

## АНАЛИЗ МАГНИТНОГО ТОРМОЖЕНИЯ МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Анеур А.П., Семёнов Т.В., Свириденко Р.А., студенты

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
г. Минск, Республика Беларусь

Шабусов А.К. – учитель физики ГУО «Средняя школа №1 г. п. Смилевичи»

Храмович Е.М. – канд. физ.-мат. наук, доцент

**Аннотация.** В работе исследуется зависимость силы магнитного торможения неодимового магнита, движущегося по алюминиевой наклонной плоскости, от угла наклона горки и количества магнитов. Проведены теоретический анализ и экспериментальная проверка. Установлено существование оптимального числа магнитов, при котором тормозящая сила максимальна, что объясняется изменением конфигурации магнитного поля и имеет практическое значение для проектирования магнитных тормозов.

Движение постоянного магнита по проводящей поверхности широко известно благодаря явлению электромагнитной индукции: возникающие вихревые токи тормозят магнит. Однако вопросы о направлении тормозящей силы и её зависимости от параметров системы остаются актуальными. В данной работе исследуется движение неодимового магнита по алюминиевой наклонной плоскости.

Цель работы: исследовать зависимость модуля силы торможения при движении неодимовых магнитов по алюминиевой горке от угла наклона плоскости и количества магнитов в «башенке».

При равномерном движении магнита по наклонной плоскости из второго закона Ньютона, закона Кулона–Амонтона получена зависимость скорости от угла наклона  $\alpha$ :

$$v = \frac{mg}{k} \cdot (\sin(\alpha) - \mu \cos(\alpha)), \quad (1)$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности (зависит от свойств магнита и горки),  $\mu$  – коэффициент трения скольжения. Из этого выражения следует, что зависимость  $v(\sin \alpha - \mu \cos \alpha)$  должна быть линейной, а сила торможения направлена горизонтально.

Исследование зависимости скорости от угла. Использовались: неодимовый магнит  $d = 14$  мм,  $h = 2$  мм,  $m = 2,3$  г; алюминиевая горка толщиной 2,0 мм. Методом наименьших квадратов получен коэффициент трения  $\mu = 0,19$  и коэффициент  $k = 0,12$  кг/с. Линейный характер зависимости  $v(\alpha)$  подтверждён экспериментально, что доказывает горизонтальное направление результирующей силы магнитного торможения.

Исследование зависимости  $v(N)$  [1]. Для изучения влияния высоты магнита применён оригинальный метод «магнитной башенки» – стопки из  $N$  одинаковых магнитов. Полученная зависимость нелинейна: минимум скорости наблюдается при  $N = 2$ , что опровергает обе выдвинутые гипотезы. С ростом  $N$  масса башенки увеличивается пропорционально  $N$ , поэтому причина минимума кроется в поведении магнитного потока.

С помощью датчика Холла просканированы башенки из 1, 2 и 3 магнитов. При переходе от одного магнита к двум конфигурация поля существенно изменяется. Магнитный поток, проходящий через поверхность горки, для башенок из 1, 2 и 3 магнитов составил 110, 240 и 330 мкВб соответственно. Поток двух магнитов более чем вдвое превышает поток одного, тогда как масса возрастает лишь в 2 раза – это и объясняет уменьшение скорости. При дальнейшем увеличении  $N$  магнитный поток растёт медленнее массы, поэтому скорость башенки возрастает [2, 3].

Зависимость скорости магнита от угла наклона горки близка к линейной; уточнённая зависимость (1) носит строго линейный характер и подтверждает горизонтальное направление силы торможения. Зависимость  $v(N)$  имеет минимум при  $N = 2$ , объясняемый непропорционально большим ростом магнитного потока при добавлении второго магнита. Существует оптимальное число (высота) магнитов, при котором тормозящая сила максимальна, что важно для проектирования магнитных тормозов.

### Список использованных источников:

1. Поцелуев, Р. С. Магнитные горки / Р. С. Поцелуев, И. С. Артименя ; науч. рук. А. К. Шабусов // *Материалы XXVII республиканского конкурса работ исследовательского характера (конференция) учащихся по астрономии, биологии, информатике, математике, физике, химии. Секция «Физика».* – Смилевичи, 2023.
2. Исаченкова, Л.А. Физика : учебник для 8 кл. / Л.А. Исаченкова, Ю.Д. Лещинский. – Минск : Нар. асвета, 2018. – 176 с.
3. Слободянюк, А.И. Физика для избранных: Магнитостатика. Электродинамика / А.И. Слободянюк. – Минск : Белорус. ассоц. «Конкурс», 2011.