

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ – ФИЛИАЛ ФЕДЕРАЛЬНОГО  
ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«УЛЬЯНОВСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ  
АКАДЕМИЯ ИМЕНИ П.А.СТОЛЫПИНА»

И.И. Шигапов

**Лабораторно-практические занятия по дисциплине**  
**«Физико-механические свойства пищевых продуктов»**

Направление подготовки: 19.03.04 Технология продукции и организация  
общественного питания (прикладной бакалавриат)  
профиль "Технология продукции и организация ресторанного бизнеса"  
Квалификация выпускника: бакалавр  
Форма обучения: очно-заочная, заочная

# Практические приложения принципов инженерной реологии

## 1 Расчет трубопроводного транспорта

При переработке пищевых материалов как в молочной, так и в других отраслях промышленности в качестве межоперационного транспорта применяется *трубопроводный* транспорт.

Перед проектированием трубопроводного транспорта необходимо определить следующие параметры: диаметр трубопровода, давление продукта на входе в трубу и мощность для выполнения прочностных расчетов и для подбора двигателя.

### I. Исходные параметры.

1. Рецепттура.
2. Производительность трубопровода  $M_c$ , кг/с:

$$M_c = \frac{M_{cm}}{3600 \cdot t_p}, \quad (5.1)$$

где:  $M_{cm}$  – выработка за смену, кг;  
 $t_p$  – эффективное время работы в смену, ч.

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

### II. Выбираемые параметры.

Скорость движения продукта по трубопроводу  $w_0$ , м/с, (чем больше вязкость продукта, тем меньше скорость).

### III. Расчетные параметры.

1. Объемный расход  $V_c$ , м<sup>3</sup>/с:

$$V_c = \frac{M_c}{\rho} \quad (5.2)$$

2. Диаметр трубопровода  $d_0$ , м:

$$d_0 = \sqrt{\frac{4V_c}{\pi w_0}}. \quad (5.3)$$

По значению диаметра  $d_0$  по ГОСТу выбирают ближайшую величину  $d$ , м. Действительную среднюю скорость  $w$ , м/с, вычисляют по формуле:

$$w = \frac{4V_c}{\pi d^2}. \quad (5.4)$$

3. Консистентную переменную (градиент скорости)  $\dot{\varepsilon}$ , 1/с, вычисляют по формуле:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{8w}{d}. \quad (5.5)$$

Безразмерная консистентная переменная:

$$\dot{\varepsilon}_* = \frac{8w}{\dot{\varepsilon}_1 d}, \quad (5.6)$$

где:  $\dot{\varepsilon}_1 = 1$ , т.е. градиент скорости, равный единице его измерения.

4. Консистентную переменную (напряжение сдвига)  $\tau$ , Па, определяют по формуле:

$$\tau = A_1 \dot{\varepsilon}_*^n = A_1 \left| \frac{(8w)^n}{(\dot{\varepsilon}_1 d)^n} \right|, \quad (5.7)$$

или

$$\tau = \frac{pd}{4l}. \quad (5.8)$$

где:  $A_1$  – напряжение сдвига при единичном значении градиента скорости, Па;

$n$  – индекс течения;

$p$  – потери давления или давление на выходе из насоса, Па.

Величины  $A_1$  и  $n$  выбирают по таблицам или определяют

по формулам:

$$A_1 = B_0 \varepsilon_1 \left( \frac{3n+1}{4n} \right)^{1-m}, \quad (5.9)$$

где:  $B_0^*$  – эффективная вязкость, Па·с, при единичном значении градиента скорости;

$m$  – темп разрушения структуры соответственно.

5. Потери давления  $p$ , Па – давление продукта на выходе из насоса, определяют по формуле:

$$p = \frac{4l\tau}{d}. \quad (5.10)$$

Полезная мощность насоса  $N$ , кВт:

$$N = pV_C \cdot 10^{-3}. \quad (5.11)$$

#### IV. Выбор оборудования.

1. Насос выбирают по требуемой производительности трубопровода  $M_C$  или  $M_C = 3600 M_C$ , принимая во внимание, что объемный к.п.д. составляет  $0,5 \div 0,6$ .

2. Мощность электродвигателя  $N_{Эд}$ , кВт:

$$N_{Эд} = \frac{\alpha N}{K_n} \left( \frac{N}{K_n} + \frac{N_{ш}}{K_{ш}} \right), \quad (5.12)$$

где  $\alpha$  – коэффициент запаса мощности (для коротких трубопроводов до 5 м  $\alpha = 1,2$ ; для длинных  $\alpha = 1,5$ );

$K_n, K_n, K_{ш}$  – к.п.д. соответственно механических передач от электродвигателя к насосу, насоса и шнеков (питателей);

$N, N_{ш}$  – полезная мощность, развиваемая насосом и шнеком соответственно, кВт.

Электродвигатель выбирают по каталогу.

## 2 Расчеты процессов дозирования

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

Различают два метода дозирования: по объему и по массе. При объемном дозировании реологические свойства продукта и способ заполнения формы определяют процесс и конструкцию машины, при массовом – имеют второстепенное значение. Поэтому рассмотрим только первый способ на примере дозирования пластично-вязких масс. Схематически метод объемного дозирования можно представить как отмеривание определенного объема продукта и заполнение тары. В одну тару можно дозировать несколько компонентов. Поскольку продукты являются трудно-текучими, то их подачу в рабочие органы следует осуществлять принудительно: с помощью напорных шнеков или лопастей, насосов или поршневых шприцев.

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

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

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

$$p = p_m + p_{дл} + p_{сж}. \quad (5.13)$$

Составляющие общего давления вычисляются по зависимостям:

$$p_m = A \theta^{0,4} d^{-0,86} w^{0,56}, \quad (5.14)$$

$$p_{дл} = C l d^{-1} \eta \rho_{эф} w_{отн}; \quad (5.15)$$

$$p_{сж} = D \cdot 10^{aw^*}, \quad (5.16)$$

где:  $A_2, C_1, D$  – эмпирические коэффициенты;

$l, d_э$  – длина дозатора и эквивалентный диаметр поперечного сечения;

$w$  – средняя скорость заполнения дозатора, м/с;

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

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

$$w^* = w + 0,004, \quad (5.17)$$

$$a = 56 (F \cdot 10^2)^{2,5} + a^*. \quad (5.18)$$

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

## Лабораторные работы

### 1 Исследование реологических характеристик на ротационном вискозиметре «Rheotest – 2»

*Цель работы:* ознакомиться с теорией ротационных вискозиметров существующими конструкциями вискозиметров, их принципом работы, методиками измерения и расчета; провести исследование реологических параметров пищевых материалов при разных скоростях сдвига, температурах, построить кривые течения.

*Методика проведения эксперимента.* Опыты проводятся на ротационном вискозиметре «Rheotest – 2», рисунок которого и описание конструкции приведены в разделе 2.3.3 (рис.2.9).

1. Перед началом опыта порцию исследуемой массы помещают в наружный цилиндр 5 (при этом внутренний цилиндр 4 уже должен быть закреплен на ведущем валу 3) и устанавливают его в рабочее положение коаксиально цилиндру 4. При этом происходит заполнение исследуемой массой кольцевого зазора. После установки цилиндров при необходимости проводят термостатирование материала и коаксиальных цилиндров, для чего в конструкции прибора предусмотрен ультратермостат, сосуд которого надевается поверх наружного цилиндра и крепится при помощи специального замка. Термостатирование необходимо проводить не менее 20 мин., что позволяет равномерно прогреть не только исследуемый материал, но и рабочие цилиндры 4 и 5.

2. После выполнения приведенных выше операций начинают снимать показания, для чего устанавливают рукоятку переключения скоростей на первую скорость, выбирают жесткость измерительной пружины, переводя переключатель на отметку I или II (начинают обычно с I диапазона). После включения прибора внутренний цилиндр начинает вращение. Вращение на данной скорости проводят до стабилизации положения показаний вторичного прибора, измеряющего угол  $\alpha$  относительного поворота цилиндров 4 и 5. Показания прибора записывают в таблицу 6.1. включают последовательно следующие скорости

сдвига (их 12) и по выше описанной методике получают соответствующие данные, которые также записывают в таблицу 6.1.

После измерений выключают привод, снимают с прибора термостатирующий сосуд, а затем цилиндры. Рабочие цилиндры тщательно моют, сушат, а их поверхности обезжиривают.

3. Для получения достоверных данных необходимо провести эксперимент в трех повторностях по представленной выше схеме. Данные с каждого измерения заносятся в таблицу.

Таблица 6.1

## Экспериментальные данные

№№ пп	Исследуемый продукт	Измерительный цилиндр	Степень скорости	Постоянная цилиндра, $Z$	Градиент скорости деформации	Показания измерительного прибора, $\alpha$	Напряжения сдвига, $\tau$	Эффективная вязкость, $\eta_{\text{эф}}$

*Составление отчета и обработка опытных данных*

1. Графическая часть работы состоит из чертежа-схемы прибора и графиков, построенных на миллиметровке  $\dot{\gamma}(\tau)$ , и на логарифмической бумаге  $\eta_{\text{эф}}(\dot{\gamma})$ .

2. По считываемым показателям измерений вычисляются реологические характеристики. Следует заметить, что напряжение сдвига  $\tau_0$  и градиент скорости деформации  $\dot{\gamma}$  пересчитываются на радиус внутреннего цилиндра.



$$\tau = Z \cdot a, \quad (6.1)$$

где  $\tau$  – напряжение сдвига, Па;

$Z$  – постоянная цилиндра, Па / дел.;

$a$  – показание измерительного прибора.

Постоянная цилиндра  $Z$ , зависящая от размеров системы цилиндров и постоянной пружины динамометра, указана для каждого измерительного устройства отдельно в пределах напряжения сдвига областей I и II в табл. 6.2.

Таблица 6.2

### Константы вискозиметра «Rheotest – 2»

Измерительный цилиндр	Соотношение радиусов цилиндров	Константы цилиндров, Па на ед. шкалы		Пределы измерения градиента скорости
		диапазон I	диапазон II	
$N/N1$	0,99	0,338	3,44	1,5 – 1310
$S/S1$	0,98	0,586	5,88	1,5 – 1310
$S/S2$	0,94	0,616	6,15	0,5 – 437
$S/S3$	0,81	0,816	8,25	1/6 – 146
$H/H$	0,81	3,07	29,29	1/6 – 146

3. Градиент скорости деформации  $\dot{\gamma}(\text{с}^{-1})$  показывает изменение скорости в кольцевой щели. Она зависит от размеров системы цилиндров, а также пропорциональна частоте вращения (числу оборотов) вращающегося цилиндра. Градиент скорости деформации для всех ступеней числа оборотов и измерительных устройств указан в табл. 6.3. Показатели скорости деформации, приведенные в табл. 6.3, рассчитаны на частоту сети  $\nu=50$  гц. Отклонение частоты сети от этого показателя исправляют по формуле:

$$\dot{\gamma}_u = \dot{\gamma} \cdot \frac{\nu}{50}, \quad (6.2)$$

где  $\dot{\gamma}_u$  – истинный градиент скорости деформации;

$\dot{\gamma}$  – градиент скорости деформации в табл. 3.11 ( $C^{-1}$ );  
 $\nu$  – частота сети (Гц).

4. Определив напряжение сдвига  $\tau_0$  и градиент скорости деформации  $\dot{\gamma}$ , строим на миллиметровке первичную реограмму  $\dot{\gamma} = f(\tau)$ . По точке пересечения этой кривой с осью абсцисс ( $\dot{\gamma} = 0$ ) принимаем значение предельного напряжения сдвига.

5. По измеренному напряжению сдвига  $\tau$  и градиенту скорости деформации  $\dot{\gamma}$  вычислить эффективную (динамическую) вязкость  $\eta_{эф}$ :

$$\eta_{эф} = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} 100. \quad (6.3)$$

6. После вычисления эффективной вязкости  $\eta_{эф}$  для каждого измерения в логарифмических шкалах строят графики зависимости (1.17).

7. Пользуясь графиком  $\eta_{эф} = f(\dot{\gamma})$  и формулой (1.15), по методу избранных точек определяют значения,  $B_0^*$  и  $m$ . Коэффициент  $B_0^*$  представляет собой значение эффективной вязкости соответственно при градиенте скорости  $\dot{\gamma}$  равной единице измерения. Показатель  $m$  характеризует интенсивность разрушения структуры исследуемого материала (см. рис. 1.8).

8. Определяем по реограмме  $\dot{\gamma} = f(\tau)$ , если она подчиняется уравнению Гершеля-Балки, аналогичной рис. 1.7, статическое и динамическое предельное напряжение сдвига, пластическую и динамическую предельное напряжение сдвига (шведовскую) и в зоне вязко-пластичного течения (бингамовскую).

Если реограмма подчиняется уравнению Шведова-Бингама, мы ее можем аппроксимировать к виду уравнения Гершеля-Балки, и определить вышесказанные реологические характеристики (см. рис. 6.1, а).

9. Логарифмическая зависимость эффективной вязкости от градиента скорости  $\dot{\gamma}$  разбивается также на две зоны: для пластичного и вязко-пластичного течения с критическими зна-

чениями градиента скорости  $\dot{\gamma}'_{кр}$ . Для каждой зоны определяют свои значения  $B^*$  и  $m$ .

10. Определение прочности структуры и степень ее разрушения осуществляется путем измерения максимального  $\tau_n$  и минимального  $\tau_p$  значения напряжения сдвига исследуемой разовой пробы продукта при определенной частоте вращения ротора вискозиметра (т.е. градиенте скорости сдвига):

а) строим реограмму  $\dot{\gamma}' = f(\tau)$ , состоящую из двух кривых: для первоначальной не разрушенной структуры  $\dot{\gamma}' = f(\tau_n)$  и для разрушенной структуры  $\dot{\gamma}' = f(\tau_p)$ . Зона между двумя кривыми показывает работу, затраченную на разрушение структуры исследуемой системы;

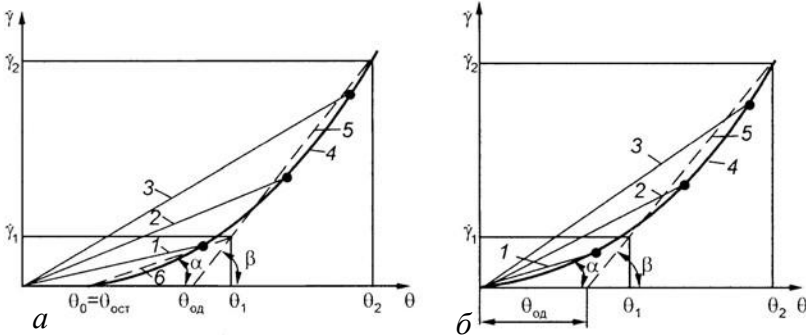


Рис. 6.1. Кривые течения вязко-пластичной (а) и псевдопластичной (б) систем:

1, 2, 3 – линии, характеризующие эффективную вязкость;  
4 – действительные кривые течения; 5, 6 – аппроксимация кривой течения псевдопластичной системы к бингамовской (5) и шведовской (6)

б) строим график степени разрушения ( $\tau_p/\tau_n$ , дол. ед.) от градиента скорости  $\dot{\gamma}'$ .

11. Определяем степень разрушения (изменения) эффективной вязкости разрушенной структуры по сравнению с неразрушенной:

а) строим в логарифмических координатах для разрушенной и не разрушенной структуры исследуемой системы функцию  $\eta_{эф} = f(\gamma)$ ;

б) определяем значения  $B_0^*$  и  $m$  для разрушенной ( $B_{0p}^*, m_p$ ) и не разрушенной ( $B_{0н}^*$  и  $m_n$ ) структуры исследуемой системы;

в) определяем степень разрушения (изменения)  $\delta\eta_{эф}^*$  эффективной вязкости разрушенной структуры по сравнению с первоначальной (неразрушенной) в зависимости от градиента скорости сдвига действующего на исследуемую систему:

$$\delta\eta_{эф}^* = \left| \frac{\left( \frac{B_{0п}^*}{B_{0н}^*} \right) \cdot \left( \frac{m_p}{m_n} \right)}{\left( \frac{B_{0п}^*}{B_{0н}^*} \right)} \right| \cdot \gamma^m \quad (6.4)$$

Данный показатель характеризует прочность структуры исследуемой системы.

12 Сделать вывод по лабораторной работе.

### Вопросы для самоконтроля

1. С какой целью используются сдвиговые характеристики?
2. Принцип действия ротационных вискозиметров.
3. Какие свойства относятся к сдвиговым?
4. Какова основа теории ротационной вискозиметрии?
5. Что называется предельным напряжением сдвига, эффективной и пластической вязкостью?
6. Какими свойствами оцениваются системы в области практически не разрушенных структур, и каким методом их определяют?
7. Физический смысл условно-мгновенного модуля упругости, эластичного, равновесного модуля и периода релаксации.
8. Какие схемы рабочих узлов ротационных вискозиметров вы знаете?
9. На какие группы разделяются ротационные вискозиметры и их принципиальные различия?

10. Выбор оптимального рабочего зазора между измерительными цилиндрами ротационного вискозиметра.
11. Преимущества вискозиметров с постоянной частотой вращения рабочего органа.
12. По какой формуле рассчитывается напряжение сдвига и эффективная вязкость, зная показания прибора?

### **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. Воляровича КП-3, схема которого представлена на рис.2.11).
2. Подготовить исследуемый образец к проведению измерения величины пенетрации.
3. Подготовка образца. Заполнить контейнер исследуемой вязко-пластичной средой с помощью шпателя. Провести подпрессовку образца в течение 180 с. При использовании упруго-эластичной системы образец нарезается высотой 50мм.
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.

ний, 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 180с:

$$h_{cp} = (h_1 + h_2 + h_3)/3, м.$$

2. Определить погрешность измерения величины  $h$ :

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

3. Рассчитать величины предельного напряжения сдвига с учетом коэффициентов пропорциональности, предложенных различными авторами (табл.6.6):

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

4. Анализировать величины предельного напряжения сдвига, полученные с использованием конических инденторов с различным углом при вершине и рассчитанные с учетом различных коэффициентов пропорциональности.

Таблица 6.5

### Экспериментальные данные

Угол конуса $\alpha$ , град.	Нагрузка, $F$ , Н	Глубина погружения, $h$ , мм	Средняя глубина погружения, $h_{cp}$ , мм	Напряжение сдвига $\tau_0$ , Па				
				$K_{\alpha 1}$	$K_{\alpha 2}$	$K_{\alpha 3}$	$K_{\alpha 4}$	$K_{\alpha 5}$
30°	1							
	2							
	3							

60°	1								
	2								
	3								
90°	1								
	2								
	3								

Таблица 6.6

Значения коэффициентов пропорциональности  $K_\alpha$   
в зависимости от полного угла при вершине конуса

	Значения $K_\alpha$ при углах $\alpha$ :			
	30°	45°	60°	90°
$K_{\alpha 1}$ ;	1,11	0,658	0,415	0,159
$K_{\alpha 2}$ ;	0,959	0,416	0,214	0,073
$K_{\alpha 3}$ ;	0,456	0,286	0,164	0,0657
$K_{\alpha 4}$ ;	0,663	0,348	0,213	0,0866
$K_{\alpha 5}$ .	0,976	0,410	0,210	0,0700

Примечание:  $K_{\alpha 1}$  – Ребиндер;  $K_{\alpha 2}$  – Н. Н. Агранат, М. Ф. Широков;  $K_{\alpha 3}$  – В. А. Арет, А. Н. Пирогов;  $K_{\alpha 4}$  – Горбатов А. В., Косой В. Д.;  $K_{\alpha 5}$  – 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 привершине.

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 напряжениядвига?
9. Напишите формулу П.А. Ребиндера для определения предельного напряжениядвига.
10. Расскажите устройство лабораторного прибора.
11. Как понимать термин «инвариантность»?

### **Исследование адгезионных свойств**

*Цель работы:* ознакомиться с поверхностными характеристиками пищевых материалов, способами и приборами для их измерения; провести исследование адгезионных свойств различных пищевых материалов.

*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 6.7.
4. Сделать выводы по лабораторной работе.

*Описание экспериментальной установки.* Экспериментальной установкой является «Структурометр-СТ 1», схема которого приведена на рис. 6.3. Структурометр представляет собой устройство, включающее блок управления, сменные измерительные головки и набор сменных инструментов и приспособлений.

Блок управления 1 представляет собой настольный блок, в верхней части которого находится столик 4 и вертикальная штанга 3. При помощи шагового двигателя столик может перемещаться в вертикальном направлении с заданной скоростью. Над столиком размещается измерительная головка 2, которая перемещается вдоль штанги и фиксируется в любом месте с помощью винта 6. Винт 7 служит для закрепления в измерительной головке сменного инструмента 5. На лицевой панели блока размещаются элементы управления и индикации. Матричный



индикатор представляет собой строку на 16 знакомест и позволяет выводить буквенно-цифровую информацию. Клавиатура содержит 10 цифровых и 10 функциональных кнопок. Устройство имеет 8 режимов работы:

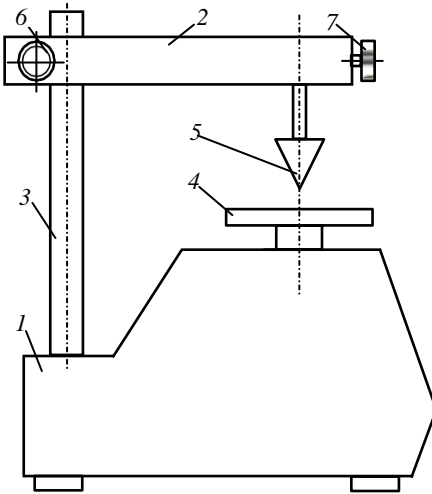


Рис. 6.3. Структуромер-СТ 1  
1 – блок управления; 2 – измерительная головка; 3 – штанга; 4 – столик; 5 – инструмент; 6 – винт; 7 – винт

Устройство имеет 8 режимов работы:

- режим 1: определение упругих и пластических деформаций;
- режим 2: определение прочностных свойств при изгибе и резании;
- режим 3: определение адгезионных свойств;
- режим 4: исследование релаксационных процессов;
- режим 5: исследование кинетики деформаций;
- режим 6: определение нормальных напряжений;

жений;

- режим 7: определение времени релаксации при заданном усилии;
- режим 8: определение времени релаксации при заданном перемещении столика.

В измерительной головке (рис. 6.4) размещается «Датчик

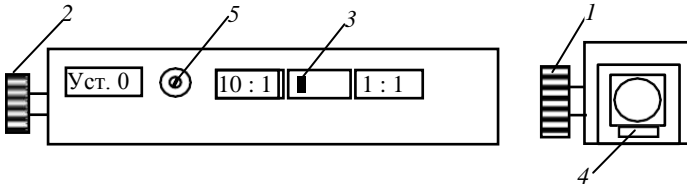


Рис. 6.4. Измерительная головка  
1 – винт, фиксирующий головку на штанге; 2 – винт, фиксирующий сменный инструмент; 3 – переключатель коэффициента усиления; 5 – резистор установки «0»

высокоизмерительный тензорезисторный ЛУ.04П.11.000.00 и схема усиления аналогового сигнала. В передней части датчика находится гнездо 4 для установки инструмента. Сменный инструмент устанавливается в гнездо и фиксируется винтом 2. При измерении усилий более 10 Н переключатель 3 должен находиться в положении 1 : 1. В этом случае значения, отображаемые на индикаторе прибора будут соответствовать реальному усилию. При измерении усилий менее 10 Н переключатель 3 должен находиться в положении 10 : 1. В этом случае для получения реального значения усилия необходимо значения, отображаемые на индикаторе прибора, разделить на 10. Компенсировать температурный дрейф измерительной головки, или компенсировать вес инструмента можно с помощью резистора 5 «Уст. 0». Данную операцию можно выполнять после выбора любого из режима и задания параметров (до нажатия кнопки «СТАРТ»). В этом состоянии на индикатор прибора выводится значение перемещения и значение усилия. Вращая ось резистора по или часовой стрелки можно добиться нулевых значений усилия. Компенсацию дрейфа «0» или компенсацию веса инструмента выполнять необязательно: на результат измерений это влияния не оказывает, так как в начале любого режима (после нажатия кнопки «СТАРТ») происходит автоматическое обнуление значений перемещения и усилия.

*Методика проведения эксперимента:*

1. Перед началом проведения опыта необходимо подготовить прибор, для чего требуемый инструмент устанавливают в гнездо 4 измерительной головки и закрепляют его с помощью винтов 2 (рис. 4). Подготовленный исследуемый образец устанавливают на столик строго по оси инструмента. Если необходимо приблизить инструмент к образцу, то это можно сделать следующим образом:

- 1) либо опустить измерительную головку вниз вдоль штанги;
- 2) либо поднять столик.

Для перемещения столика вверх необходимо нажать кнопку «↑». При кратковременном нажатии столик перемещается на 1 шаг. При нажатии и удержании кнопки столик перемещается с максимальной скоростью, пока кнопка не будет отпущена.

2. После выбора режима задают значения начального усилия  $F_0$ , скорости перемещения столика  $V$ , усилия  $F$ , до которого будет нагружаться образец. После ввода значения  $F$  на индикатор выводится значение паузы:

$$T = 100 \text{ СЕК.}$$

3. Если данные значения устраивают, нажимают кнопку «ВК». Нажатием кнопки «СТАРТ» запускается обработка режима. Значения  $F$  и  $H$  обнуляются. Столик движется вверх с заданной скоростью. При достижении  $F_0$  начинается отсчет перемещения. Текущие значения  $F$  и  $H$  выводятся на индикатор и самописец. При достижении заданного значения  $F$  столик останавливается. Дается короткий звуковой сигнал. На индикаторе чередуются сообщение «ПАУЗА» и текущее значение усилия и перемещения. Идет отсчет заданного времени паузы. Во время паузы за счет перемещения столика поддерживается постоянное усилие. По окончанию паузы дается короткий звуковой сигнал. Столик движется вниз с заданной скоростью  $V$  до исходного положения. Фиксируется и выводится на индикатор усилие отрыва инструмента от образца и соответствующее ему значение перемещения. Опыт необходимо провести в трех повторностях для трех различных материалов, все данные занести в таблицу 6.7.

4. Проводят анализ полученных результатов и делают выводы о адгезионных свойствах образцов исследованных материалов.

Таблица 6.7

### Экспериментальные данные

Материал	Величина адгезионной прочности, $p_0$ , Па			
	$p_1$	$p_2$	$p_3$	$p_{\text{ср}}$
№ 1				
№ 2				
№ 3				

*Вопросы для самоконтроля:*

1. Какова цель работы?

2. Охарактеризуйте поверхностные характеристики различных материалов.
3. Что называется адгезией?
4. Перечислите виды отрыва материала.
5. Назовите методы испытания адгезии.
6. Назовите факторы, влияющие на величину адгезионной связи.
7. Изложите теории, объясняющие адгезионные явления.
8. Напишите формулы для расчета адгезии.
9. Какова связь адгезии и внешнего трения?

Экспериментальные данные, полученные на  
ротационном вискозиметре

Вариант	Напряжение сдвига $\tau$ , Па, при скоростях сдвига $\dot{\gamma}$ , $\text{с}^{-1}$											
	1,0	1,8	3,0	5,4	9,0	16,2	27,0	48,6	81,0	145,7	243,0	437,4
0	29	30	31	32	33	35	39	43	47	55	65	80
	4	6	7	9	12	15	20	23	32	42	49	66
1	18	19	20	22	23	24	25	26	28	31	36	47
	1	3	4	8	11	23	38	77	120	210	350	670
2	4,4	4,6	5	5,2	5,7	7	9	12	19	29	44	79
	12	15	16	19	20	23	28	31	32	34	37	45
3	1	1	2	2	3	6	15	29	70	150	350	820
	5	7	9	11	15	21	28	37	45	60	81	104
4	8,5	8,7	8,9	9,1	9,3	9,8	11	13	16	21	32	49
	15	19	21	26	29	36	42	50	55	67	79	95
5	2,9	3,0	3,1	3,1	3,2	3,3	3,4	3,6	4,8	9,3	19	55
	2	5	7	12	20	38	60	110	200	340	540	990
6	1	1	2	2	3	5	12	31	70	180	380	1000
	12	17	23	39	50	78	100	160	200	300	450	640
7	24	30	35	43	52	59	72	87	100	110	130	180
	3,3	3,4	3,4	3,5	3,5	3,6	3,8	4,1	4,5	5,5	7,1	9,7
8	8,8	8,9	9,0	9,0	9,2	9,5	9,7	12	15	23	43	97
	0	1	1	2	2	5	11	32	70	160	390	950
9	3,3	3,3	3,4	3,4	3,5	3,6	4,1	5,3	8,5	17	38	96

	5	6	8	11	13	18	24	29	31	37	45	61
--	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----

## 1 Лабораторно-практическая работа

### 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 длина трубопровода (см. приложение А, таблица 1).

#### Производительность трубопровода (кг/с)

$$M_c = \frac{M_{см}}{3600 \cdot \phi_p} \quad (1)$$

где  $M_{см}$  ~ выработка в смену, кг/смену;  
3600 - переводной коэффициент, с/ч;  
 $\tau_p$  - эффективное время работы в смену, ч/смену.

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

#### Выбираемые параметры

Скорость движения продукта по трубопроводу -  $\omega_0$ , м/с. Ее оптимальное значение лежит в пределах 0,1÷0,5 м/с (чем «гуще» фарш, тем меньше скорость).

#### Расчетные параметры

#### Секундный расход (м<sup>3</sup>/с) трубопровода

$$V_c = \frac{M_c}{\rho} \quad (3)$$

где  $\rho$  - плотность продукта, кг/м<sup>3</sup>.  
Плотность фарша:

$$p = 1037 - (290 \cdot \varphi + 10,5 \cdot U) + 22 \cdot \lg p_T,$$

$$\text{или } u_c = 1037 - (290 \cdot \varphi + 10,5 \cdot \omega) / (1 - \omega) + 22 \cdot \lg p_T,$$

где  $\varphi$  - жирность продукта, кг жира на 1 кг продукта;

$V$  - влагосодержание продукта, кг влаги на 1 кг сухоогоостатка;

$\omega$  - влажность продукта, кг влаги на 1 кг продукта;

$p_T$  - давление в трубопроводе, равное половине давления на выходе из насоса, Па.

При организации транспортирования колбасного фарша следует руководствоваться следующим. Плотность жирных видов фарша находится в диапазоне 960÷980 кг/м<sup>3</sup>, плотность для маложирных видов - 1030÷1040 кг/м<sup>3</sup>. 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)

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

где  $F$  - площадь живого сечения потока, м<sup>2</sup> (равна площади сечения продукта, которая нормальна вектору средней скорости);

$\omega$  - 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:

$$i_c = \frac{4 \cdot \omega}{3 \cdot c} = \frac{8 \cdot \omega}{3 \cdot d} = \frac{4 \cdot V_c}{3 \cdot (\pi \cdot R^3)} = \frac{32 \cdot V_c}{3 \cdot (\pi \cdot d^3)}, \quad (5)$$

$$\varphi_* = \frac{32 \cdot V_c}{3 \cdot (\pi \cdot d^3)} = \frac{8 \cdot \omega}{d}, \quad (6)$$

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

$$\cdot \quad (3) \quad i_c = B_0^* \cdot \varphi_1^{\frac{n+1}{4 \cdot p}} \cdot \left( \frac{8 \cdot \text{ш}}{r_1 \cdot d} \right)^n, \quad (7)$$

или

$$i_c = A_1 \cdot \varphi_*^n, \quad (8)$$

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

$\varphi_*^n$  - 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:

$$\frac{p \cdot d}{4 \cdot l} = A_1 \cdot \left[ \frac{8 \cdot \text{ш}}{r_1 \cdot d} \right]^n, \quad (9)$$

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

$$p = \frac{4 \cdot l \cdot i}{d}, \quad (11)$$

**Мощность, сообщаемая продукту(кВт):**

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

### Выбороборудования

**Насос выбирают** по требуемой подаче трубопровода  $M_c$  или  $M_{чАС}=3600 M_c$ , принимая во внимание, что объемный КПД составляет  $0,5 \div 0,6$ , и руководствуясь данными таблицы 5.

**Мощность электродвигателя (кВт):**

$$N_{эд} = \frac{a}{K_n} \cdot \left( \frac{N}{K_H} + \frac{N}{K_i} \right), \quad (13)$$



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

$K_n, K_{ш}$  - КПД механических передач от электродвигателя  
соответственно к насосу, от насоса и шнеков (питателей);

$N_n, N_{ш}$  - полезная мощность, развиваемая насосом и шнеком, кВт.

Электродвигатель выбирают по соответствующему каталогу с округлением мощности в сторонуувеличения.

## **Список использованных источников**

1. Виноградов Я.И. Гидравлика и гидравлические машины для пластично-вязких мясных и молочных продуктов. [Текст] / Я.И. Виноградов, В.И. Горбатов и др.: - М., 1991. – 265с.
2. Мачихин Ю.А. Инженерная реология пищевых материалов [Текст]/ Ю.А. Мачихин, С.А. Мачихин : - М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. – 216 с.

**Приложение  
А(обязательное)  
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 длина трубопровода, м.
1	2	3	4	5	6	7
1	Говядина куттерованная	3500	250	14	400	7
2	Свинина полужирная, куттерованная	4200	280	15	360	6,5
3	Фарш колбасный, колбасы ливерной при 30°С	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 60°С	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 свинных	3100	215	20	520	6,8
14	Фарш колбасный колбасы ливерной при 60°С	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.к уттерованная	3650	146	25	280	7,2
17	Фарш колбасный колбасы ливерной	2860	143	20	300	7,8
18	Фарш колбасный колбасычайной	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	
	Курав нению	
	$p \frac{d}{4 \cdot l} = A_1 \left[ \frac{8 \cdot \psi}{r_1 \cdot d} \right]^n$	
	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
колбасы докторской	470	0,25
колбасы чайной	490	0,21
Колбасы ливерной:		
30°С	890	0,20
60°С	445	0,20
сосисок свиных	375	0,23
котлетный	410	0,24

Таблица А5 – Оптимальные характеристики фаршевых насосов

Насос	Максимальное давление (приближенно) $p=10^{-5}$ , Па	Оптимальные параметры		Оптимальные подачи насосов, кг/с	Частота вращения, мин <sup>-1</sup>
		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



## РАСЧЕТЫ ПО ОСНОВНЫМ РАЗДЕЛАМ ИНЖЕНЕРНОЙ РЕОЛОГИИ

### 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  $\tau$  – касательные напряжения;  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости;  $\dot{\gamma}$  – скорость сдвига.

Пример: В результате вискозиметрирования молочной сыворотки получена таблица значений напряжений  $\tau$ , Па и скоростей сдвига  $\dot{\gamma}$ ,  $\text{c}^{-1}$ . Необходимо определить коэффициент динамической вязкости  $\mu$ , Па·с методом средних и построить график зависимости  $\dot{\gamma} = f(\tau)$ .

Дано:

$\tau$ , Па	4	17	22	34	41,5	50	53,5	62	70
$\dot{\gamma}$ , $\text{c}^{-1}$	20	30	65	115	90	140	125	182	180

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

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

## 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 (скорость сдвига);  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости.

### Задания:

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

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

### Дано:

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

радиус трубы  $R = 0,05$  м;

длина трубы  $L = 500$  м;

$Re_{\text{кр}} = 2300$ ;

перепад давлений  $\Delta p = 340000$  Па.

### Решение:

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

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

откуда

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

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

### **Течение степенной жидкости (Оствальда–ДеВилия)**

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 – аномальные. 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 Вилия.

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

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

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

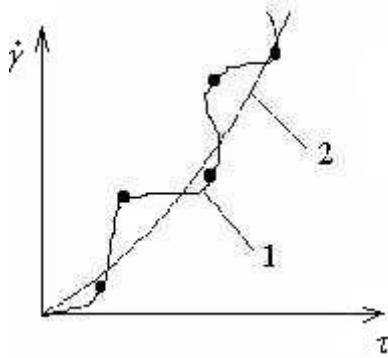


Рис. 1. Реологическая кривая течения в координатах напряжение – скорость сдвига:

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

Задание:

Определить объемный расход  $Q$ , м<sup>3</sup>/с при ламинарном течении в трубе степенной жидкости.

Дано:

- радиус трубы  $R = 0,05$  м;
- длина трубы  $L = 500$  м;
- перепад давлений  $\Delta p = 340000$  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:

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

тогда уравнение расхода для степенной модели жидкости приобретает вид

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

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

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

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

### 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):

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

где  $\gamma$  – общая деформация сдвига;  $\gamma_H$  – упругая деформация тела Гука;  $\gamma_N$  – деформация течения тела Ньютона.

Из реологических уравнений тел Гука и Ньютона запишем:

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

где  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости;  $G$  – модуль сдвига (модуль упругости второго рода).

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

$$\begin{aligned} \dot{\gamma} &= \dot{H} + \dot{N}; \\ \dot{\gamma} &= \frac{\dot{\tau}}{G} + \frac{\tau}{\mu}; \\ \tau &= \mu \dot{\gamma} - \left( \frac{\mu}{G} \right) \tau. \end{aligned} \quad (3)$$

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

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

Решение дифференциального уравнения (4) ищем в виде:

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

откуда

$$\tau = C e^{-\frac{G}{\mu} t}. \quad (6)$$

Константу интегрирования  $C$  находим из условия, что в начальный момент времени известно начальное напряжение  $\tau_0$ :

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

Тогда процесс релаксации напряжений при постоянной деформации описывается уравнением

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

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

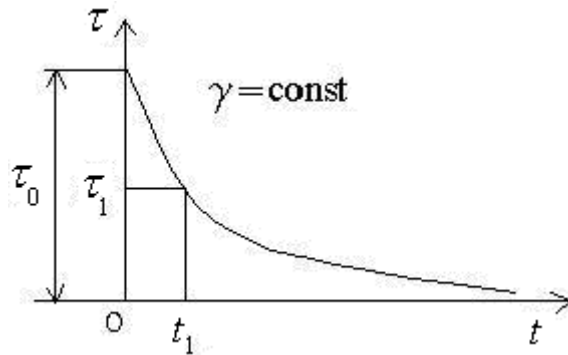


Рис. 2. Кривая релаксации напряжений:  
 $\tau$  – напряжение сдвига;  $\tau_0$  – начальное напряжение сдвига;  
 $t$  – время процесса релаксации;  $t_1$  – время, при котором  
определяется величина напряжения

### Задание

Определить величину релаксации напряжений  $\tau$  [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:

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