

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

Московское ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище им. Н. Э. Баумана

И. А. АБАРИНОВА

Утверждены
редсоветом МВТУ

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ
МОДУЛЯ ОБЪЕМНОЙ УПРУГОСТИ ЖИДКОСТИ**

Методические указания
к лабораторным работам по курсу
«Объемные гидropередачи»



Под редакцией Б. П. Борисова

Данные методические указания издаются в соответствии с учебным планом.
Рассмотрены и одобрены кафедрой К.-6 15.9.82., методической комиссией факультета К и учебно-методическим управлением.

Рецензент к. т. н., доц. Кузнецов М. М.

© Московское высшее техническое училище им. Н. Э. Баумана

СОДЕРЖАНИЕ

Цель лабораторных работ	1
Краткие теоретические сведения	1
Работа № 1. Экспериментальное определение адиабатического модуля упругости жидкости.....	3
§ 1. Экспериментальное определение скорости распространения звука	3
§ 2. Определение плотности жидкости	10
§ 3. Определение адиабатического модуля упругости жидкости.....	11
Работа № 2. Экспериментальное определение изотермического модуля упругости жидкости.....	11
Литература	18
Приложения	19

ЦЕЛЬ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Целью лабораторных работ является:

- ознакомление с методиками экспериментального определения адиабатического и изотермического модулей упругости рабочих жидкостей гидросистем;
- определение скорости распространения звука в минеральном масле в функции давления при постоянной температуре;
- определение адиабатического и изотермического модулей упругости минерального масла в функции давления при постоянной температуре.

КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

При малых деформациях жидкости реактивное давление пропорционально относительной деформации

$$dp = -\kappa \frac{dV}{V} = \kappa \frac{d\rho}{\rho}, \quad (1)$$

где P - давление; V - объем; ρ - плотность.

Коэффициент пропорциональности κ называется модулем объемной упругости жидкости, или модулем упругости. Величина, обратная модулю упругости, называется коэффициентом сжимаемости $\beta = 1/\kappa$. Для конкретной рабочей жидкости κ зависит от температуры T° , давления P и скорости процесса деформаций ω , т.е. $\kappa = \kappa(T^\circ, P, \omega)$. Влияние скорости Процесса деформации обуславливается тем, что объемная деформация жидкости нарушает ее равновесное состояние и поэтому всегда сопровождается процессом восстановления равновесия.

При очень медленных, "статических" деформациях ($\omega \rightarrow 0$) установление равновесия полностью следует за изменением объема, причем в термодинамическом смысле этот процесс близок к изотермическому, и поэтому модуль упругости, характеризующий такой процесс, называют изотермическим: $\kappa_{\text{и}} = \kappa(T^\circ, P, 0)$

При очень быстрых деформациях ($\omega \rightarrow \infty$) установление равновесия не успевает следовать за изменением объема, причем в термодинамическом смысле этот процесс близок к изоэнтропийному и поэтому модуль упругости, характеризующий такой процесс, называют изоэнтропийным, или адиабатическим: $\kappa_{\text{а}} =$

$= \kappa(T^\circ, P, \infty)$. Аналогом $\kappa_{\text{а}}$ является так называемый "звуковой" модуль упругости

$$\kappa_{\text{а}} = a^2 \rho, \quad (2)$$

где $\alpha = \alpha(T, p, \omega)$ - скорость распространения звука.

Поскольку в таких сложных по своей структуре жидкостях, как минеральные масла гидросистем, возможно существование нескольких зон, в которых могут проходить релаксационные процессы, то при $0 < \omega < \infty$ могут существовать различные значения α (рис. 1). Так, при мгновенных изменениях объема

$V(t)$ установление нового равновесного состояния жидкости, определяемое постоянным значением функции $p(t)$, происходит с запаздыванием (рис. 2). Причиной релаксационных процессов, обычно имеющих место в экспериментальной установке, могут быть диффузия на границе пузырьков газа и жидкости, нестационарный теплообмен между жидкостью и стенками сосуда, релаксационные процессы в резиновых уплотнениях и т.п.

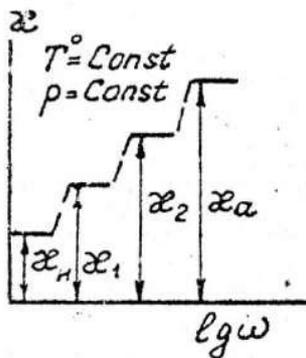


Рис. 1

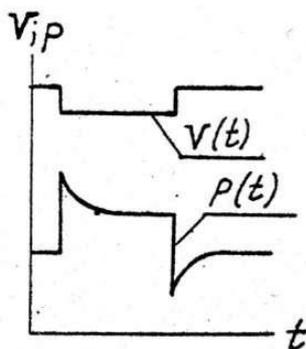


Рис. 2

Если при рассмотрении процесса деформации жидкости интересуются относительным изменением ее объема при непрерывном изменении давления от P_0 до P^* и постоянных фиксированных T^0 и ω , то его определяют интегрированием уравнения (1):

$$\int_{V^*}^V \frac{dV}{V} = - \int_{P^*}^P \frac{dP}{\alpha(P)}$$

Сравнивая объемы жидкости при двух давлениях, относительное изменение объема вычисляют по выражению.

$$\frac{V - V^*}{V^*} = - \frac{p - p^*}{\alpha'(p^*, p)}$$

где $\alpha'(p^*, p)$ - модуль упругости, отнесенный к давлению P и подсчитанный относительно состояния жидкости при давлении P^* ,

причем в общем случае $\alpha'(p^*, p) \neq \alpha(p)$ и лишь при $p = p^*$ $\alpha'(p^*, p^*) = \alpha(p^*)$. Величину $\alpha'(p^*, p)$ называют интервальным значением модуля упругости и относят эту величину к давлению p .

Большинство экспериментальных методов определения модуля упругости дают возможность замерить Δp и Δv и рассчитать затем значения $\alpha'(p^*, p)$, $\alpha'(p_2^*, p)$ (рис. 3). Тогда линия, соединяющая точки с абсциссами $p = p_1^*, p = p_2^*, \dots$, взятые на соответствующих кривых, представляет собой зависимость $\alpha(p)$.

В случае линейной зависимости $\alpha'(p^*, p)$ или при малых интервалах давлений $(p'' - p')$ и достаточно высоком значении α' допустимо без существенной погрешности определять α по формуле

$$\alpha \cong \frac{|p'' - p'|}{|v'' - v'|} \cdot v^* \quad (4)$$

и относить эту величину к среднему давлению

$$p^* = \frac{p' + p''}{2} \quad (5)$$

Работа № 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ АДИАБАТИЧЕСКОГО МОДУЛЯ УПРУГОСТИ ЖИДКОСТИ

Экспериментальное определение адиабатического модуля упругости жидкости основано на использовании уравнения (2). Таким образом, для определения зависимости $\alpha_a = \alpha_a(p)$ необходимо определить $\alpha = \alpha(p)$ и $\beta = \beta(p)$ при $T^0 = \text{const}$.

§ 1. Экспериментальное определение скорости распространения звука

Экспериментальная установка. Для определения скорости звука α используется так называемый импульсный метод с однократным пробегом цуга упругих волн. Генератор импульсов 1 (рис. 4) посылает прямоугольные импульсы на пьезоэлектрический излучатель 2, расположенный в жидкости 3. Электрические импульсы приводят к деформации излучателя 2, что вызывает возникновение и распространение в жидкости колебаний с частотой, равной собственной частоте пьезокристалла. Эти колебания достигают

приемного пьезокристалла 4, имеющего такую же собственную частоту колебаний, что и 2, и генерируют электрический сигнал, частота которого равна собственной частоте колебаний пьезокристалла 4. Этот сигнал подается на вертикально отклоняющие пластины осциллографа 5, работающего в "ждущем" режиме.

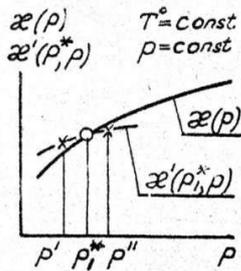


Рис. 3

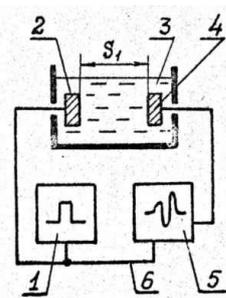


Рис. 4'

Одновременно с выходом основного импульса с генератора 1 на клеммы синхронизирующей развертки осциллографа 5 по проводу 6 передается синхроимпульс.

В результате на экране осциллографа появляется изображение прошедшего через жидкость цуга упругих волн, показанное на рис. 5а. Точка А соответствует моменту прихода синхроимпульса на осциллограф или, практически, моменту прихода основного импульса на излучающий пьезокристалл, а точка В - моменту прихода цуга упругих волн, прошедших через жидкость, к приемному пьезокристаллу. Отрезок АВ, измеренный в масштабе времени, представляет собой время T , необходимое для прохождения ультразвуку-

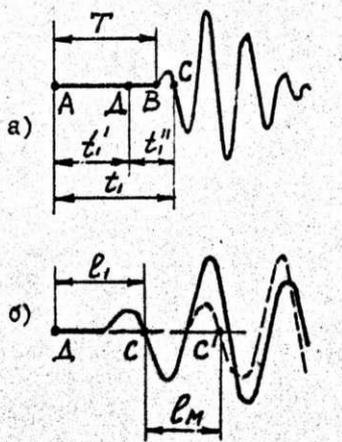


Рис.

вой волной расстояния между пьезокристаллами s_1 (см.рис. 4). Скорость звука может быть подсчитана по формуле $a = s_1 / T$. Однако достаточно точно определить расстояние s_1 , положение точек А и В и соответственно число меток времени на экране осциллографа затруднительно. Поэтому для более точного определения скорости звука описанный метод модифицирован.

Основой для более удобного способа замера a является генератор импульсов типа Г5-35 или другой аналогичный (рис.6) с двумя блоками формирования импульсов I' и I'' , причем импульсы блока I'' могут быть задержаны по сравнению с импульсами блока I' на регламентированное время. В этой схеме основной импульс с блока I' подается на излучающий пьезокристалл 2, синхроимпульс подается на развертку осциллографа 5 типа С1-54 или другого аналогичного с блока I'' по кабелю 6. При включении переключателей времени задержки блока I'' генератора импульсов в положения, соответствующие задержке t_1' сигнала синхроимпульса по отношению к моменту выхода сигнала, поступающего на пьезокристалл, имеется возможность уменьшить время развертки изображения на экране осциллографа и увеличить усиление по горизонтали.

В этом случае изображение сигнала, прошедшего через исследуемую жидкость 3, имеет вид, показанный на рис. 5б сплошной линией. При этом $t_1 = t_1' + t_1''$, где t_1 - время, измеряемое трезком от т. А до произвольно выбранной т. С;

t_1'' - время, соответствующее отрезку ДС на экране осциллографа.

Перемещая затем пьезокристалл 4 с помощью установочного винта 7 на расстояние $s = (s_2 - s_1)$ и измеряя соответствующее новому его положению s_2 время $t_2 = t_2' + t_2''$, можно найти скорость звука по выражению

$$a = \frac{s}{|t_1 - t_2|}$$

Для создания давления в рабочей камере к ней подсоединен ручной винтовой пресс 8. Давление измеряется с помощью образцового манометра 12.

Эксперимент выполняется при комнатной температуре, измеряемой с помощью термометра.

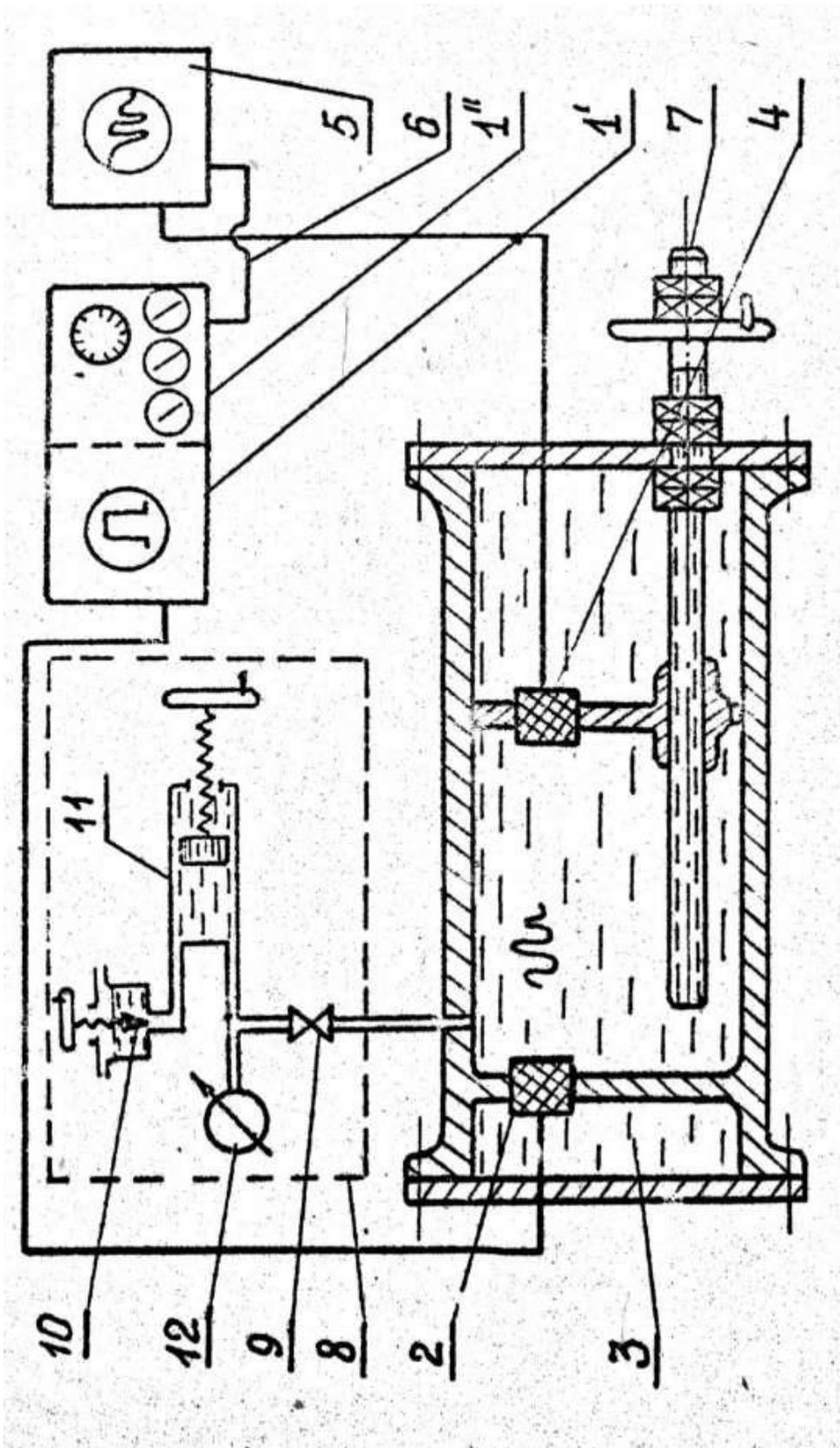


Рис.

Порядок проведения работа

1. Включить осциллограф С1-54 нажатием клавиш "сеть". Включить тумблер "сеть" генератора Г5-35. Через 15-20 мин. прогрева приборы готовы к работе.

ВНИМАНИЕ! Не рекомендуется менять положение ручек управления генератора и осциллографа, не указанных в п.п. 2 и 3, так как они установлены в положения, соответствующие оптимальной работе измерительной системы.

2. Установить переключатели времени задержки генератора в положения, которые позволят получить на экране осциллографа изображение, аналогичное представленному на рис. 5б.

3. С помощью ручек "яркость", "фокус", "астигматизм" осциллографа установить необходимую яркость и четкость изображения.

С помощью ручек, обозначенных двухсторонними вертикальной и горизонтальной стрелками, установить изображение сигнала в центральной части экрана.

Используя ручки "длительность плавко" и "усиление" отрегулировать размеры сигнала.

4. Определить масштаб изображения сигнала по горизонтали М. Для этого выбрать какую-либо характерную точку на изображении сигнала при его пересечении с горизонтальной осью экрана осциллографа, например точку С на рис. 5. С помощью переключателей времени задержки генератора изменить время задержки синхроимпульса на 1 мкс, чему будет соответствовать изображение, показанное пунктирной линией на рис. 5б. Измерить по шкале на экране осциллографа расстояние l_m между точками С и С'. Повторить этот замер не менее 5 раз. Результаты занести в протокол (приложение 1).

5. Вращая винт 7, установить пьезокристалл 4 приблизительно в одно из крайних положений, совместив указатели на винте и корпусе.

6. Подготовить к работе пресс 8, для чего закрыть вентиль 9 и открыть вентиль 10. Заполнить прессовый цилиндр II жидкостью из бачка. Затем открыть вентиль 9, что обеспечит создание в рабочей камере атмосферного давления.

7. Замерить и занести в протокол время, определенное по переключателям времени задержки генератора t_1' , и длину l_1 отрезка D_c , определенную по экрану осциллографа и соответствующую времени t_1'' .

8. Закрывать вентиль 10. Устанавливая в рабочей камере при помощи пресса давления $p = 2,5; 5,0; 7,5; \dots; 20$ МПа, измерить соответствующие каждому давлению время $(t'_i)_i$ и отрезок l_{ii}

После выполнения замера при максимальном давлении с помощью пресса постепенно уменьшать давление до атмосферного, занося измеренные $(t'_i)_i$ и l_{ii} в протокол. Для получения значений при атмосферном давлении открыть вентиль 10. Чтобы упростить дальнейшие расчеты, рекомендуется в каждом опыте для фиксированного давления устанавливать то же время t'_i , что и при первом замере.

9. Повторить п. 7, 8 не менее 3 раз.

10. Переместить пьезокристалл 4 на расстояние $S = 20$ мм, для чего повернуть маховик винта 7 на 10 оборотов. Совместить указатели на винте и корпусе.

11. Повторить последовательно пп. 7-9, занося данные по замеру $(t'_2)_i$ и l_{2i} в протокол.

Вычисление скорости распространения звука.

1. Масштаб изображения сигнала по горизонтали

$$M = \frac{m}{\sum_{i=1}^m (l_{\mu})_i} \quad \frac{\text{МКС}}{\text{ММ}}$$

Где m - число опытов.

2. Время t_{1i} и t_{2i} для каждого опыта

$$t_{1i} = t'_1 + M \cdot l_{1i}, \quad t_{2i} = t'_2 + M \cdot l_{2i}.$$

3. При постоянном давлении средние значения времени \bar{t}_1 и \bar{t}_2 :

$$\bar{t}_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_{1i}, \quad \bar{t}_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_{2i}.$$

где n - число измерений.

Резко отличающиеся значения t_i отбросить, считая их промахами.

4. Средняя скорость распространения звука при каждом из значений $p = \text{const}$

$$\bar{a} = \frac{S}{|\bar{t}_1 - \bar{t}_2|}.$$

5. По полученным данным построить график (рис. 7) зависимости $a = a(p)$

Расчет относительной погрешности определения скорости звука [1. 2].

1. Средняя квадратичная ошибка серии измерений t_i

$$\sigma_{t_i} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (t_{i1} - \bar{t}_1)^2}$$

2. Средняя квадратичная ошибка среднего арифметического \bar{t}_1

$$\bar{\sigma}_{t_1} = \frac{\sigma_{t_i}}{\sqrt{n}}$$

3. Полуширину доверительного интервала для t_1 най-

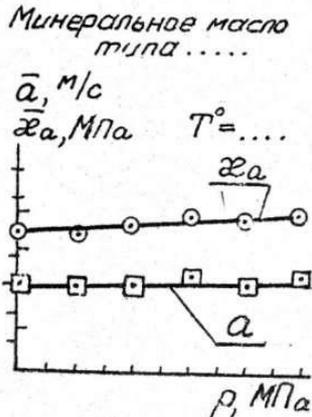


Рис. 7

дем, задавшись значением надежности α и определив коэффициент Стьюдента $t_{\alpha}(n)$ по табл. 1:

$$\Delta t_1 = t_{\alpha}(n) \cdot \bar{\sigma}_{t_1}$$

Значение коэффициентов Стьюдента

Таблица 1

$\alpha \backslash n$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	40	∞
0,80	3,1	1,9	1,6	1,5	1,5	1,4	1,4	1,4	1,4	1,3	1,3
0,90	6,3	2,9	2,4	2,1	2,0	1,9	1,9	1,9	1,8	1,7	1,6
0,95	12,7	4,3	3,2	2,8	2,6	2,4	2,4	2,3	2,3	2,0	2,0
0,98	31,8	7,0	4,5	3,7	3,4	3,1	3,0	2,9	2,8	2,4	2,3

Примечание. Значение погрешности результатов измерений времени \bar{t}_1 может оказаться сравнимым погрешностями приборов, используемых для замера времени t_1 или t''_1 , - соответственно $\delta t'_1$ и $\delta t''_1$. Значение $\delta t'_1$ определяется погрешностью установки времени задержки генератором и равно $\delta t'_1 = 0,2 \text{ мкс}$; $\delta t''_1$ определяется погрешностью замера отрезка L равной $\delta l_1 = 0,5 \text{ мм}$, и рассчитывается по формуле $\delta t''_1 = \frac{L}{a} \cdot \delta l_1$. Если $\delta t'_1$ или $\delta t''_1$ окажутся сравнимы с рассчитанным значением Δt_1 , определяемым случайными погрешностями, то для вычисления Δt_1 надо воспользоваться формулой

$$\Delta t_1 = \sqrt{(t_{\alpha}(n) \bar{\sigma}_{t_1})^2 + \left(\frac{K_{\alpha}}{S}\right)^2 (\delta t'_1)^2 + \left(\frac{K_{\alpha}}{S}\right)^2 (\delta t''_1)^2}$$

где $\kappa_\alpha = t_\alpha(\infty)$

4. Аналогично выполняется расчет полуширины доверительного интервала Δt_2 времени \bar{t}_2 , причем необходимо задаваться тем же значением α , что и при вычислении Δt_1

5. Полуширина доверительного интервала скорости звука \bar{a} может быть подсчитана по формуле

$$\Delta a = \sqrt{\left(\frac{\partial a}{\partial t_1}\right)^2 \cdot (\Delta t_1)^2 + \left(\frac{\partial a}{\partial t_2}\right)^2 \cdot (\Delta t_2)^2 + \left(\frac{\partial a}{\partial S}\right)^2 \cdot (\Delta S)^2},$$

где частные производные $\left(\frac{\partial a}{\partial t_1}\right)$, $\left(\frac{\partial a}{\partial t_2}\right)$, $\left(\frac{\partial a}{\partial S}\right)$ вычисляются при средних значениях параметров: $t_1 = \bar{t}_1$, $t_2 = \bar{t}_2$,

$S = \bar{S}$, а значения \bar{S} и ΔS принимаются равными

$\bar{S} = 20$ мм и $\Delta S = 0,06$ мм.

6. Относительная погрешность результата измерений скорости звука

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta a}{\bar{a}} \cdot 100\%$$

§ 2. Определение плотности жидкости

Плотность жидкости при атмосферном давлении определяется при помощи стандартного денсиметра с ценой деления 0,001 г/см³.

Принцип действия денсиметра основан на законе Архимеда. Плотность жидкости находится по глубине погружения в нее прибора, причем за показания денсиметра следует принимать уровень его погружения, определяемый уровнем жидкости в сосуде с маслом, а не высотой поднятая жидкости за счет смачиваемости стекла.

Для расчета зависимости плотности от давления можно воспользоваться эмпирической зависимостью

$$\rho = \rho_0 + k\rho,$$

Где ρ_0 - плотность при атмосферном давлении, кг/м³;

k - эмпирический коэффициент, значения которого для ряда минеральных масел приведены в табл. 2.

Коэффициент k при $T^\circ = 293^\circ\text{C}$

Минеральное масло	k , кг/(м ³ МПа)
МГЕ-10А	0,6
Индустриальное И20	0,5
Турбинное Т22	0,38
АМГ-10	0,5
Веретенное АУ	0,43

Погрешность при определении плотности может быть принята равной цене деления денсиметра и составляет $\delta \rho = 0,001 \text{ г/см}^3$.

§ 3. Определение адиабатического модуля упругости жидкости

Модуль упругости рассчитывается при фиксированном давлении по формуле $\bar{\kappa}_\alpha = \bar{\alpha}^2 \cdot \rho$.

На график (см.рис.7) наносится зависимость $\bar{\kappa}_\alpha = \bar{\kappa}_\alpha(\rho)$ по формуле

Полуширина доверительного интервала адиабатического модуля упругости

$$\Delta \bar{\kappa}_\alpha = \sqrt{\left(\frac{\partial \bar{\kappa}_\alpha}{\partial \bar{\alpha}}\right)^2 \cdot \Delta \bar{\alpha}^2 + \left(\frac{\partial \bar{\kappa}_\alpha}{\partial \rho}\right)^2 \cdot \delta \rho^2},$$

где частные производные $\partial \bar{\kappa}_\alpha / \partial \bar{\alpha}, \partial \bar{\kappa}_\alpha / \partial \rho$ вычисляются при среднем значении $\bar{\alpha}$ и том же давлении, для которого проводился расчет $\Delta \bar{\alpha}$, и при значении ρ , вычисленном для того же давления.

Относительная погрешность результата измерения $\bar{\kappa}_\alpha$

$$\epsilon_{\bar{\kappa}_\alpha} = \frac{\Delta \bar{\kappa}_\alpha}{\bar{\kappa}_\alpha} \cdot 100\%.$$

Содержание отчета

1. Схема экспериментальной установки с кратким описанием ее работы.
2. Основные расчетные формулы.
3. Протокол с результатами замеров и последующих вычислений.
4. Графики зависимостей $\bar{\alpha} = \bar{\alpha}(\rho)$ и $\bar{\kappa}_\alpha = \bar{\kappa}_\alpha(\rho)$

Контрольные вопросы

1. В чем состоит принцип замера скорости распространения звука в жидкости?
2. Как определяется плотность жидкости при атмосферном давлении?
3. Какие основные факторы влияют на погрешность определения адиабатического модуля упругости?

Работа № 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО МОДУЛЯ УПРУГОСТИ ЖИДКОСТИ

Экспериментальное определение изотермического модуля упру-

гости жидкости основано на использовании уравнения (3):

$$\alpha'_n(p^*, p) = (p - p^*) \cdot \frac{V^*}{|V - V^*|}$$

и последующей обработкой экспериментальных данных для получения зависимости $\alpha'_n(p)$

Таким образом, для определения зависимости $\alpha'_n(p)$ необходимо определить зависимость $V(p)$ для герметично запертого объема жидкости.

Экспериментальная установка. Для определения зависимости $\alpha'_n(p)$ используется так называемый "метод поршня".

В толстостенной рабочей камере 1 (рис. 8), заполненной исследуемой жидкостью, расположен плунжер 2. Перемещения плунжера осуществляются о помощью установочного винта 3, ввернутого в резьбовое отверстие корпуса 4.

Для создания предварительного давления в рабочей камере к ней подсоединен ручной винтовой пресс 5 с контрольным манометром 6. Давление в исследуемой жидкости замеряется с помощью датчика давления 7, например, индуктивного или тензометрического типа. Электрическая мостовая схема датчика запитывается источником напряжения 8, а сила тока, возникающего в диагонали моста и зависящая от давления в рабочей камере, замеряется с помощью микроамперметра 9. Для балансировка моста при атмосферном давлении используется балансирующее сопротивление 10,

Датчик давления имеет линейную характеристику. Особенностью конструкции датчика давления является наличие пробки, позволяющей при заложении рабочей камеры исследуемой жидкостью тщательно пролить датчик, полностью удалив воздух из его полости.

Замер хода плунжера в установке осуществляется с помощью индикатора II с ценой деления 0,01 мм и пределом измерения 10 мм.

Эксперимент выполняется при комнатной температуре, контролируемой с помощью термометра.

Особое внимание при подготовке установки к эксперименту обращается на необходимость отсутствия пузырьков воздуха в исследуемой жидкости. С этой целью после заполнения рабочей камеры жидкостью она в течение суток остается стоять с открытой крышкой. За это время пузырьки воздуха всплывают и удаляются из жидкости. После закрытия крыша и проливки датчика давления испытываемая жидкость выдерживается дательное время (от 20 - 30 ча-

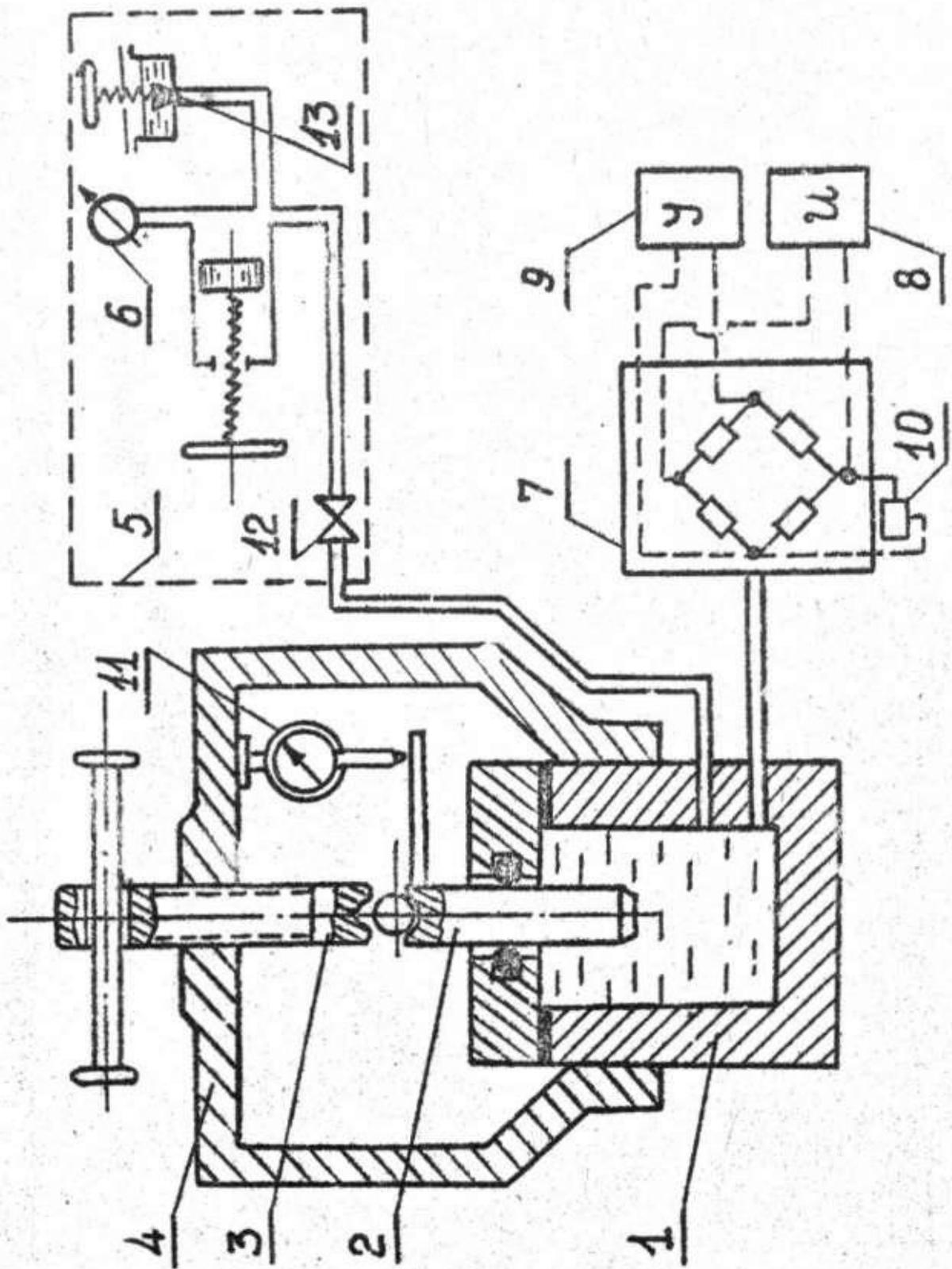


Рис. 8

сов до нескольких суток) под давлением 20-25 МПа для растворения микропузырьков воздуха, которые могли не всплыть.

Проверка времени установления примерно постоянного значения давления, а следовательно, и температуры после смещения плунжера на 1 мм показала, что при заполнении рабочей камеры минеральным маслом для этого достаточно примерно 5-15 мин.

Порядок проведения работы

1. Включить источник питания и микроамперметр. Примерно через 1 час прогрева приборы готовы к работе.

2. Подготовить к работе пресс 5, для чего закрыть вентиль 12 и открыть вентиль 13. Заполнить прессовый цилиндр жидкостью из бачка, вращая его винт.

3. Проверить положение плунжера в рабочей камере, обеспечив его максимально выдвинутое положение, для чего вращать установочный винт 3 против часовой стрелки до упора.

4. Установить в рабочей камере атмосферное давление, для чего открыть вентиль 12. С помощью сопротивления 10 сбалансировать измерительный мост датчика, добиваясь нулевого значения силы тока в его диагонали.

5. Закрыть вентиль 13 и с помощью прессового цилиндра создать в жидкости давление $P_{т} = 10$ МПа. Замерить и записать в протокол (приложение 2) ток $I_{т}$, определяющий масштаб давлений. Уменьшить давление, а затем вновь установить в рабочей камере давление 10 МПа. Вновь замерить и записать в протокол $I_{т}$. Повторить этот замер не менее 5 раз.

6. Уменьшить давление примерно до 0,5-1,0 МПа и закрыть вентиль 12. Установить на ноль стрелку индикатора II.

Рабочая камера готова к выполнению эксперимента.

7. После установления примерно постоянного значения давления и температуры, о чем свидетельствует установившееся показание микроамперметра, замерить и занести в протокол ток $I_{т}$ соответствующий исходному положению плунжера.

8. Вращая винт 3 по часовой стрелке, переместить плунжер на расстояние $\Delta S = 1$ мм. После установления примерно постоянного значения давления замерить и занести в протокол ток $I_{т}$.

9. Повторить п.8 до достижения либо заданного давления, либо давления, соответствующего максимальному показанию микро-

амперметра, либо совершить максимальное перемещение плунжера, равное 10 мм.

10. Вращая винт 3 против часовой стрелки, выдвигать плунжер из рабочей камеры, заносая в протокол значения тока, соответствующие каждому перемещению плунжера на 1 мм.

11. Повторить пл. 8-11 не менее 3 раз.

12. Если выполненная серия экспериментов не обеспечивает достижения заданного давления, то надо выдвинуть плунжер из рабочей камеры и, открыв вентиль, с помощью пресса создать в жидкости давление, примерно разное максимально достигнутому в первой серии опытов, закрыть вентиль 12 и повторить пл. 7-11.

Изотермический модуль упругости можно рассчитать, используя формулу (4), так как в экспериментальной установке используются малые интервалы давлений, а модуль упругости жидкостей гидросистем достаточно высок и не очень сильно зависит от давления:

$$(\bar{\alpha}_n)_i = \frac{|P_{i+1} - P_i|}{|V_{i+1} - V_i|} \cdot V_k,$$

Где $V_k = 143,1 \text{ см}^3$ - объем исследуемой жидкости при среднем положении плунжера $|V_{i+1} - V_i| = \frac{\pi d^2}{4} \Delta S = \Delta V$ - изменение объема жидкости при перемещении плунжера на ΔS , $\Delta S = 1 \text{ мм}$, $d = 15 \text{ мм}$.

Разница давлений при изменении объема от V_{i+1} до V_i

$$|P_{i+1} - P_i| = \frac{P_T}{J_T} (\bar{J}_{i+1} - \bar{J}_i),$$

$$\bar{J}_T = \frac{1}{n_T} \sum_{j=1}^{n_T} J_{Tj} \quad (n_T - \text{число измерений } J_T);$$

$$\text{где } \bar{J}_i = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} J_{ij}$$

среднее значение тока при положении поршня, соответствующем объему V_i ; n_i - число измерений J_{ij}

При вычислении \bar{J}_T и \bar{J}_i резко отличающиеся значения J_{Tj} и J_{ij} рекомендуется отбросить, считая их промахами.

Таким образом, для расчета $(\bar{\alpha}_n)_i$ можно воспользоваться формулой

$$(\bar{\alpha}_n)_i = \frac{P_T}{J_T} \cdot \frac{V_k}{\Delta V} \cdot |\bar{J}_{i+1} - \bar{J}_i| \dots$$

Подсчитываются давления, к которым относятся соответствующие значения $(\bar{\alpha}_n)_i$

$$P_i = \frac{P_T}{J_T} \cdot \frac{\bar{J}_{i+1} - \bar{J}_i}{2}$$

По полученным данным строится график (рис. 9) зависимости $(\bar{\alpha}_n)(P)$.

Минеральное масло типа....

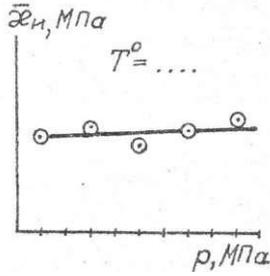


Рис. 9

Расчет относительной погрешности, определения изотермического модуля упругости. 1. Средние квадратичные ошибки серии измерений $J_{i,j}$ и $J_{T,j}$

$$\sigma_{J_i} = \sqrt{\frac{1}{n_i - 1} \cdot \sum_{j=1}^{n_i} (J_{i,j} - \bar{J}_i)^2},$$

$$\sigma_{J_T} = \sqrt{\frac{1}{n_T - 1} \cdot \sum_{j=1}^{n_T} (J_{T,j} - \bar{J}_T)^2}.$$

2. Средние квадратичные ошибки среднего арифметического \bar{J}_i и \bar{J}_T

$$\sigma_{\bar{J}_i} = \frac{\sigma_{J_i}}{\sqrt{n_i}}, \quad \sigma_{\bar{J}_T} = \frac{\sigma_{J_T}}{\sqrt{n_T}}$$

3. Полуширину доверительного интервала для \bar{J}_i и \bar{J}_T найти, задавшись значением надежности α и определив коэффициент Стьюдента $t_\alpha(n)$ по табл.1:

$$\Delta J_i = t_\alpha(n_i) \cdot \sigma_{\bar{J}_i}, \quad \Delta J_T = t_\alpha(n_T) \cdot \sigma_{\bar{J}_T}$$

Примечание. Если погрешность результатов измерений ΔJ_i или ΔJ_T окажется сравнимой с погрешностью, определяемой при сбалансированном мосте точностью поддержания постоянного напряжения и погрешностью замера тока, то для расчета ΔJ_i и ΔJ_T следует воспользоваться формулами

$$\Delta J_i = \sqrt{(t_\alpha(n_i) \cdot \sigma_{\bar{J}_i})^2 + \left(\frac{K_\alpha}{3}\right)^2 \cdot \delta_{J_i}^2},$$

$$\Delta J_T = \sqrt{(t_\alpha(n_T) \cdot \sigma_{\bar{J}_T})^2 + \left(\frac{K_\alpha}{3}\right)^2 \cdot \delta_{J_T}^2},$$

где $K_\alpha = t_\alpha(\infty)$; $\delta_{J_T} = \delta_{J_i} = 0,005$.

3. Полуширина доверительного интервала изотермического модуля упругости

$$\Delta \bar{\xi}_u = \sqrt{\left(\frac{\partial \bar{\xi}_u}{\partial p_T}\right)^2 \cdot \delta_{p_T}^2 + \left(\frac{\partial \bar{\xi}_u}{\partial J_T}\right)^2 \cdot \Delta J_T^2 + \left(\frac{\partial \bar{\xi}_u}{\partial V_K}\right)^2 \cdot \delta_{V_K}^2 + \left(\frac{\partial \bar{\xi}_u}{\partial (\Delta V)}\right)^2 \cdot \delta_{(\Delta V)}^2 + 2 \left(\frac{\partial \bar{\xi}_u}{\partial J_i}\right)^2 \cdot \Delta J_i^2},$$

где все частные производные вычисляются при средних значениях параметров \bar{J}_T и \bar{J}_i

Значение δ_{p_T} определяется классом точности K манометра, используемого для тарировки датчика давления и вычисляется по формуле

$$\delta p_T = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{V_k}{100} \cdot N_{max}$$

Где N_{max} - максимальное показание шкалы манометра, МПа.

Погрешность определения объема камеры δV_k зависит от изменения под действием давления объемов камеры, датчика давления, трубки, соединяющей камеру с прессом, а также связана с неучитываемым в расчете изменением объема камеры при смещении плунжера. Суммарная погрешность, вносимая этими систематическими погрешностями (в расчете на среднее давление в установке и смещение плунжера на 2 мм от его среднего положения), вместе со случайными погрешностями при тарировке объема V_k составляет $\sim 0,3\%$ от объема V_k , т.е. $\delta V_k \approx 0,4 \text{ см}^3$.

Систематические погрешности при определении изменения объема ΔV имеют ту же природу, что и при определении объема V_k . Случайные погрешности связаны с замером хода плунжера с помощью индикатора, имеющего цену деления 0,01 мм. Суммарная погрешность $\delta(\Delta V)$ в расчете на ход $\Delta s = 1 \text{ мм}$ равна

$$\delta(\Delta V) \approx 4 \cdot 10^{-4} \text{ см}^3.$$

4. Относительная погрешность результата измерения $\bar{\alpha}_u$

$$\varepsilon_{\alpha_u} = \frac{\Delta \bar{\alpha}_u}{\bar{\alpha}_u} \cdot 100\%$$

Содержание отчета

1. Схема экспериментальной установки с кратким описанием ее боты.
2. Основные расчетные формулы.
3. Протокол с результатами замеров и последующих вычислений.
4. График зависимости $\bar{\alpha}_u = \bar{\alpha}_u(p)$

Контрольные вопросы

1. Какой метод используется для замера изотермического модуля упругости жидкости?
2. Чем определяется в основном точность замера изотермического модуля упругости жидкости?

Литература

1. Лабораторный курс гидравлики, насосов и гидropередач, Под ред. С.С. Руднева и Л.Г. Годвидза. - М.: Машиностроение, 1974.

2. М.И. Киселев, И.Н. Соколова. Определение погрешностей при измерении периода колебаний физического маятника. Методические указания к лабораторной работе М-1 по общему курсу физики. -М.: изд. МВТУ, 1978.

Ирина Александровна Абарина

Редактор Ю.Н. Хлебинский

Корректор Л.И. Малютина

Заказ 1153
Бесплатно

Объем 1,25 п.л.(1уч.-изд.л.)Тираж 500 экз.
Подписано в печать 22.06.83 г. План 1983 г., № 77.

Типография МВТУ. 107005, Москва, Б-5, 2-я Бауманская, 5