

## ЛАБОРАТОРИЯ «КВАНТА»

# Об измерении энергии магнитного поля

**Д. ЦЕЛЫХ**

В ШКОЛЬНОМ курсе физики обсуждаются конкретные приемы, позволяющие измерить энергию электрического поля  $W_э$ . Например, можно разрядить конденсатор емкостью  $C$ , первоначально заряженный до напряжения  $U$ , через резистор сопротивлением  $R$  и микроамперметр. Построив график зависимости мощности тока  $P$  от времени, можно найти количество теплоты  $Q$ , выделившееся при разрядке конденсатора через резистор, которое равно

площади фигуры под графиком. В соответствии с законом сохранения энергии, это количество теплоты будет определяться энергией электрического поля конденсатора:

$$W_э = \frac{CU^2}{2}.$$

Но школьникам ничего не рассказывается о способе измерения энергии магнитного поля. Попытаемся восполнить этот пробел.

Как известно, вокруг проводника с током существует магнитное поле, энергия которого определяется силой тока  $I$  и индуктивностью проводника  $L$ :

$$W_м = \frac{LI^2}{2}.$$

Получить это выражение проще всего на основании аналогии между явлениями инерции и самоиндукции. Так, инерция приводит к тому, что под действием силы тело не мгновенно приобретает определенную скорость, а постепенно. Точно так же за счет самоиндукции при замыкании цепи сила тока не сразу приобретает определенное значение, а нарастает постепенно. Аналогом механической скорости  $v$  в электродинамике является сила тока  $I$  как величина, характеризующая движение электрических зарядов. А аналог массы  $m$  — это индуктивность  $L$ , так как именно она определяет быстроту изменения силы тока. Поэтому энергию магнитного поля можно считать величиной, подобной кинетической энергии поступательно движущегося тела  $mv^2/2$ , т.е. равной  $LI^2/2$ . (Для более строгого обоснования этой формулы надо вычислить работу ЭДС самоиндукции при изменении силы тока в контуре. Прделайте это сами.)

Этот теоретический результат допускает экспериментальную проверку. Энергию магнитного поля можно опре-

*Дмитрий Целых прислал эту статью в редакцию в марте прошлого года, будучи учеником 11 класса общеобразовательного лицея №1 г. Петропавловска.*

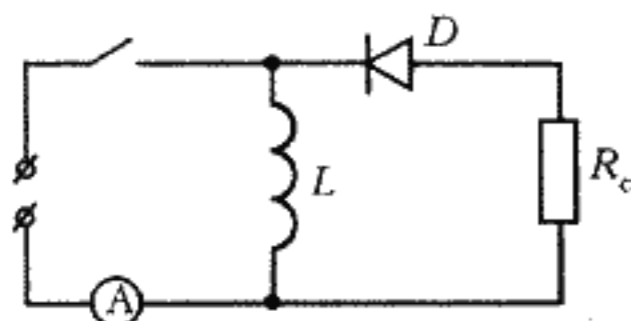


Рис. 1

делить по количеству выделившейся теплоты. Суть опыта такова: при прохождении тока самоиндукции в электрической цепи, изображенной на рисунке 1, на активном сопротивлении  $R_c$  выделяется количество теплоты, равное убыли энергии магнитного поля. При замыкании цепи ток проходит только по катушке с индуктивностью  $L$ , так как диод  $D$  включен в обратном направлении по отношению к полярности источника тока. А при размыкании цепи ток самоиндукции проходит через резистор, на котором и выделяется тепло.

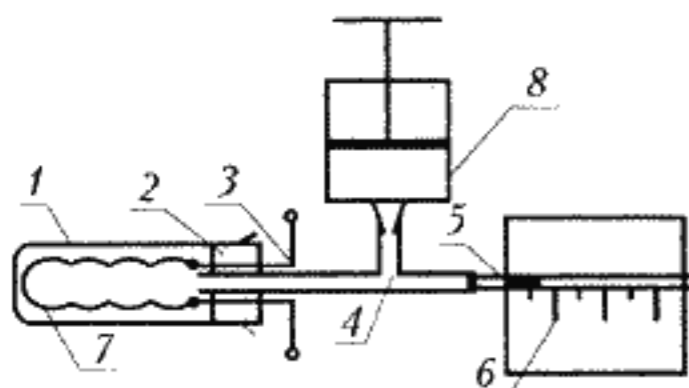


Рис. 2

Для измерения количества теплоты используем термоскоп (рис.2). Он изготовлен из пробирки, в которой находится нагревательная спираль — наш резистор сопротивлением  $R_c$ , и капилляра со столбиком жидкости. При прохождении тока через спираль воздух в пробирке, нагреваясь, расширяется, и столбик жидкости смещается на некоторое расстояние  $\Delta x$ . Количество теплоты, которое получает воздух при нагревании, определяется по формуле

$$Q = cm\Delta T,$$

где  $c$  — удельная теплоемкость воздуха,  $m$  — его масса,  $\Delta T$  — изменение температуры, которое найдем из уравнения Менделеева — Клапейрона. Так как нагревание происходит при постоянном давлении  $p$ , изменение температуры связано с изменением объема  $\Delta V$ :

$$p\Delta V = \frac{m}{M} R\Delta T,$$

где

$$\Delta V = S\Delta x = \frac{\pi d^2}{4} \Delta x$$

( $d$  — диаметр капилляра). Выразив отсюда разность температур и подставив ее в уравнение для  $Q$ , получим

$$Q = \frac{\pi p d^2 \Delta x c M}{4 R}.$$

Таким образом, количество теплоты, выделившееся в термоскопе, прямо пропорционально смещению столбика жидкости  $\Delta x$ .

Так как катушка индуктивности тоже имеет активное сопротивление  $R_k$ , количество теплоты, выделившееся на резисторе, а значит и полученное воздухом, определяется по формуле

$$Q = \frac{W R_c}{R_c + R_k},$$

которая показывает, что и энергия магнитного поля  $W$  также прямо пропорциональна смещению столбика жидкости  $\Delta x$  в капилляре термоскопа.

Непосредственно в нашем опыте был использован диод типа Д226Б, дроссельная катушка с числом витков 3600 и с сердечником (входит в перечень оборудования школьного кабинета физики), а в качестве резистора — константановая проволока диаметром 0,05 мм и длиной 35—40 см. Термоскоп (см. рис.2), используемый для определения количества теплоты, состоит из пробирки 1, резиновой пробки 2, медных проводников 3, тройника 4, капиллярной трубки от спиртового термометра со столбиком жидкости 5, шкалы 6, константановой спирали 7, шприца 8 (для регулирования

положения столбика жидкости в капилляре).

Проделав опыт несколько раз, с разными значениями силы тока  $I$  в цепи катушки индуктивности, т.е. с разными начальными запасами энергии магнитного поля, зафиксируем соответствующие смещения столбика жидкости  $\Delta x$  и занесем данные в таблицу:

$I, \text{ мА}$	50	70	90	110	140
$\Delta x, \text{ мм}$	1	2	3	4	7
$I, \text{ мА}$	180	230	290	350	
$\Delta x, \text{ мм}$	11	16	28	41	

Построив график зависимости смещения столбика жидкости  $\Delta x$  от квадрата силы тока  $I^2$  (рис.3), определяющего энергию магнитного поля, видим, что смещение столбика жидкости практически прямо пропорционально энергии магнитного поля, что соответствует теоретическим утверждениям.

Проведя измерения с различными катушками, вы сможете убедиться, что смещение столбика  $\Delta x$  пропорционально индуктивности катушки  $L$  (при одинаковых  $I$ ). Остается только, используя катушку с известной индуктивностью, проградуировать прибор — и измеритель энергии магнитного поля у вас в руках.

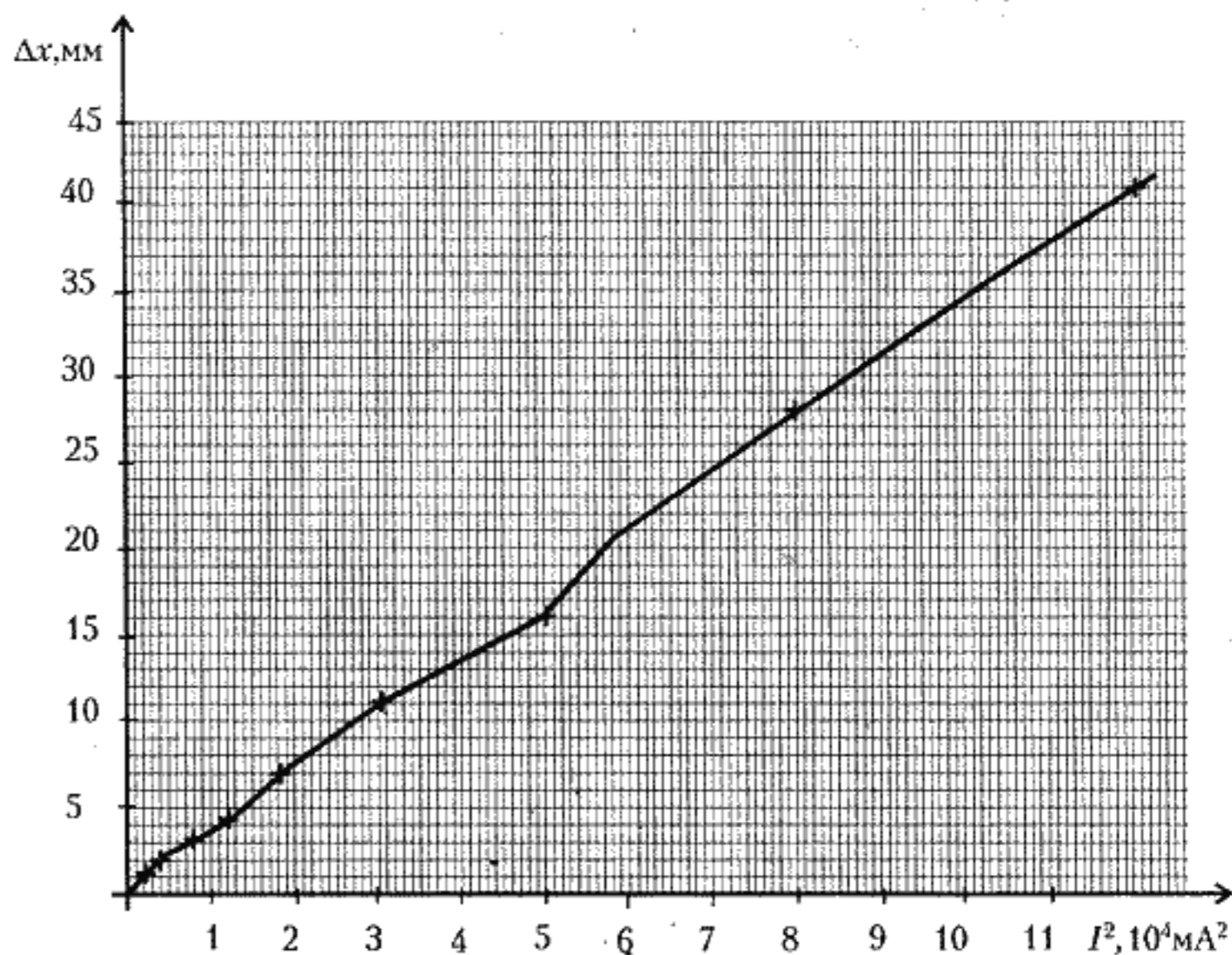


Рис. 3