с этим данное выше описание процесса деформирования справедливо и для осевого сжатия.

Например, уравнение (2) в случае осевого сжатия приобретает вид

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = \frac{\sigma}{E_{V1}} + \frac{\sigma}{E_{V2}}\left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) + \frac{\sigma}{\eta_1} t, \qquad (6)$$

где σ - напряжение при сжатии образца, определяется отношением нагрузки к площади поперечного сечения образца материала

В отличие от всестороннего сжатия ползучесть при осевом сжатии можно исследовать лишь для таких материалов, которые способны сохранять форму не деформируясь под действием сил тяжести.

2. Порядок выполнения работы

3. Схема лабораторной установки

Схема установки для изучения ползучести пищевых материалов в условиях всестороннего сжатия показана на рисунке 2.

Методика опыта состоит в следующем. Исследуемый материал помещают в цилиндр 1, сверху устанавливают поршень 2, легко уплотняют материал и глубиномером определяют высоту *h1*. После того планку 4 поршня 2 приводят в соприкосновение со штоком индикатора часового типа 3 и устанавливают его шкалу на нуль. Далее одновременно опускают гирю на столик для груза, включают секундомер и отмечают первое показание индикатора (в течение первой секунды).

Затем показания индикатора отмечают через определенные промежутки времени и записывают в таблицу результатов наблюдений.

Схема установки для изучения ползучести при осевом сжатии показана на рисунке 3. Особенности методики проведения опытов заключаются в следующем.

Перед началом измерений готовят образцы из исследуемого материала с помощью специального приспособления, которое представляет собой короткий полый цилиндр определённых размеров. Для этого из фольги или другого материала, отличающегося малым прилипанием к исследуемому материалу, вырезают полоску шириной, равной высоте цилиндра, и длиной, равной длине окружности внутренней поверхности цилиндра. Полоску помещают в цилиндр и прижимают её к внутренней поверхности цилиндра. Затем порцию массы помещают в полость цилиндра, предварительно поставив его на ровную гладкую поверхность, уплотняют массу и выравнивают её поверхность, убирая излишки массы, далее аккуратно вынимают порцию массы из цилиндра и снимают по лоску фольги. Таким образом, получают образец, диаметр которого равен внутреннему диаметру цилиндра, а высота равна высоте цилиндра.

После этого устанавливают упор, фиксирующий положение площадки с грузом (на схеме не показан). Далее образец 3 помещают на подъёмный столик 2, накрывают лёгким диском 4 и, вращая гайку 1 подъёмного столика 2, поднимают образец до соприкосновения со штоком 9. На площадку 7 устанавливают груз 8 нужной массы и, быстро убирая упор, включают секундомер и отмечают показания индикатора, как описано выше.

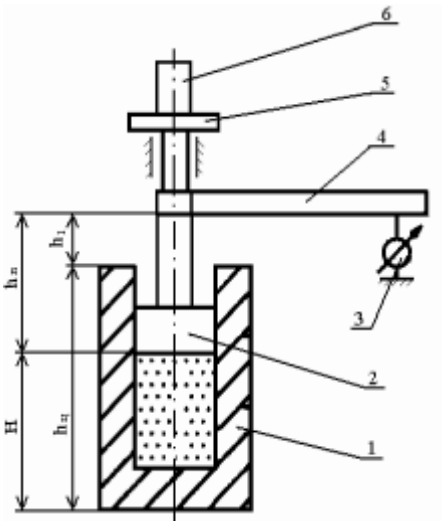


Рисунок 2 - Схема экспериментальной установки

1 - цилиндр, 2 — поршень, 3 - индикатор часового типа, 4 - планка, 5 — столик для груза, 6 - груз.

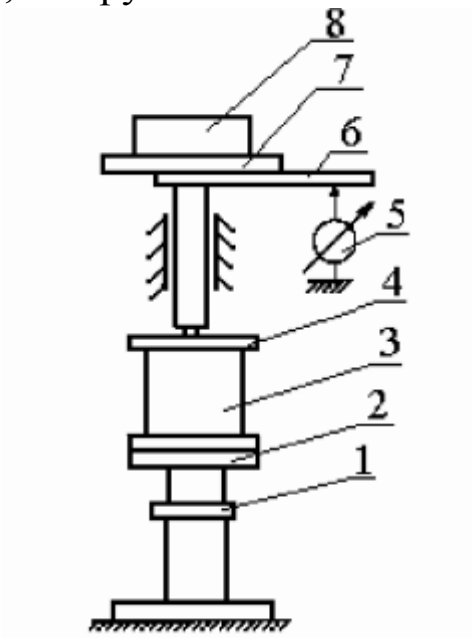


Рисунок 3 - Схема экспериментальной установки

1 - гайка, 2 - столик подъёмный, 3 - образец, 4 - диск, 5 — индикатор, 6 - планка, 7 - площадка, 8 - груз.

4. Обработка результатов

Результаты оформить в виде таблицы

Вопросы для самопроверки

1. Как определяют физико-механические постоянные материала.
2 Опишите процессы всестороннего и осевого сжатия.
3 Опишите схему установки для изучения ползучести при осевом сжатии
4. Методика опыта для изучения ползучести пищевых материалов в условиях всестороннего сжатия

Лабораторная работа №2 Определение физико-механических характеристик пищевых материалов из опыта на ползучесть

Цель работы: определение механических характеристик четырёхэлементной модели на примере пряничного теста при комнатной температуре.

Общее положение

Реальные пищевые материалы обладают мгновенными упругими, запаздывающими упругими и остаточными деформациями. Поэтому простейшей моделью, с помощью которой можно описать поведение таких материалов, как тесто, колбасный фарш, конфетные массы и др., является модель, состоящая из последовательного соединения двух описанных выше двухэлементных моделей (рисунок 1). Развитие деформации во времени для реальных материалов при постоянном напряжении называется ползучестью, а графики зависимости деформации от времени - кривыми ползучести. При мгновенном приложении напряжения τ при t=0 возникает мгновенная упругая деформация $\gamma 1=\tau/G1$ (рисунок 1, отрезок *OA*). дальнейшее развитие деформации идёт по кривой *AB*. На этом участке одновременно развиваются запаздывающая упругая деформация

$$\gamma_2 = \frac{\tau}{G_2}\left(1 - \varepsilon^{\frac{G_2}{\mu_2}t}\right)$$

и деформация вязкого течения

$$\gamma_3 = \frac{\tau}{\mu_1}t$$

Через определённое время устанавливается прямолинейная зависимость (рисунок 1 участок *BC*)

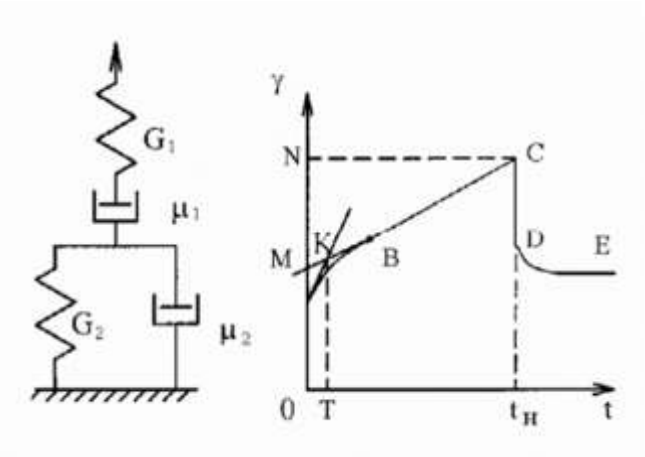


Рисунок 1 - Механическая модель и кривая ползучести пищевого материала отвечающая установившемуся стационарному процессу необратимого вязкого течения при постоянном значении упругой деформации.

На участке *ВС* деформация нарастает с постоянной скоростью, которая характеризуется тангенсом угла наклона прямой *ВС* к оси абсцисс. Скорость течения пропорциональна напряжению τ и обратнопропорциональна вязкости μ. При $t=tH$ напряжение снимают, при этом исчезает мгновенная упругая деформация γ1 (отрезок *СД=ОА),* а затем монотонно убывает запаздывающая упругая деформация *γ2*. С увеличением *t* кривая *ДЕ* асимптотически приближается к конечному значению деформации, которая равна остаточной деформации вязкого течения *γ3*.

Таким образом, в период действия постоянного напряжения τ при $0<t<tH$ общая деформация определяется следующим выражением:

$$\gamma = \gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 = \frac{\tau}{G_1} + \frac{\tau}{G_2}\left(1 - \varepsilon^{\frac{G_2}{\mu_2}t}\right) + \frac{\tau}{\mu_1}t\,, \qquad (1)$$

в которое входят четыре физико-механические характеристики: *G1* - модуль мгновенной упругой деформации;

G2- модуль запаздывающей упругой деформации; *μ1* вязкость материала;

μ2- вязкость упругого последействия.

За период нагружения *t-tH* общая деформация γ согласно рисунка 1 соответствует отрезку *ON*, упругая деформация - отрезку *OA*, де-

формация вязкого течения *Gз - MN*, где точка *M* получается при пересечении отрезка *BC* с осью *γ*, деформация - отрезку *AM*. Характеристики *G1* и ,*μ1* определяются с учётом равенства (1) по следующим формулам:

$$G_1 = \frac{\tau}{\gamma_1}, \qquad (2)$$

$$\mu_1 = \frac{\tau \cdot \tau_H}{\gamma_3}, \qquad (3)$$

Учитывая, что запаздывающая упругая деформация *γ2* практически полностью завершается в точке В, модуль *G2* можно определить:

$$G_2 = \frac{\tau}{\gamma_2}, \qquad (4)$$

Вязкость упругого последействия *μ2* определяют следующим образом. Отношение *μ2/G2* имеет физический смысл времени, в течение которого деформация *γ2* достигает 63 % от максимального значения и носит название времени релаксации *T*. Величина *T* определяется абсциссой точки пересечения касательной к кривой ползучести в точке *A* с прямой *MBC*. Объясняется это следующим. Уравнение касательной в точке *A* имеет вид

$$\gamma = \gamma_1 + \left(\frac{\tau}{G_2 T} + \frac{\tau}{\mu_2} \right) t, \qquad (5)$$

а уравнение прямой *MBC* определяется выражением:

$$\gamma = \gamma_1 + \gamma_2 + \frac{\tau}{\mu_1} t, \qquad (6)$$

Приравнивая выражения (5) и (6), получим абсциссу точки пересечения *t=T*. Тогда

$$\mu_1 = G_2 T, \qquad (7)$$

С целью повышения точности определения физико-механических характеристик получают несколько кривых ползучести при различных напряжениях. Это даёт возможность, во-первых, проверить линейность зависимостей мгновенной упругой деформации,

запаздывающей упругой деформации и скорости деформации вязкого течения от напряжения сдвига и, во-вторых, графически определить характеристики материала по результатам нескольких параллельных испытаний.

Примером использования характеристик материала является расчёт процесса нанесения рисунка на тестовую заготовку. Очевидно, что для сохранения рисунка необходимо, чтобы материал тестовой заготовки обладал остаточными деформациями, существенно превышающими упругие. Зная напряжение, действующее в материале при внедрении штампа, а также его физико-механические характеристики можно вычислить продолжительность силового воздействия на тестовую заготовку.

Простейшим видом испытания материала на ползучесть является сдвиг между двумя параллельными пластинами. Схема нагружения показана на рисунке 2

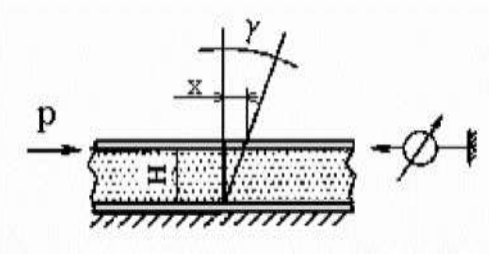


Рисунок 2 - Схема устройства для получения кривой ползучести пищевых материалов

Образец материала заполняет пространство между горизонтальными пластинами (прибор Толстого). Поверхность пластин должна быть рифлёной для предотвращения проскальзывания материала по пластине. Площадь пластины - F, зазор между пластинами — H. Нижняя пластина неподвижна, а верхняя - связана с индикатором часового типа. Если к верхней пластине приложить нагрузку P в горизонтальном направлении, то на поверхности пластины возникнут касательные напряжения τ, уравновешивающие приложенную нагрузку, то есть $\tau = P/F$. Под действием напряжения материал деформируется, и верхняя пластина получает смещение X которое регистрируется индикатором часового типа. Деформация сдвига определяется отношением смещения к зазору: $\gamma=X/H$. Наблюдая за развитием деформации во времени, получаем кривые ползучести исследуемого материала. Для проведе-

ния исследований может быть использовано устройство в виде рифлёной пластины, помещённой в сосуд с параллельными стенками. К пластине прикладывается нагрузка, вытягивающая её из исследуемого материала (прибор Вейлера-Ребиндера). При этом в слое массы, находящейся между пластиной и стенками сосуда, возникают напряжения сдвига.

2. Порядок выполнения работы

3. Схема лабораторной установки

Описание экспериментальной установки прибора Толстого

На рисунке 3 показана кинематическая схема прибора Толстого, предназначенного для изучения ползучести при сдвиге. Прибор состоит из двух рифлёных пластин 1 и 2, между которыми помещается исследуемая масса, нагружающего устройства, состоящего из рычагов 7, 10 и груза 8, ограничителя 9 и индикатора часового типа 4. для закрепления нижней пластины 1 в гнезде 3 служит винт 12. Ограничитель 9 необходим для обеспечения строго горизонтального перемещения верхней пластины в процессе испытаний, Кулачок 5 и упор 6 предназначены для безударного приложения нагрузки к верхней пластине. Для ликвидации люфтов в рычажном механизме служит винт 11 промежуточного рычага 10.

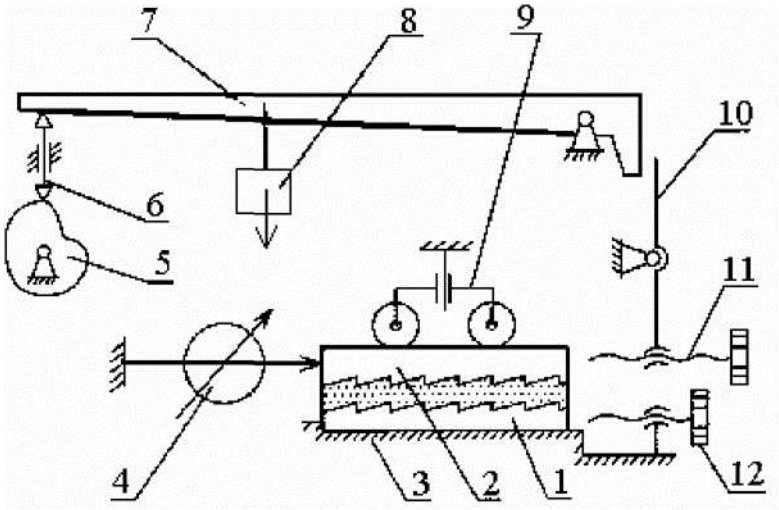


Рисунок 3 - Кинематическая схема прибора Д.М. Толстого

Описание экспериментальной установки прибора Вейлера Ребиндера

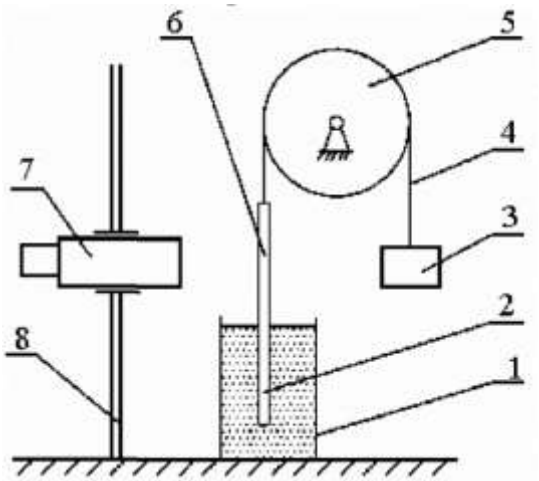


Рисунок 4 - Кинематическая схема прибора Вейлера-Ребиндера

На рисунке 4 показана схема прибора Вейлера-Ребиндера. Прибор состоит из сосуда с параллельными стенками 1, рифлёной пластины 2 с хвостовиком, нагружающего устройства, представляющего собой груз 3, подвешенный на нити 4, перекинутой через блок 5, измерительного микроскопа 7, укреплённого на штативе 8. для измерения перемещений на хвостовике пластины нанесены риски, которые находятся в поле зрения измерительного микроскопа. Цена деления шкалы микроскопа — 0,1 мм.

4. Обработка результатов

Результаты оформить в виде таблицы

Вопросы для самопроверки

1. Назовите виды деформаций
2. Что такое упругая деформация?
3. Что такое деформация вязкого течения?
4. Механическая модель и кривая ползучести пищевого материала отвечающая установившемуся стационарному процессу необратимого вязкого течения при постоянном значении упругой деформации
5. Опишите экспериментальную установку прибора Вейлера Ребиндера
6. Опишите Кинематическую схему прибора Д.М. Толстого

Лабораторная работа №3 Расчет трубопроводной установки для транспортирования пластично-вязкого продукта

Цель работы: Определение диаметра трубы или среднеобъемную скорость продукта, потерь давления при транспортировании, мощности, сообщаемой продукту, мощности насоса.

Методика расчета фаршепровода

Исходные параметры:

Вид продукта, производительность, масса одной загрузки, загрузок за смену, длительность перекачки, общая длинна трубопровода (см. приложение А, таблица 1).

Производительность трубопровода (кг/с)

$$M_c = \frac{M_{см}}{3600 \cdot ф_р} \qquad (1)$$

где Мсм ~ выработка в смену, кг/смену;
3600 - переводной коэффициент, с/ч;
τр - эффективное время работы в смену, ч/смену.

$$ф_c = \frac{\text{Длительность перекачки} \cdot \text{кол} - \text{во загрузок}}{3600} \qquad (2)$$

Выбираемые параметры

Скорость движения продукта по трубопроводу - ω0, м/с. Ее оптимальное значение лежит в пределах 0,1÷0,5 м/с (чем «гуще» фарш, тем меньше скорость).

Расчетные параметры

Секундный расход (м³/с) трубопровода

$$V_c = \frac{M_c}{c}, \qquad (3)$$

где ρ - плотность продукта, кг/м³. Плотность фарша:

р = 1037 - (290·φ +10,5·U) + 22·lgрт,

или ус = 1037 - (290· φ +10,5· ω)/(1 - ω)+ 22·lgрт,

где φ - жирность продукта, кг жира на 1 кг продукта;

V - влагосодержание продукта, кг влаги на 1 кг сухого остатка; ω - влажность продукта, кг влаги на 1 кг продукта;

рт - 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 маложирных видов -1030÷1040 кг/м³. Значения жирности, влагосодержания и влажности фарша выбирают по таблице 2.

Диаметр трубопровода определяют по формуле объемного расхода, по ГОСТу выбирают ближайшую величину d. (по таблице 3)

$$V_c = щ \cdot F = щ \cdot p \cdot d^2/4 = щ \cdot p \cdot R^2, \qquad (4)$$

где F - площадь живого сечения потока, м² (равна площади сечения продукта, которая нормальна вектору средней скорости);

ω - средняя скорость продукта, м/с; d - внутренний диаметр, м;

R - внутренний радиус трубопровода, м.

Действительную среднюю скорость движения продукта вычисляют по той же формуле объемного расхода.

Консистентную переменную («градиент скорости») (1/с) вычисляют по формуле:

$$и_c = \frac{4 \cdot щ}{з \cdot c} = \frac{8 \cdot щ}{з \cdot d} = \frac{4 \cdot V_c}{з \cdot (p \cdot R^3)} = \frac{32 \cdot V_c}{з \cdot (p \cdot d^3)}, \qquad (5)$$

$$\dot{\varphi}_* = \frac{32 \cdot V_c}{з \cdot (p \cdot d^3)} = \frac{8 \cdot щ}{d}, \qquad (6)$$

Консистентную переменную («напряжение сдвига») (Па) определяют по формулам:

$$и_c = B_0^* \cdot \dot{\varphi}_1 \cdot \left(\frac{3_{n+1}}{4 \cdot p}\right)^n \cdot \left(\frac{8 \cdot щ}{\dot{\varphi}_1 \cdot d}\right)^n, \qquad (7)$$

или

$$и_c = A_1 \cdot \dot{\varphi}_*^n, \qquad (8)$$

где A_1 - напряжение сдвига на стенке трубы при единичном значении относительного градиента скорости, Па;

$\dot{\varphi}_*^n$ - относительный градиент скорости на стенке (консистентная переменная);

n - индекс течения; если в логарифмических шкалах экспериментальная кривая линия спрямляется, то он равен отношению логарифмов (находят по таблице 4).

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

$$\frac{p \cdot d}{4 \cdot l} = A_1 \left[8 \cdot щ \Big/ г_1 \cdot \dot{} \cdot d \right]^n, \qquad (9)$$

$$\frac{p \cdot d}{4 \cdot l} = A_1 \cdot \varphi_*^n = и, \qquad (10)$$

$$p = \frac{4 \cdot l \cdot и}{d}, \qquad (11)$$

Мощность, сообщаемая продукту (кВт):

$$N = p \cdot V_c \cdot 10^{-3}, \qquad (12)$$

Выбор оборудования

Насос выбирают по требуемой подаче трубопровода Мс или МчАС=3600 Мс, принимая во внимание, что объемный КПД составляет 0,5÷0,6, и руководствуясь данными таблицы 5.

Мощность электродвигателя (кВт):

$$N_{эд} = \frac{a}{K_п} \cdot \left(\frac{N}{K_н} + \frac{N}{K_ш} \right), \qquad (13)$$

где а - коэффициент запаса мощности (для коротких трубопроводов до 5 м - а=2; для длинных а=1,5);

КП,КН,КШ - КПД механических передач от электродвигателя соответственно к насосу, от насоса и шнеков (питателей);

N1,NШ - полезная мощность, развиваемая насосом и шнеком, кВт. Электродвигатель выбирают по соответствующему каталогу с округлением мощности в сторону увеличения.

Лабораторная работа №4 Определение ударной вязкости готовых изделий

Цель работы:

- ознакомление с устройством типа маятникового копра для измерения энергии разрушения при ударе;
- определение ударной вязкости печенья;
- определение доверительного интервала для средней величины ударной вязкости.

Общее положение

При укладке, завёртке, упаковке и транспортировке готовых, например, кондитерских изделий должны быть обеспечены условия сохранения их товарного вида. С этой целью нужно знать механические характеристики готовых изделий.

Одной из механических характеристик прочности при динамических нагрузках является ударная вязкость.

Напряжения и деформации при ударной нагрузке существенно превышают напряжения и деформации, получаемые при статическом нагружении упругой системы той же по величине силой.

При ударе частицы упругой системы начинают перемещаться. Из-за инерционности материала перемещение частиц происходит не одновременно, а в виде волны деформаций, движущейся со скоростью распространения звука в данной среде. Одновременно с увеличением напряжений и деформаций при ударной нагрузке упругой системы изменяется также сопротивляемость материалов ударному воздействию.

Точных способов определения сопротивляемости материалов ударному воздействии пока не имеется в виду сложности процесса соударения тел.

В настоящее время широко распространён лишь один вид испытания на удар, а именно - определение количества энергии, идущей на разрушение образца материала.

Образец материала разрушают изгибающий ударом. Критерием способности материала противостоять удару является удельная ударная вязкость а. Она равна величине энергии u , затрачиваемой на разрушение образца, отнесённой к площади поперечного сечения образца F=h*B , где h и B - размеры поперечного сечения по месту разрушения. Считая, что эта энергия равна работе внешних сил, получили

$$a = \frac{A}{F}, \text{Н·м/м}^2 \qquad (1)$$

Порядок выполнения работы

Вначале определяется работа потерь маятника при холостом ходе. Маятник отклоняют на неопределённый угол α, отсчитываемый от

вертикали и фиксируемый по шкале 6. Затем собачка выводится из зацепления с храповым колесом, и пятник под действием собственного веса начинает падать, одновременно поворачивая шкалу 3. Угол взлёта, отсчитываемый от вертикали, фиксируется на этой шкале, затем на опоры 10 и 12 кладут печенье, снова поднимают маятник на угол а и отпускают его.

При падении маятник разбивает лежащее на его пути печенье и за счёт, оставшегося запаса кинетической энергии продолжает перемещаться. Конечный угол взлёта β отмечается на шкале 3.

3. Схема лабораторной установки

На рисунке 1 представлено устройство для измерения энергии разрушении печенья. Основным рабочим органом устройства является маятник 7, подвешенный между стойками 1 и 2 на оси 5. На этой оси закреплена градуированная шкала 6, которая поворачивается вместе с маятником. Угол поворота маятника фиксируется на шкале с помощью неподвижной стрелки, укреплённой на стойке 1. С другой стороны маятника на его оси свободно установлена поворотная

градуированная шкала 3, которая поворачивается в направлении рабочего хода маятника при взаимодействии со специальным пальцем, закреп лённым на маятнике. Величина поворота, а следовательно, и максимального отклонения маятника от вертикали отличается с помощью неподвижной указательной стрелки 4 на стойке 1.

На оси качания маятника имеется храповое колесо, которое взаимодействует с подпружиненной собачкой. Это устройство позволяет зафиксировать маятник при взводе после поворота его на заданный угол. Выведение собачки из зацепления с храповым колесом - и тем самым освобождение маятника осуществляется вручную с помощью кулачка и рычага, расположенного на стойке 2 внизу.

На стойках имеются опоры 9 и 10 для размещения на них испытуемого образца 8. для установки прибора строго по отвесу предусмотрены три регулировочных винта 11.

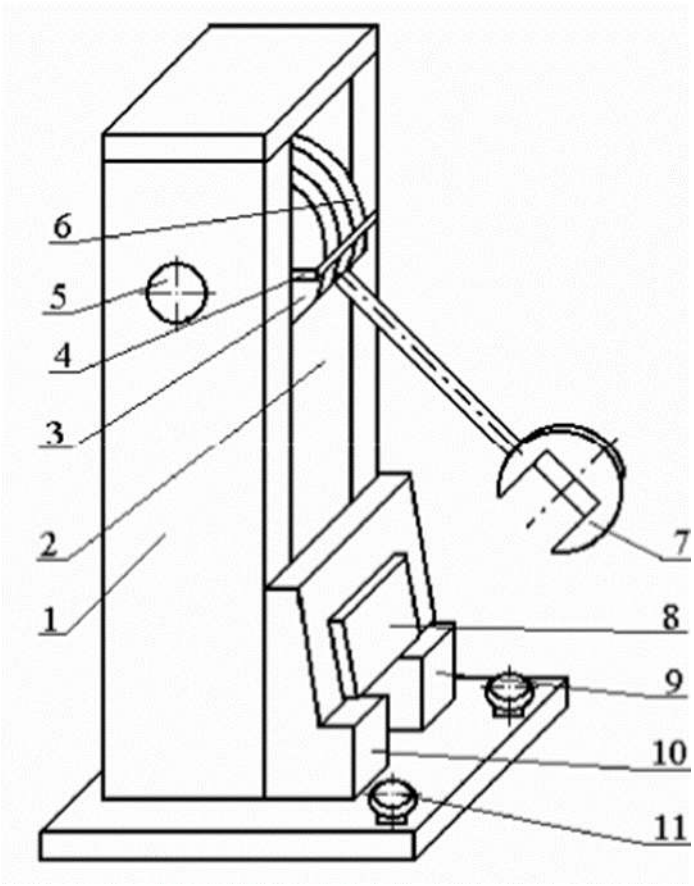


Рисунок 1 - Схема устройства для определения ударной вязкости

Обработка результатов

Работа, затраченная на разрушение печенья, определяется зависимостью

$$A = mgl(\cos\beta - \cos\alpha - (\cos\gamma - \cos\alpha)\frac{\alpha+\beta}{\alpha+\gamma}, \qquad (2)$$

где α - угол подъёма маятника;

m - масса маятника, кг;

l - приведенная длина маятника;

γ - угол взлёта маятника при холостом ходе;

β- угол взлёта маятника после разрушения образца (рисунок 2)

Чтобы определить приведенную длину маятника, экспериментально определим период качания маятника Т. Зная период качания маятника Т, по формуле (3) находим приведенную длину маятника

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{1}{g}}, \text{c} \qquad (3)$$

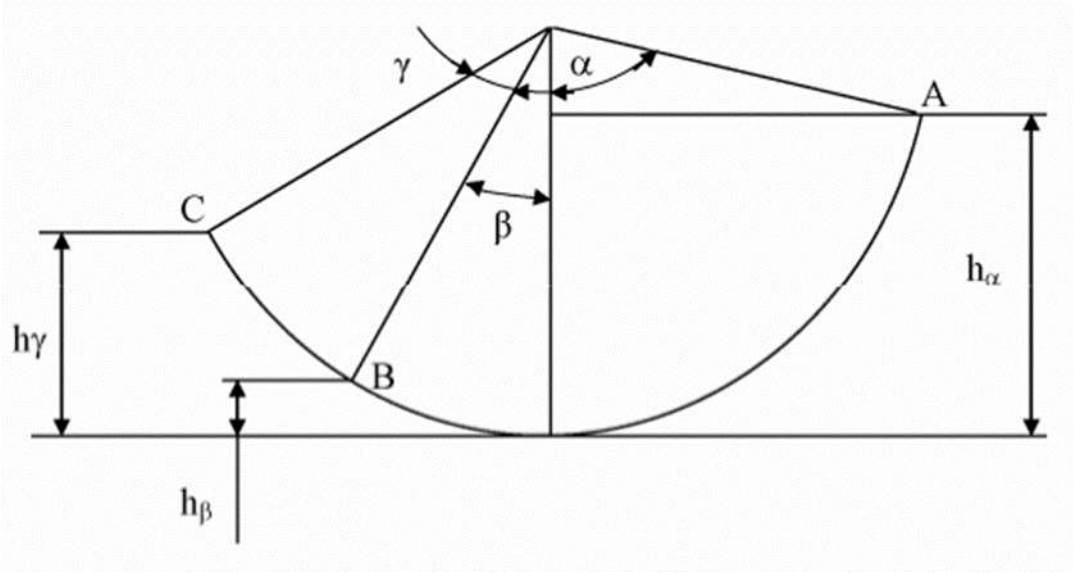


Рисунок 2- Схема движения маятника при ударе

Вопросы для самопроверки

1. Как определить приведенную длину маятника?
2. Описать схему устройства для определения ударной вязкости
3. Как определяется работа потерь маятника при холостом ходе?
4. Опишите устройство типа маятникового копра для измерения энергии разрушения при ударе.
5. Как определить ударную вязкость печенья?
6. Как определить доверительный интервал для средней величины ударной вязкости?

Лабораторная работа №5 Определение предельного напряжения сдвига методом пенетрации и проверка его инвариантности

Цель работы: ознакомиться с теорией конических пластометров, существующими конструкциями, принципом работы; методиками измерения и расчета; провести исследование коэффициентов пропорциональности, предложенных различными авторами.

Порядок выполнения лабораторной работы:

1. Ознакомиться с конструкцией используемого прибора, принципом действия и основными характеристиками, (конический пластометр М.П. Воларовича КП–3, схема которого представлена на рис.1).

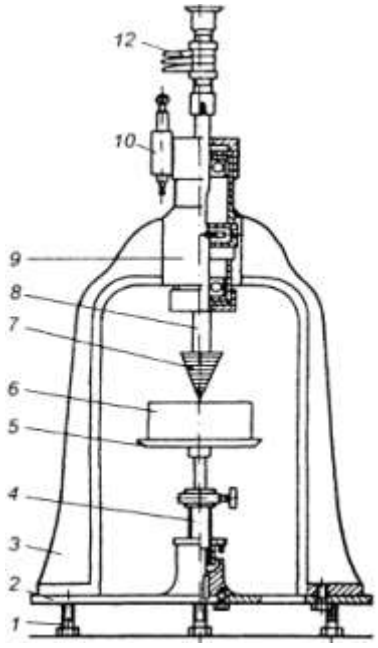


Рис. 1. Конический

пластометр: КП-3:

1 – установочные винты; 2 – основание; 3 – станина; 4 – винт подъема столика;

2. Подготовить исследуемый образец к проведению измерения величины пенетрации.

3. Подготовка образца. Заполнить контейнер исследуемой вязкопластичной средой с помощью шпателя. Провести подпрессовку образца в течение 180 с. При использовании упруго-эластичной системы образец нарезается высотой 50 мм.

4. Термостатировать исследуемый образец до заданной температуры (если необходимо).

5. Подготовить прибор к измерениям: поставить заданный индентор и установить дополнительный груз.

6. Провести измерения пенетрации за 180 с с использованием конических инденторов с различными углами при вершине. Все эксперименты проводятся на одном виде образца, при этом при использовании другого конуса закладка и подготовка образца к измерению производится заново.

7. Повторность измерения на каждом образце не менее 3 раз.

8. Все полученные результаты заносятся в журнал наблюдений, табл. 6.5.

9. Убрать рабочее место, тщательно вымыть индентор.

Составление отчета и обработка опытных данных:

1. Рассчитать среднее значение максимальной глубины погружения индентора в продукт, т.е. за 180 с:

$$h_{ср} = (h_1 + h_2 + h_3)/3, м.$$

2. Определить погрешность измерения величины h:

$$\Delta_h = [(h_{ср} - h_i)/h_{ср}] \cdot 100, \%.$$

3. Рассчитать величины предельного напряжения сдвига с учетом коэффициентов пропорциональности, предложенных различными авторами (табл. 2):

$$\tau_0 = k_\alpha \frac{F}{h_{cp}^2}.$$

4. Анализировать величины предельного напряжения сдвига, полученные с использованием конических инденторов с различным углом

при вершине и рассчитанные с учетом различных коэффициентов пропорциональности.

Таблица 1

Экспериментальные данные

Угол конуса α, град.		Нагрузка, F, Н	Глубина погружения, h, мм	Средняя глубина погружения, $h_{ср}$, мм	Напряжение сдвига τ_0, Па				
					$K_{\alpha1}$	$K_{\alpha2}$	$K_{\alpha3}$	$K_{\alpha4}$	$K_{\alpha5}$
30°	1								
	2								
	3								
60°	1								
	2								
	3								
90°	1								
	2								
	3								

Таблица 2 Значения коэффициентов пропорциональности K_α в зависимости от полного угла при вершине конуса

	Значения K_α при углах α:			
	30°	45°	60°	90°
$K_{\alpha1}$;	1,11	0,658	0,415	0,159
$K_{\alpha2}$;	0,959	0,416	0,214	0,073
$K_{\alpha3}$;	0,456	0,286	0,164	0,0657
$K_{\alpha4}$;	0,663	0,348	0,213	0,0866
$K_{\alpha5}$.	0,976	0,410	0,210	0,0700

Примечание: $K_{\alpha1}$ – Ребиндер; $K_{\alpha2}$ – Н. Н. Агранат, М. Ф. Широков; $K_{\alpha3}$ – В. А. Арет, А. Н. Пирогов; $K_{\alpha4}$ – Горбатов А. В., Косой В. Д.; $K_{\alpha5}$ – В. Д. Карпычев, В. Д. Косой.

5. Определить какой коэффициент пропорциональности обеспечивает значение предельного напряжения сдвига с минимальной погрешностью при использовании конических инденторов с различным углом при вершине.

6. Сделать вывод по лабораторной работе.

Вопросы для самоконтроля

1. В чем состоит цель работы?
2. Что называется пенетрацией?
3. На какие группы подразделяются пенетрометры?
4. Что такое предельное напряжение сдвига?
5. Какие пищевые системы называются твердообразными?
6. На каких приборах определяется предельное напряжение сдвига?
7. Принцип работы конических пластометров.
8. Какие факторы влияют на величину предельного напряжения сдвига?
9. Напишите формулу П.А. Ребиндера для определения предельного напряжения сдвига.
10. Расскажите устройство лабораторного прибора.
11. Как понимать термин «инвариантность»?

Лабораторная работа №6 Исследование процесса релаксации

Цель работы:

Ознакомиться с теорией релаксационных процессов и приборами для их изучения, принципом работы; методиками измерения и расчета; провести исследование релаксационных процессов твердообразных пищевых масс.

Порядок выполнения лабораторной работы:

1. Ознакомиться с теоретической частью работы (прослушав преподавателя и самостоятельно).

2. Подготовить лабораторную установку к проведению исследований.

3. Провести измерения в трех повторностях, данные занести в таблицу 1.

4. Построить релаксационные кривые, определить период релаксации.

5. Сделать выводы по лабораторной работе.

Описание экспериментальной установки. Экспериментальной установкой является структурометр.

Методика проведения эксперимента. 1. После выбора режима задают значения F_0, V, F. По нажатию кнопки «СТАРТ» значения F и H обнуляются. Столик движется вверх с заданной скоростью. При достижении F_0 начинается отсчет перемещения. Текущие значения усилия и перемещения выводятся на индикатор и самописец. При достижении заданного значения F дается короткий звуковой сигнал, столик останавливается, начинается подсчет времени релаксации. Подсчет времени будет продолжаться до тех пор, пока не установится постоянное значение F. Дается короткий звуковой сигнал. Столик с максимальной скоростью опускается вниз в исходное положение. На индикатор вводятся значение перемещения, при котором усилие равно F, и время релаксации T. Опыт завершен.

2. Опыт необходимо провести в трех повторностях, все данные занести в таблицу 1., построить кривую релаксации по осредненным данным эксперимента. Сделать вывод по лабораторной работе.

Таблица 1.

Экспериментальные данные

Время, *T*, с	Нагрузка, *F*, Н.			
	F_1	F_2	F_3	$F_{ср}$
3				
5				
10				

Вопросы для самоконтроля

1. Какова цель лабораторной работы?
2. Опишите основные элементы лабораторной установки.
3. Какова природа процессов релаксации?
4. Какие уравнения применяют для описания процесса релаксации в пищевых системах?
5. Что называется периодом релаксации?

6. Изобразите кривую релаксации, характерную для твердообразных систем.

7. Какая механическая реологическая модель описывает релаксационные процессы?

Лабораторная работа №7 Измерение реологических свойств на ротационном вискозиметре с постоянным крутящим моментом

Цель работы: изучение методики определения реологических свойств материалов; получение навыков работы с кривыми течения.

Методика проведения эксперимента.

1.Ознакомиться с устройством и работой прибора, с порядком работы.

2.Для построения кривой трения подшипников $m_{тр} = f(N)$ при незаполненном приборе, необходимо на конец каждой нити подвешивать равные грузы последовательно по 0,5 – 1,0; 2,0; 3,0; 4,0; 5,0; 8, 10, 12, 14 и т.д. грамм; замерять время (в с) пяти оборотов шкива при соответствующей нагрузке; построить зависимость частоты вращения (числа оборотов) в с от массы грузов. Для РВ-8 трение в подшипниках $m_{тр}$ можно принять равным 3 г.

3.Снять стакан и заполнить его исследуемым материалом. В стакан РВ-8 заложить 30 – 40 г материала.

4.Установить стакан и приготовить прибор для измерений.

5.Измерения проводится следующим образом: на чашки устанавливаются равные грузы (вначале 10 – 200 г в зависимости от свойств измеряемого продукта и диаметра ротора, чем меньше диаметр, тем меньше груз); отводится тормозное приспособление от шкива и включается секундомер; после пяти оборотов одновременно останавливается подвижная система и секундомер (если шкив вращается очень медленно, то можно остановить его через один оборот). Следующие измерения производят при увеличенных на 5 – 20 г грузах. Последним может быть измерение, при котором время пяти оборотов составляет 1,5 – 2,5 сек. Далее производят измерения с последовательным уменьшением величины грузов, всего их следует сделать

15 – 20. Вес грузов слагается из веса гирь на двух чашках и веса чашек, который записан на оборотной стороне одной из них. Данные измерений заносятся в табл. 2.

6.Разобрать прибор, отметить высоту h контакта рифленой части ротора с исследуемым материалом по оставленным следам на роторе.

Постоянные прибора и опыта:

радиус ротора $R_в$ =

радиус стакана $R_н$ =

радиус шкива R =

высота материала h =

константы опыта К, $К_0$, $К_1$, $К_2$ =

Примечание: Расчет пластической вязкости и предельного напряжения сдвига выполняется в отдельной таблице.

Таблица 2

Результаты измерений

№ п/п	Время, ч.мин.	Масса гирь m' и чашек $m_ч$ $m = m' + m_ч$, кг	Действ. масса грузов $m_д = m - m_{гр}$, кг	Напряжение сдвига τ_0, Па	Кинематическая характеристика вращения ротора				Эффективная вязкость $\eta_{эф}$, Па/с	Температура T, °С
					Число оборотов n	Время t, с	Частота вращения N, $с^{-1}$	Окружная скорость вращения ротора w, м/с		

Составление отчета и обработка опытных данных

1.Работа оформляется на листах писчей бумаги (120 х 290 мм) и сдается преподавателю в сброшюрованном виде. Без сдачи теоретического материала и оформленной работы студенты к дальнейшим занятиям не допускаются.

2.Графическая часть состоит из схематического разреза прибора с основными размерами (диаметр шкива, ротора, внутренний диаметр стакана, высота материала в приборе) и графиков (см. ниже).

3.Определяется трение в подшипниках. По данным соответствующих измерений строится графическая зависимость частоты вращения (числа оборотов) ротора в с от массы грузов m или напряжения τ по формуле (6.9).

4.Вычислить кинематические характеристики: число оборотов ротора или стакана в с т.е. частоту вращения (общее число оборотов, деленное на время в с), относительную окружную скорость вращения ротора ($N = n / t$, с$^{-1}$, $w = 2\,\pi\, R\, N$, м/с).

5.Вычислить действительные значения, вращающих ротор, массы m. Для РВ-8 полезная масса грузов будет равна массе гирь и чашек за вычетом трех граммов.

6.Вычислить значения констант прибора для данного опыта в зависимости от высоты контакта (h, м) ротора с исследуемой системой (продуктом):

$$K = R_{д} / \left\{8\pi^2 \left[R_{н}^2 R_{в}^2 h / \left(R_{н}^2 - R_{в}^2\right) + \left(R_{н}^3 R_{в}^3\right) / \left(R_{н}^3 - R_{в}^3\right)\right]\right\}, \qquad (6.5)$$

$$K_0 = R_{д} / \left[2\pi R_{в}^2 \left(h + \pi R_{в} / 4\right)\right], \qquad (6.6)$$

$$K_1 = 2\pi R_{н}^2 h / R_{д}\,, \qquad (6.7)$$

$$K_2 = 2{,}303 \lg\left(R_{н} / R_{в}\right) / 2\pi\,, \qquad (6.8)$$

Для удобства расчета на рис. 6.2 приведена графическая зависимость констант от глубины погружения ротора в продукт.

7.Вычислить эффективную вязкость для каждого измерения. Построить график зависимости эффективной вязкости $\eta_{эф}$ в Па с (кг/м·с) от окружной скорости w, т.е. линейной скорости при вращении в м/с в логарифмических шкалах. Через полученные точки провести прямую линию так, чтобы она делила расстояния между точками на равные части. Подобрать коэффициенты к уравнению этой прямой (1.17).

8.Вычислить напряжение сдвига на поверхности ротора по формуле:

$$\tau = K_0 \cdot m. \qquad (6.9)$$

9.Построить график зависимости частоты вращения N (числа оборотов в секунду) от напряжения сдвига τ: через нанесенные на миллиметровую бумагу экспериментальные точки провести плавную кривую. Здесь возможно наличие двух кривых – одна при увеличивающихся грузах, другая – при уменьшающихся. Дальнейшие расчеты по этим кривым производить отдельно.

10. Вычислить предельное напряжение сдвига и пластическую вязкость, при этом точки для вычислений брать непосредственно с кривой (вычислять по точкам кривой, а не по экспериментальным).

В процессе вычисления, если величины получаются неодинаковыми, следует немного изменять ход кривой, особенно при малых числах оборотов. Если величины пластической вязкости получаются увеличивающимися или, наоборот, уменьшающимися, следует немного изменить величину предельного напряжения сдвига (отрезка, отсекаемого кривой на оси абсцисс). Корректировку кривой можно осуществить в пределах экспериментальных точек так, чтобы кривая не проходила бы вдали от них.

А) Предельное напряжение сдвига соответствует величине отрезка, отсекаемого кривой $N(\tau)$ на оси абсцисс τ_0 и определяется по формуле:

$$\tau_0 = K_0 \cdot m_0, \qquad (6.10)$$

Б) Пластическая вязкость в зависимости от того, распространяется ли сдвиг на всю толщину кольца материала, рассчитывается по одной из двух приведенных ниже формул.

Первый случай – сдвиг распространяется на всю толщину кольца, когда нагрузка $т_0$ больше нагрузки $т_1 = К_1 \cdot \tau_0$:

$$\eta = (1/N)(K \cdot m - K_2 \cdot \tau_0). \qquad (6.11)$$

Все величины, необходимые для расчета пластической вязкости, когда сдвиг распространяется на всю толщину кольца материала, сводят в таблицу 6.4.

Таблица 6.4

Константы опыта K = …….. K_2 = ……..					
N	P	$K\,m$	$K_2\,\tau_0$	$K \cdot m - K_2 \cdot \tau_0$	$\eta = (1/N)(K \cdot m - K_2 \cdot \tau_0)$

I. Расчет при величине предельного напряжения сдвига, равном τ_{01} =
II. Расчет при другой величине предельного напряжения сдвига, τ_{02} =

III. Расчет при другой величине, предельного напряжения сдвига τ_{031} = и т.д.

Второй случай – сдвиг не распространяется на всю толщину кольца, когда нагрузка m_0 меньше нагрузки $т_1$:

$$\eta_{пл} = (\tau_0/N) \cdot 1/4\pi\,[m/m_0 - 1 - \ln(m/m_0)]. \qquad (6.12)$$

11. Все окончательные величины – коэффициенты В и т к формуле эффективной вязкости, пластическую вязкость и предельное напряжение сдвига выписать в отдельную таблицу.

Расчет пластической вязкости, когда сдвиг не распространяется на всю толщину кольца материала:

I. Расчет при $т_{01}$ = и τ_{01} =
II. Расчет при других $т_{02}$ = и τ_{02} =
III. Расчет при других $т_{03}$ = и τ_{03} = и т.д.

12. По действительным массам грузов или рассчитанным напряжениям и соответствующим им величинам частоты вращения (чисел оборотов), взятых с откорректированной кривой N/(τ), вычислить значения эффективной вязкости и относительной окружной скорости вращения ротора; вычисления свести в таблицу. Полученные точки нанести на кривую $\eta_{эф}$(w), но обозначить их иначе, чем опытные точки, например, квадратиком или треугольником. Через соответствующие точки провести уточненную прямую, подобрать уравнение этой

прямой и внести уточненные коэффициенты В и т в сводную таблицу (см. пункт 11).

Если получается реограмма подчиняющаяся модели Гершеля-Балкли (рис. 1.7), или производя аппроксимацию кривой течения вязко-пластичной системы (рис. 6.1, а) то определяем:

а) статическое τ_0 и динамическое τ_{01} предельное напряжение сдвига по точкам пересечения соответственно прямой пластического (шведовского) течения и вязко-пластичного (бингамовского) течения с осью абсцисс, т. е. когда $\dot{\gamma} = 0$;

б) по котангенсу угла наклона (α, β) соответствующей прямой (рис. 1.7) находим максимальную (шведовскую η_0) и минимальную (бингамовскую η_m) пластическую вязкость (1.17 и 1.17);

в) эффективную вязкость по логарифмическим, графической зависимости $\eta_{эф} = f(\dot{\gamma})$, подчиняющейся уравнению (1.15) разбивается так же, как и реограмма, на две зоны: для пластического и вязко-пластического течения с критическими значениями градиента скорости ($\dot{\gamma}_{кр}$). Для каждой зоны определяются свои значения B_0^* и m;

г) полученные реологические характеристики сводятся в общую таблицу для первой (шведовской) зоны (τ_0, η_0, B_0^*, $т_1$) и второй (бингамовской) зоны ($\tau_{0д}$, η_m, B_{02}^*, $т_2$), а также $\dot{\gamma}_{кр}$.

13. Сделать вывод по лабораторной работе.

Вопросы для самоконтроля:

1. Конструкция вискозиметра РВ-8.
2. Какие возможности повышения точности измерения ротационных вискозиметров типа РВ-8?
3. Расскажите порядок работы и методику измерений на вискозиметре РВ-8.
4. По какой формуле рассчитывается предельное напряжение сдвига и как определяем графически предельное напряжение сдвига?
5. Какие два случая расчета пластичной вязкости вы знаете и их принципиальное отличие

Лабораторная работа № 8 Определение и расчет прочностных свойств пищевых материалов при динамической нагрузке

Цель работы: определить предел прочности пищевых продуктов на примере макаронных изделий.

Общие сведения: хрупкие пищевые материалы составляют достаточно большую группу готовых пищевых продуктов.

Хрупкость -свойство твердых тел достигать разрушения без пластической деформации. Идеально упругие тела (тела Гука) обнаруживают хрупкое разрушение при любой скорости деформации.

У негуковских тел хрупкое разрушение наступает только при высоких скоростях деформации или низких температурах, когда теряют действие вязкие свойства.

Принято считать, что основной механической характеристикой хрупких материалов является предел прочности.

Пределом прочности называется напряжение, при котором наблюдается разрушение материала: появляются трещины или происходит излом.

Прочность пищевых материалов и готовых изделий учитывается при расчете технологических операций, связанных с транспортированием, упаковкой, хранением. Качество некоторых пищевых продуктов и полуфабрикатов зависит от их прочности. Поэтому разработка методов и создание приборов для определения прочностных характеристик и прежде всего предала прочности пищевых продуктов и полуфабрикатов предоставляет собой актуальную задачу, имеющую важное практическое значение.

Описание экспериментальной установки

Лабораторная работа выполняется на структурометре (рис. 2) в режиме № 2.

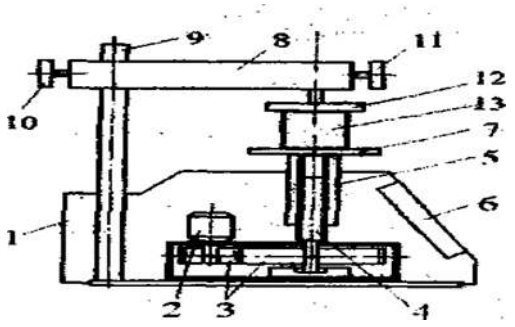


Рис.2 Схема структурометра.

1 - корпус; 2 -шаговый двигатель; 3 - косозубые щестерни; 4 -винт; 5 - гайка; 6 - блок управления; 7 - столик; 8 -измерительная головка; 9 - штанга; 10 - винт для крепления измерительнойголовки;11 - винт длякрепления телапенетрапли; 12- сменный индентор; 13 -проба исследуемого пищевого продукта.

В корпусе 1 структурометра смонтированы: электромеханический привод, состоящий из шагов двигателя 2, пары косозубых шестерен 3, винта 4 и гайки 5 и блок управления 6, включающий в себя клавиатуру и цифровой индикатор.

Гайка 5 жестко связана с подвижным столиком 7, при помощи шагового двигателя столик может перемещаться в вертикальном направлении с заданной скоростью. Над столиком размещается измерительная головка 8, которая перемещается вдоль вертикальной штанги 9 и фиксируется в любом месте с помощью винта 10. Винт 11 служит для закрепления в измерительной головке сменного тела пенетрации 12. Внутри измерительной головки находится тензометрическая балка, с помощью которой усилие, действующее на сменный инструмент со

стороны исследуемого материала, преобразуется в цифровой электрический сигнал и передается с помощью кабеля на блок управления.

На лицевой панели блока управления размещаются цифровой индикатор и клавиатура, которые позволяют вводить и выводить буквенно-цифровую информацию.

На задней панели размещаются клемма для подключения заземления, держатели предохранителей, выключатель, разъемы для подключения измерительной головки, графопостроителя и персонального компьютера.

В измерительной головке 2 размещается тензопреобразователь силы, ось которого соединяется с узлом

крепления индентора. Инструмент 5 в измерительной головке закрепляется с помощью двух винтов 6.

Структурометр комплектуется набором сменных инструментов (приложение 1).

Клавиатура содержит20 управляющих кнопок (рис. 3) /СТАРТ/ - запуск режима.

/СТОП/ - отмена режима (экстренный останов процесса измерения). Ранее введенныепараметры сохраняются.

/↑/ - движение столика вверх /↓/-движение столика вниз.

СТАР	РЕЖ	код	1	2	3	4
СТОП	↑	|	5	6	7	8
	ОСТ	*	9	0	ЗБ	ВК

Рис. 3 - Внешний вид клавиатуры структурометра.

Однократное нажатие кнопок /I/и /I/вызывает перемещение столика на один шаг (0,0025 мм) в соответствующем направлении. При удержании кнопки столик перемещается с максимальной скоростьюv=100 мм/мин.

/РЕЖ/ - задание режимов работы структурометра.

/КОД/ - код операции (задание коэффициентов для графопостроителя, задание периода сравнения при определении времени релаксации, задание коэффициента сжатия кпри записи данных в память структурометра. Код вводится до выбора режима работы структурометра. После ввода номера режима клавиша /КОД/ не равняет.

/ОСТ/ - останов. При нажатии кнопки процесс измерений приостанавливается. Возобновление измерений производится нажатием кнопки /СТАРТ/.

/*/ - при вводе дробных чисел заменяет запятую, а при управлении структурометром вызывает перемещение столика в нижнее положение.

/ЗБ/ - забой. Служит для исправления ошибок при вводе цифровой информации. При нажатии кнопки последний введенный символ стирается (еслинебыланажатакнопка/ВКУ).

/ВК/ - кнопка ввода информации в память структурометра. **Подготовка структурометра к работе**

Установить измерительную головку 2 на штангу 3 и зафиксировать еѐ с помощью винта 6 (см. рис. 2). Подключить кабель измерительной головки к соответствующемугнездуна задней панели прибора.

Техническаяхарактеристикаструктурометра Приборработаетвследующих режимах:

режим 1 - определение упругих и пластических деформаций; *режим 2* - определение прочностных свойств при изгибе и резании; *режим3* - определениеадгезионных свойств;

режим4 - исследованиерелаксационных процессов; *режим 5* - исследование кинетики деформации; *режим 6* -определение нормальных напряжений;

режим7 - определениевремени релаксации при заданной нагрузке; *режим 8* - определение прочностных свойств и времени релаксации при

заданномперемещении столика.

Режимы работы структурометра различаютсяперечнем задаваемых параметрови типомциклограммыдвижениястолика.
Задаваемые величины:
1.усилие *F0* при отработке режима - в пределах 1... 100 Н с шагом 1 Н.
2.усилие *F* при отработке режима - в пределах 1... 100 Н с шагом 1 Н.
3.скорость движения столика*υ*- в пределах 0...100 мм/мин с шагом 1 мм/мин.
4.продолжительность задаваемой паузы tп - в пределах 0...300 с шагом 1 с.
Диапазон измерения перемещения 0...43 мм с точностью 0,01 мм. Циклограмма первого типа применяется в режимах 1, 2 и 4. В остальных режимах применяется циклограмма второго типа.
Схема измерительной системы показана на рис.3.

Особенностью конструкции является то, что исследуемую пробу помещают специальное опорное устройство (поз. 12, приложение 2), которое устанавливается на столик. Сменный инструмент представляет собой стальную пластину (насадка № *9*, приложение 2).

Подготовка проб

Для исследований необходимо подготовить пробы длинных макаронных изделий различных диаметров длиной 250 мм по 5 шт. каждого диаметра. Каждую пробу необходимо измерить и пронумеровать. Размеры проб занести в таблицу.

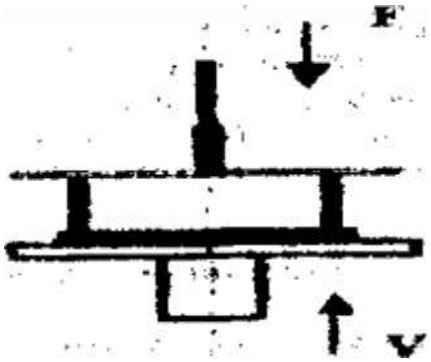


Рис.3 Схема измерительной системы.

Методика проведения исследований Подготовка прибора к работе

Установить измерительную головку 2 на штангу 3 и зафиксировать ее с помощью винта 6 (см. рис.2). Подключить кабель измерительной головки к гнезду на задней панели прибора. Соединение структурометра с компьютером не требуется.

Включить питание и, пользуясь клавишей /↑/, поднять столик, оставив зазор 3-5 мм между ножом и пробой.

Установить режим № 2 и задаваемые величины: усилие касания *F0* = 0,5Н;

скорость перемещения столика *υ*= 20 мм/мин. Прибор готов к измерениям.

<u>Порядок измерений.</u> Отработка режима № 2 производится в соответствии с лабораторной работой № 1.

После нажатия кнопки /СТАРТ/ нож надавливает на пробу, вызывая ее изгиб, и при достижении предела прочности проба разрушается. Столик возвращается в исходное положение.

По окончании измерения необходимо записать в таблицу наблюдений величину усилия разрушения и соответствующее перемещение столика (деформацию пробы).

Опыт повторить не менее 5 раз. **Обработка результатов измерений**

Предел прочности определяется по формулам, известным из курса сопротивления материалов, т.к. в процессе измерений происходит изгиб пробы цилиндрической формы, лежащей на двух опорах (рис.4).

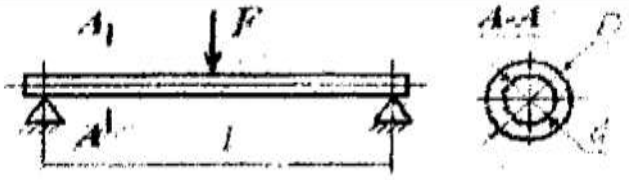


Рис.4 Расчетная схема для определения величины σ изг.

В этом случае напряжение σизг, возникающее в пробе, равно $\sigma_{изг} = \frac{Fl}{4W}$ *Па* (1).

где *F* - усилие, Н;

l - расстояние между опорами, м;

W - момент сопротивления поперечного сечения пробы, м3. Величина *W* зависит от формы поперечного сечения.

- для крупного сечения:

W=0,1D3 - для кольцевого сечения:

W=0,1D3(1-c4) причем *c=d/D* ,

где *D* - внешний диаметр пробы, м; *d* - внутренний диаметр пробы, м.

Результаты вычислений записать в таблицу расчетных значений. Вычислить среднее значение предела прочности и доверительный

интервал.

Содержание протокола лабораторной работы Наименование лабораторной работы.
Цель проведения работы.
Схема экспериментальной установки. Исходные данные:
Наименование исследуемого материала. Усилие касания(F0),Н. Скорость нагружения (υ),мм/мин
Таблица 1. Характеристика проб

Номер пробы	Длина, мм	Диаметр, мм		Момент сопротивления,
		наружный	внутренний	
1	2	3	4	5
1				
2				
3				

Таблица 2. Результаты наблюдений

№пп	Усилие разруше-ния, Н	Деформа-ция, мм	Предел прочно-сти, Па	Среднее значение предела прочно-	Доверитель-ный интервал

Примечание: порядковый номер соответствует номеру пробы. Расчеты.

Выводы. **Контрольные вопросы:**

1.Чтоназываетсяпределомпрочности?

2.Вкакихединицахизмеряетсяпределпрочности?

3.Какопределитьпределпрочностиприсжатииматериала?

Лабораторная работа № 9 Расчеты по некоторым разделам реологии (Определение коэффициента динамической вязкости. Процесс релаксации напряжений. Процесс течения жидкостей)

Определение коэффициента динамической вязкости

Понятие вязкости является одним из важнейших в реологии и поэтому требует отдельного рассмотрения. Вязкость – это свойство пищевого материала противодействовать сдвиговому течению. Под течением подразумевается состояние движения среды, при котором изменение скоростей сдвига вызывает изменение противодействующих течению сил внутреннего трения (касательных напряжений). С энергетической точки зрения, коэффициент вязкости есть мера диссипации механической энергии, или мера рассеяния в тепло механической энергии движущейся жидкостью. Это можно выразить в формуле

$$\tau = \mu\dot{\gamma},$$

где τ – касательные напряжения; μ – коэффициент динамической вязкости; γ– скорость сдвига.

Пример: В результате вискозиметрирования молочной сыворотки получена таблица значений напряжений τ, Па и скоростей сдвига

γ, $с^{-1}$. Необходимо определить коэффициент динамической вязкости μ, Па·с методом средних и построить график зависимости $\gamma = f(\tau)$.

Дано:

τ, Па	4	17	22	34	41,5	50	53,5	62	70
γ, $с^{-1}$	20	30	65	115	90	140	125	182	180

Рассчитываем по формуле $\tau = \mu\dot{\gamma}$, откуда

$$\mu = \frac{\sum \tau_i}{\sum \dot{\gamma}_i} = \frac{4+17+22+34+41{,}5+50+53{,}5+62+70}{20+30+65+90+140+125+182+180+115} = 0{,}37 \text{ Па·с.}$$

Течение ньютоновской жидкости

Линейный закон вязкого течения Ньютона можно записать в виде

$$dF = \mu \frac{dv}{dx} dS,$$

где dF – сила внутреннего трения на элементарной площадке;

dS –площадь элементарной площадки;

$\frac{dv}{dx}$ – градиент скорости движения

слоев в направлении, перпендикулярном к поверхности слоев (ско- рость сдвига); μ – коэффициент динамической вязкости.

Задания:

1. Определить объемный расход Q, $м^3/с$ при ламинарном течении в трубе ньютоновской жидкости.

2. Определить объемный расход Q, м^3/с и среднюю скорость $v_{ср}$, м/с, при которых поток переходит из ламинарного режима в турбулентный.

Дано:
коэффициент динамической вязкости жидкости μ = 0,37 Па·с; радиус трубы R = 0,05 м;
длина трубы L = 500 м;
Rекр = 2300:
перепад давлений Δр = 340000 Па.

Решение:

1. $Q = \dfrac{\Delta p \pi R^4}{8L\mu} = \dfrac{340000 \cdot 3{,}14 \cdot 0{,}05^4}{8 \cdot 500 \cdot 0{,}37} = 0{,}0045$ м^3/с.

2. $Re_{кр} = \dfrac{v_{ср} D \rho}{\mu}$,

откуда

$$v_{ср} = \frac{Re_{кр}\mu}{D\rho} = \frac{2300 \cdot 0{,}37}{0{,}1 \cdot 1000} = 8{,}51 \text{ м/с}, \; Q = v_{ср}S,$$

где S – площадь поперечного сечения трубы,

$$S = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{3{,}14 \cdot 0{,}1^2}{4} = 0{,}00785 \text{ м}^2;$$

$$Q = 8{,}51 \cdot 0{,}00785 = 0{,}067 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Ответ: при $v_{ср}$ = 8,51 м/с поток переходит из ламинарного режима в турбулентный.

Течение степенной жидкости (Оствальда –Де Виля)

Многие пищевые среды, состоящие из природных органических полимеров, являются сложными дисперсными системами и не подчиняются закону вязкости Ньютона. Такие жидкости называются неньютоновскими. Иногда в литературе встречается термин – ано-

мальные. Их вязкостные свойства нельзя описать одним параметром – коэффициентом вязкости. Эти свойства исследуются с помощью вискозиметров и различных реометров. Примером таких жидкостей могут быть степенные жидкости, которые описываются законом Оствальда–Де Виля.

$$\tau = k\dot{\gamma}^n,$$

где k – реологическая константа, коэффициент консистенции; n – реологическая константа, индекс течения.

Этим законом описывается течение очень многих искусственных полимеров, а также смесей натуральных биологических органических полимеров – пищевых сред.

Кривая 1 (рис. 1) получена при обработке экспериментальных данных с использованием эмпирической формулы в виде полинома

$$\dot{\gamma} = a_0 + a_1\tau + a_2\tau^2 + \ldots + a_n\tau^n$$

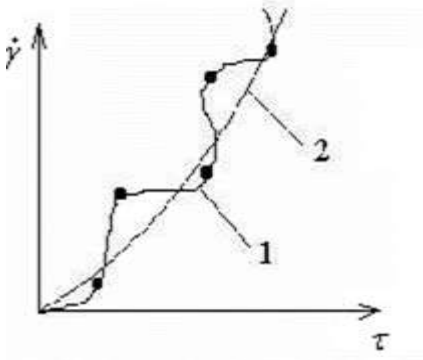


Рис. 1. Реологическая кривая течения в координатах напряжение – скорость сдвига:

1 – кривая по точной интерполяционной формуле; *2* – действительная физически и экспериментально обоснованная кривая течения Оствальда–Де Виля для степенной жидкости

<u>Задание:</u>

Определить объемный расход Q, м^3/с при ламинарном течении в трубе степенной жидкости.

Дано:

радиус трубы R = 0,05 м; длина трубы L = 500 м;

перепад давлений Δp = 340000 Па; коэффициент консистенции k = 0,37; индекс течения n = 0,7.

Решение: воспользуемся общей формулой для расчета объемного расхода при течении неньютоновской жидкости в трубе:

$$Q = \frac{\pi R^3}{\tau_w} \int_0^{\tau_w} \tau^2 \dot{\gamma}(\tau)\, d\tau,$$

тогда уравнение расхода для степенной модели жидкости приобретает вид

$$Q = \frac{\pi R^3}{\tau_w} \int_0^{\tau_w} \tau^2 \left(\frac{\tau}{k}\right)^{\frac{1}{n}} d\tau = \frac{n\pi R^3}{3n+1}\left(\frac{R\Delta p}{2Lk}\right)^{\frac{1}{n}}.$$

Это уравнение при определенных значениях индекса течения и коэффициента консистенции переходит в формулу Пуазейля:

$$Q = -\left(\frac{\Delta p}{2Lk}\right)^{\frac{1}{n}} \frac{\pi n}{1+3n} R^{\frac{1+3n}{n}} =$$

$$= \left(\frac{340000}{2\cdot 500\cdot 0{,}37}\right)^{\frac{1}{0{,}7}} \frac{3{,}14\cdot 0{,}7}{1+3\cdot 0{,}7}\cdot 0{,}05^{\frac{1+3\cdot 0{,}7}{0{,}7}} = 0{,}112 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Процесс релаксации напряжений

Гуковское линейно-упругое твердое тело и ньютоновская линейно-вязкая жидкость представляют собой в некотором смысле две крайних модели линейных тел, между тем многие пищевые среды в деформационных процессах проявляют одновременно упругие и вязкостные свойства. Для таких тел можно построить ряд промежуточных моделей, а такие пищевые среды называются вязкоупругими.

Одной из простейших вязкоупругих моделей является тело или жидкость Максвелла, механическая модель которой представляет собой последовательное соединение тел Гука и Ньютона. Символьная формула этого тела имеет вид $M = N - H$. Математическая модель Максвелла строится исходя из предположения, что деформация (пусть для определенности это будет деформация простого сдвига) в некоторой точке среды представляет собой сумму упругой деформации и деформации течения (инерционными эффектами пренебрегаем):

$$\gamma = \gamma_H + \gamma_N, \qquad (1)$$

где γ – общая деформация сдвига; γ_H – упругая деформация тела Гука; γ_N – деформация течения тела Ньютона.

Из реологических уравнений тел Гука и Ньютона запишем:

$$\dot{\gamma}_N = \frac{\tau}{\mu}; \quad \gamma_H = \frac{\tau}{G}; \quad \dot{\gamma}_H = \frac{\dot{\tau}}{G}, \qquad (2)$$

где μ – коэффициент динамической вязкости; G – модуль сдвига (модуль упругости второго рода).

Продифференцируем уравнение (1) по времени и подставим в выражение (2):

$$\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_H + \dot{\gamma}_N;$$

$$\dot{\gamma} = \frac{\dot{\tau}}{G} + \frac{\tau}{\mu}; \qquad (3)$$

$$\tau = \mu\dot{\gamma} - \left(\frac{\mu}{G}\right)\dot{\tau}.$$

Уравнение (3) называется реологическим дифференциальным уравнением тела Максвелла. С помощью этого уравнения можно, например, проанализировать процесс релаксации напряжений в среде при постоянной деформации:

$$\gamma = \text{const}; \;\; \dot{\gamma} = 0; \;\; \dot{\tau} + \left(\frac{G}{\mu}\right)\tau = 0. \qquad (4)$$

Решение дифференциального уравнения (4) ищем в виде:

$$\tau = e^{\lambda t}; \qquad \dot{\tau} = \lambda e^{\lambda t}; \;\; \lambda e^{\lambda t} + \left(\frac{G}{\mu}\right)e^{\lambda t} = 0; \;\; e^{\lambda t} \neq 0; \;\; \lambda = -\frac{G}{\mu}, \qquad (5)$$

откуда

$$\tau = Ce^{-\frac{G}{\mu}t}. \qquad (6)$$

Константу интегрирования C находим из условия, что в начальный момент времени известно начальное напряжение t_0:

$$t = 0; \;\; \tau = \tau_0; \;\; C = \tau_0. \qquad (7)$$

Тогда процесс релаксации напряжений при постоянной деформации описывается уравнением

$$\tau = \tau_0 e^{-\frac{G}{\mu}t}. \qquad (8)$$

График зависимости $\tau = f(t)$ выглядит следующим образом:

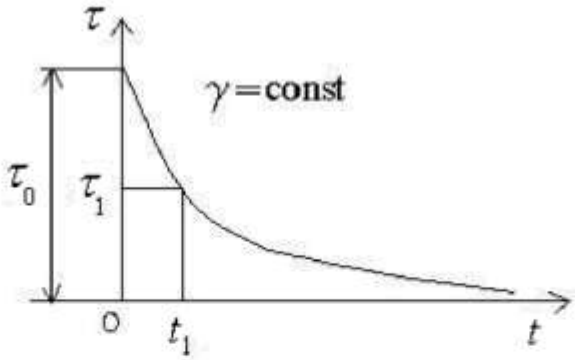


Рис. 2. Кривая релаксации напряжений:
τ – напряжение сдвига; τ_0 – начальное напряжение сдвига;
t – время процесса релаксации; t_1 – время, при котором
определяется величина напряжения

Задание

Определить величину релаксации напряжений τ [Па] при деформации среды Максвелла за время $t_1 = 150$ с.

Дано:

коэффициент динамической вязкости $\mu = 0{,}37$ Па·с;

величина начального напряжения $\tau_0 = 40$ Па;

модуль упругости сдвига $G = 0{,}0004$ Па;

момент времени определения величины напряжения $t_1 = 150$ с.

Решение:

$$\tau_1 = \tau_0\, e^{-\frac{G}{\mu}t_1} = 40 \cdot e^{-\frac{0{,}0004}{0{,}37}\cdot 150} = 34 \text{ Па}.$$

Приложение А Исходные данные

Таблица А1 - Исходные данные по вариантам

№ варианта	Вид продукта	Производительность, кг.	Масса одной загрузки, кг.	Загрузок за смену	Длительность перекачки одной загрузки, сек.	Общая длинна трубопровода, м.
1	2	3	4	5	6	7
1	Говядина куттерованная	3500	250	14	400	7
2	Свинина полужирная, куттеро-	4200	280	15	360	6,5
3	Фарш колбасный, колбасы ливерной при 30ºС	2600	200	13	340	8
4	Фарш сосисок свиных	3400	200	17	420	6,8
5	Фарш колбасный любительский	5000	250	20	500	7,4
6	Фарш колбасный колбасы докторской	4800	240	20	330	6,6

Продолжение таблицы А1

1	2	3	4	5	6	7
7	Фарш котлетный	3700	185	20	390	7,6
8	Фарш колбасный колбасы ливерной при 60ºС	2800	140	20	430	7,9
9	Фарш колбасный колбасы чайной	3200	160	20	450	6,9
10	Фарш котлетный	3900	195	20	460	6,
11	Говядина куттерованная	4000	200	20	470	6,2
12	Фарш колбасный любительский	4100	205	20	490	6,3
13	Фарш сосисок свиных	3100	215	20	520	6,8

14	Фарш колбасный колбасы ливерной при 60ºС	3100	155	20	510	7,7

Продолжение таблицы А1

1	2	3	4	5	6	7
15	Фарш колбасный колбасы докторской	3550	355	10	340	7,3
16	Свинина полужирная. куттерованная	3650	146	25	280	7,2
17	Фарш колбасный колбасы ливерной	2860	143	20	300	7,8
18	Фарш колбасный колбасы чайной	2980	149	20	290	7,4

Таблица А2 – Химический состав различных видов фарша

Сырой фарш	Жирность, кг/кг	Влажность, кг/кг	Влагосодержание, кг/кг
Колбас:			
докторской	0,25-0,19 (0,221)	0,60-0,66 (0,634)	1,50-1,95 (1,73)
диетической	0,09-0,06 (0,070)	0,69-0,76 (0,33)	2,26-3,26 (2,74)
чесноковой	0,03-0,02 (0,029)	0,74-0,79 (0,765)	2,85-3,76 (3,26)
сосисок:			
свинных	0,35-0,22 (0,276)	0,55-0,65 (0,608)	1,22-1,90 (1,55)
русских	0,19-0,17 (0,182)	0,65-0,69 (0,674)	1,86-2,25 (2,07)
молочных	0,26-0,23 (0,249)	0,60-0,64 (0,621)	1,50-1,80 (1,64)
Сарделек говяжьих	0,13-0,11 (0,125)	0,72-0,75 (0,735)	2,57-3,00 (2,78)

Таблица А3 – Диаметры труб из коррозиестойкой стали в соответствии с ГОСТ 9941-81*

Внутренний диаметр, мм	Толщина стенки, мм.	Внутренний диаметр, мм.	Толщина стенки, мм.
20	0,5; 0,1; 1,5;	55	0,5;
25	1,0; 1,5;	60	1,5;
30	1,0; 2,0;	66	1,5; 2,5;
35	0,5; 1,5;	70**	1,5; 2,5; 3,0**;
38**	1,0;	74	3,0;
40	1,0; 2,5;	79	3,0;
45	1,5;	84	3,0;
48**	1,5;	89	3,0;
50	0,5; 1,5;	96	3,0;

* Для упрощения пользования данными приведены внутренние диаметры труб и толщина их стенок; ГОСТ дает наружных диаметров труб.
** Наиболее желательные размеры.

Таблица А4 – Значения коэффициентов для расчетов трубопроводов для различных видов фарша.

Продукт	Для трубопроводов	
	К уравнению $p \cdot d / 4 \cdot l = A_1 \left[8 \cdot ш / r_1 \cdot d \right]^n$	
	A1	n
1	2	3
Говядина, куттерованная с водой	600	0,27
Свинина полужирная, куттерованная с водой	650	0,25
Фарш колбасный:		
любительский	700	0,21

Таблица А5 – Оптимальные характеристики фаршевых насосов

Насос	Максимальное давление (приближенно) $p=10^{-5}$, Па	Оптимальные параметры		Оптимальные подачи насосов, кг/с	Частота вращения, мин $^{-1}$
		Наибольший КПД, доли единицы	Давление, $p=10^{-5}$, 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

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 Тутов. - 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.