



Рис. 14.6

Неподвижный П-образный проводник с подвижной перемычкой расположены в постоянном магнитном поле  $B$  (рис. 14.6). Перемычку начинают медленно перемещать и за некоторое время ток в цепи увеличивается от нуля до  $I$ . Если за это время внешняя сила, сила Ампера и вихревое электрическое поле совершили работы  $A_{\text{внеш}}$ ,  $A_{\text{амп}}$  и  $A_{\text{вихр}}$ , а в цепи выделилось количество теплоты  $Q$ , то:

А)	$A_{\text{внеш}} + A_{\text{вихр}} = Q$
Б)	$A_{\text{внеш}} + A_{\text{амп}} + A_{\text{вихр}} = Q$
В)	$A_{\text{внеш}} + A_{\text{амп}} = Q + (LI^2 / 2)$
Г)	$A_{\text{внеш}} = Q + (LI^2 / 2)$

**Решение.**

1) Выбираем нормаль к контуру. Пусть она направлена также, как вектор  $\vec{B}$ . С направлением нормали связано правилом винта направление обхода контура: «по часовой».

2) Запишем закон Ома для замкнутой цепи:

$$-\frac{d\Phi}{dt} = iR.$$

3) Магнитный поток изменяется вследствие изменения тока через катушку, а также из-за увеличения площади контура:

$$d\Phi = Ldi + Blvdt.$$

4) После подстановки  $d\Phi$  в закон Ома получим

$$-L \frac{di}{dt} - Blv = iR. \quad (1)$$

Заметим, что это уравнение можно проинтегрировать. В результате получим нарастание тока от нуля до установившейся отрицательной величины:  $i = -\frac{Blv}{R}(1 - e^{-t/\tau})$ , где  $\tau = L/R$ . Но нам для ответа на поставленный вопрос интегрировать не обязательно.

5) Уравнение (1) умножим на  $dq = idt$ . При этом заметим, что эдс индукции  $-L \frac{di}{dt}$  равна работе вихревого поля по переносу единичного заряда вдоль контура, следовательно

$$-L \frac{di}{dt} dq = -Lidi = dA_{\text{вихр}}. \quad (2)$$

Второе слагаемое  $-Blv * dq = -Blv * idi$  положительно, так как  $i < 0$ . Величина  $Bli$  есть сила Ампера. Следовательно

$$-Blv * dq = |F_{\text{амп}}| v dt = F_{\text{внеш}} dx = dA_{\text{внеш}}.$$

Мы учли, что при перемещении переключки с постоянной скоростью  $F_{\text{ВНЕШ}} = |F_{\text{АМП}}|$ .  
Наконец, правая часть полученного уравнения равна выделившемуся теплу:

$$iR * dq = i^2 R dt = dQ .$$

Итак, после умножения уравнения (1) на  $dq$  получаем:

$$dA_{\text{ВНХР}} + dA_{\text{ВНЕС}} = dQ .$$

Заметим также, что из уравнения (2) следует

$$A_{\text{ВНХР}} = -LI^2 / 2 .$$

Итак, правильные соотношения:

$$A_{\text{ВНЕС}} + A_{\text{ВНХР}} = Q$$

и

$$A_{\text{ВНЕС}} = Q + LI^2 / 2 .$$