Пролет цилиндра

И. И. Кравченко

16 ноября 2026 г.

Решаем задачу Капицы [1] о сверхпроводниках в простой модели.

2. Через соленоид, по которому течет ток, пролетает проводящий цилиндр. Определите условия, при которых магнитное поле не позволит цилиндру пролететь через соленоид. Омическими сопротивлениями цилиндра и соленоида можно пренебречь.

1 Введение

Подготовиться к решению можно по задачам из сборника Савченко [2] (раздел «Сохранение магнитного потока. Сверхпроводники в магнитном поле»). Задача уточнялась и решалась в статье [3], но в ней расчет был произведен для соленоида как *трубы*, по которой течет ток перпендикулярно ее образующим [4].

В этом решении будем считать следующее.

- Соленоид закреплен.
- Цилиндр влетает вдоль оси соленоида издалека.
- Соленоид представляет собой спираль из тонкого провода с радиусом витков много больше радиуса провода. Соленоид замкнут.
- Соленоид и цилиндр считаем длинными. Их соответствующие длины L, l много больше радиусов их сечений S, s. (При протекании токов по поверхностям соленоида и цилиндра перпендикулярно их осям создаваемые этими токами магнитные поля однородны и сосредоточены внутри этих тел.)
- Вначале ток (и, соответственно, магнитное поле) в цилиндре отсутствует. Магнитное поле в соленоиде вначале равно b и создается током в этом замкнутом соленоиде.

2 Основная часть

Пусть цилиндр вошел в соленоид на небольшую длину Δl.

Запишем закон сохранения энергии

$$k + \frac{b^2}{2\mu_0} SL = \frac{B^2}{2\mu_0} (SL - s\Delta l) + K, \tag{1}$$

где k, K — начальная и конечная кинетические энергии цилиндра, $\dfrac{b^2}{2\mu_0}, \dfrac{B^2}{2\mu_0}$ — плотности энергии магнитного поля, создаваемого соленоидом вначале и в конце, $SL, (SL - s\Delta l)$ — объемы, в которых присутствует магнитное поле вначале и в конце.

Запишем закон сохранения магнитного потока через соленоид

$$bSN = B\left(SN - sN\frac{\Delta l}{L}\right), \tag{2}$$

где N — число витков соленоида.

Подставив (2) $\to$ (1), получаем

$$k + \frac{b^2}{2\mu_0}SL = \frac{b^2}{2\mu_0}SL\frac{S}{\left(S - s\dfrac{\Delta l}{L}\right)} + K,$$

то есть $K < k$, цилиндр тормозится. Так будет при каждом следующем небольшом вхождении внутрь соленоида.

Отсюда минимальное $k_{\min}$ для вхождения *полного* внутрь соленоида при $K = 0$, то есть

$$k_{\min} = \frac{b^2}{2\mu_0}SL\left(\frac{S}{\left(S - s\dfrac{l}{L}\right)} - 1\right).$$

Расписывая кинетическую энергию в левой части и считая массу m цилиндра известной получаем условие для скоростей, при которых цилиндр не войдет в соленоид

$$v < \sqrt{\frac{b^2}{\mu_0 m}SL\left(\frac{S}{\left(S - s\dfrac{l}{L}\right)} - 1\right)}.$$

Литература

[1] П. Л. Капица. *Физические задачи*. Знание, 1966.

[2] И. И. Воробьев, П. И. Зубков, Г. А. Кутузова, О. Я. Савченко, А. М. Трубачев и В. Г. Харитонов. *Задачи по физике*. Новосибирск: Новосибирский государственный университет, 2008.

[3] И. И. Кравченко. «Задача Капицы о пролете цилиндра через соленоид». В: *Квант* 11–12 (2024), с. 36—39.

[4] Д. В. Сивухин. *Общий курс физики. Электричество*. Наука, 1979.