

Отчет по лабораторной работе 2.1.5

Исследование термических эффектов при упругих деформациях

Фамилия Имя, Группа

10 февраля 2026 г.

Аннотация

Цель работы: 1) исследовать зависимость удлинения резины от нагрузки при постоянной температуре; 2) измерить изменение температуры резины при адиабатическом растяжении и определить её теплоёмкость.

Оборудование: резиновая полоса в теплоизолированном кожухе, набор грузов, термопара (медь-константан), усилитель, осциллограф/микровольтметр, измерительная линейка.

1 Теоретическая справка

Рассматривается растяжение тонкой полосы длиной l под действием силы f . Работа, совершаемая над образцом:

$$\delta A = -f dl + P dV,$$

где P — атмосферное давление. Для резины вторым слагаемым можно пренебречь, так как $P dV \ll f dl$. Тогда первое начало термодинамики принимает вид:

$$dU = T dS + f dl. \quad (1)$$

Вводится свободная энергия $F = U - TS$, дифференциал которой с учётом (1) равен:

$$dF = -S dT + f dl. \quad (2)$$

Отсюда следуют соотношения:

$$f = \left(\frac{\partial F}{\partial l} \right)_T, \quad S = - \left(\frac{\partial F}{\partial T} \right)_l. \quad (3)$$

Дифференцируя первое соотношение (3) по T , а второе по l , и учитывая равенство смешанных производных, получаем соотношение Максвелла:

$$\left(\frac{\partial f}{\partial T} \right)_l = - \left(\frac{\partial S}{\partial l} \right)_T. \quad (4)$$

Теплота, поглощаемая образцом при изотермическом растяжении, выражается как:

$$\delta Q|_T = T dS|_T = -T \left(\frac{\partial f}{\partial T} \right)_l dl|_T. \quad (5)$$

Из (1) можно получить общее выражение для силы:

$$f = \left(\frac{\partial U}{\partial l} \right)_T - T \left(\frac{\partial S}{\partial l} \right)_T. \quad (6)$$

В обычных твёрдых телах доминирует первое слагаемое (изменение внутренней энергии), а в резине — второе (энтропийный вклад).

Большинство материалов при адиабатическом растяжении охлаждаются. Резина проявляет аномальный эффект: при быстром растяжении она нагревается.

1.1 Термодинамика резины

Основная модель — «**идеальная резина**», в которой внутренняя энергия зависит только от температуры: $U = U(T)$. Упругость обусловлена изменением энтропии S .

Для идеальной резины при $T = \text{const}$ ($dU = 0$) из (6) следует:

$$f = -T \left(\frac{\partial S}{\partial l} \right)_T. \quad (7)$$

Сила растяжения пропорциональна абсолютной температуре: $f(T, l) = (T/T_0) \cdot \tilde{f}(l/l_0)$.

Из соотношения Максвелла (4) и выражения (7) получаем:

$$f = T \left(\frac{\partial f}{\partial T} \right)_l. \quad (8)$$

При **адиабатическом растяжении** ($dS = 0$) из (1) имеем $dU = fdl$. Так как для идеальной резины $dU = C_l dT$, где C_l — теплоёмкость при постоянной длине, то для малых ΔT :

$$\Delta T \approx \frac{1}{C_l} \int_{l_0}^l f dl = \frac{A_{\text{внеш}}}{C_l}. \quad (9)$$

В общем случае для любого тела изменение температуры при адиабатическом растяжении выражается как:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial l} \right)_S = \frac{T}{C_l} \left(\frac{\partial f}{\partial T} \right)_l. \quad (10)$$

Знак эффекта определяется знаком коэффициента теплового расширения $\alpha = \frac{1}{l} \left(\frac{\partial l}{\partial T} \right)_f$. Для большинства тел $\alpha > 0$, и они охлаждаются; для резины при достаточно больших растяжениях $\alpha < 0$, что приводит к нагреву.

1.2 Закон растяжения резины

Эмпирическая зависимость (модель Кюна для полимерной сетки):

$$f(T, \lambda) = \frac{s_0 E}{3} \left(\lambda - \frac{1}{\lambda^2} \right), \quad (11)$$

где $\lambda = l/l_0$ — относительное удлинение, s_0 — площадь сечения, $E \sim T$ — модуль Юнга. При малых деформациях ($\lambda \rightarrow 1$) переходит в закон Гука: $f \approx s_0 E (\lambda - 1)$.

Для модели идеальной резины изменение энтропии как функции растяжения при постоянной температуре даётся выражением:

$$\Delta S(\lambda) \approx -\text{const} \cdot \left(\lambda^2 + \frac{2}{\lambda} \right). \quad (12)$$

1.3 Молекулярная структура

Резина представляет собой сетку из полимерных цепей, соединённых поперечными «сшивками». Растяжение вызывает разворачивание свёрнутых макромолекул, что увеличивает порядок и **уменьшает энтропию**. Это объясняет энтропийную природу упругости и нагрев при адиабатическом растяжении.

2 Экспериментальная установка

Установка (рис. 1) включает:

1. **Образец (1)** — резиновая полоса.
2. **Теплоизолирующий кожух (2)** для минимизации теплообмена.
3. **Зажимы (3)** для крепления. Нижний зажим перемещается по направляющим (4).
4. **Линейка (5)** для измерения удлинения Δl .
5. **Платформа (6)** для размещения грузов, создающих силу $F = mg$.
6. **Термопара (9)** (медь-константан). Рабочий спай вшит в образец, компенсационный (10) находится в кожухе. Подключена к усилителю и осциллографу/микровольтметру.
7. **Упор (7)** для фиксации максимального удлинения.

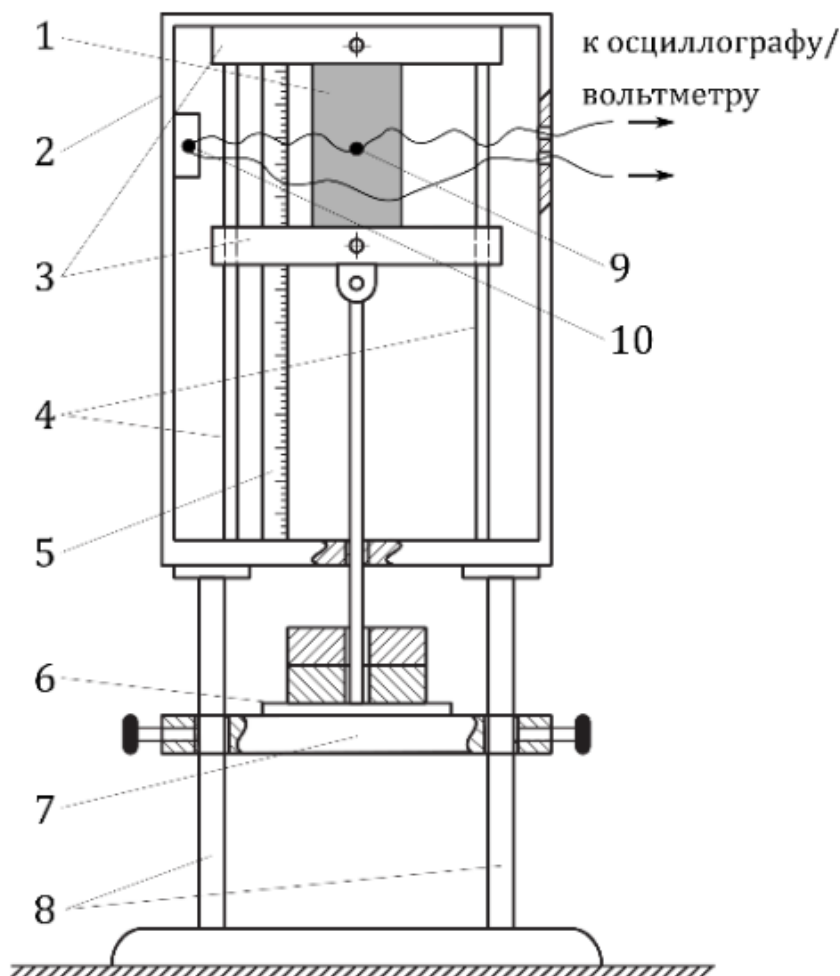


Рисунок 1: Схема экспериментальной установки.