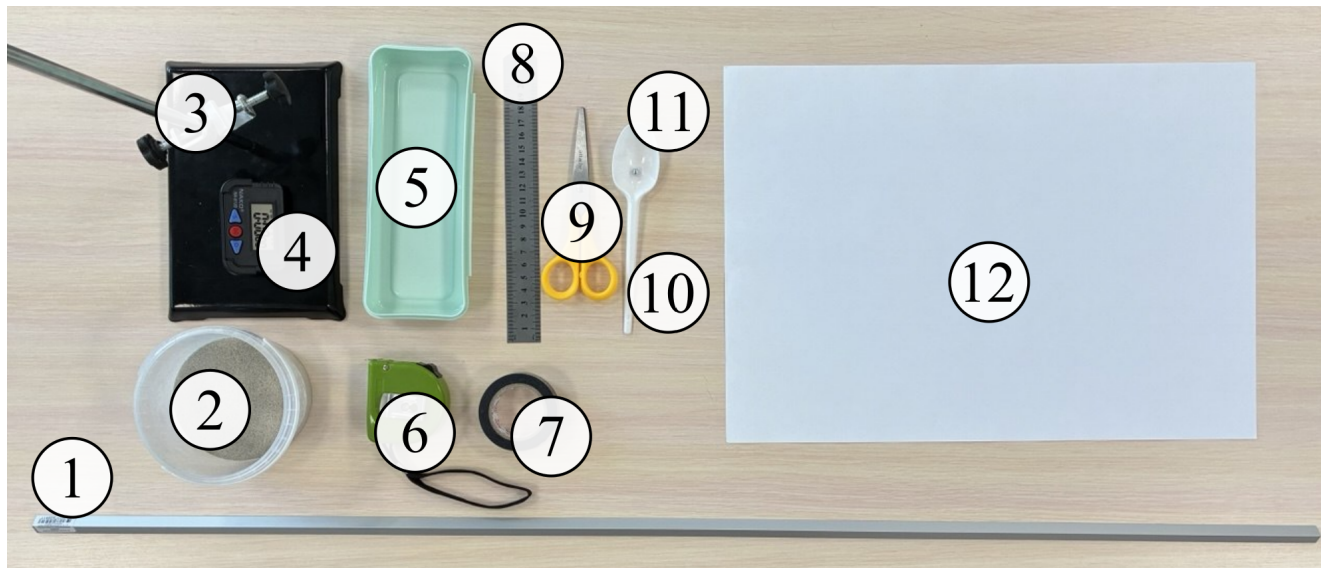


# Road to IPhO

## Торможение в песке

Этот эксперимент представляет из себя сокращенную версию эксперимента, предлагаемого на IPhO 2025 в Париже. Он посвящен изучению тормозного пути шарика в песке.

### Оборудование



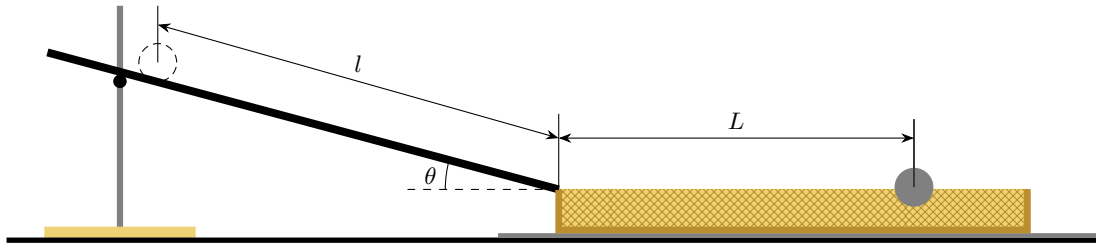
1. Алюминиевый желоб длиной 1 м
2. Ведро с песком
3. Штатив с лапкой и муфтой
4. Секундомер
5. Футляр
6. Рулетка
7. Изолента
8. Линейка металлическая 20 см (для выравнивания песка и проведения измерений)
9. Ножницы
10. Ложка пластиковая
11. Стальной шарик массой  $m = (0.89 \pm 0.01)$  г
12. Лист А3 (подкладка под футляр)

**Внимательно прочитайте следующие примечания! Их невыполнение может привести к невозможности выполнения эксперимента или ДИСКВАЛИФИКАЦИИ!**

- Желоб легко гнётся, что непоправимо влияет на ход измерений. Попытка намеренно испортить жёлоб приведёт к дисквалификации!
- Запрещено наносить на желоб какие-либо неудаляемые пометки! Для нанесения пометок используйте только отрезки изоленты.
- Ограничивайте область движения шарика, чтобы он не упал на пол и не укатился с рабочего места. Если шарик всё же укатится, НЕ ВСТАВАЙТЕ с рабочего места, а позовите дежурного по аудитории. Если шарик укатится в труднодоступное место, новый выдаваться НЕ БУДЕТ!
- Работайте с песком только на листе А3!

# Road to IPhO

Соберите установку, как показано на рисунке ниже. Один из концов желоба должен быть закреплён в лапке штатива, а другой — находиться в футляре. Выставьте жёлоб так, чтобы его профиль был симметричен относительно вертикальной плоскости. Футляр должен стоять на подкладке. Угол  $\theta$  должен быть равен  $5^\circ$  с погрешностью не более 10%. Засыпьте футляр песком и подготовьте равномерный слой, тщательно выравнивая поверхность линейкой.



Установка для проведения измерений

## ВАЖНО!

- Угол  $\theta$  должен оставаться постоянным на протяжении всего эксперимента!
- Избегайте уплотнения песка! Перед каждым запуском перемешивайте песок, досыпайте его (при необходимости) и снова выравнивайте поверхность. Сдувайте песок с шарика и жёлоба, чтобы он не влиял на скатывание.

## Часть А. Ускорение свободного падения (2.5 балла)

Считайте, что движение шарика по желобу происходит без проскальзывания. Потерями энергии пренебрегайте.

Если вы не планируете совмещать выполнение этой части с частью В, можете не заполнять футляр песком.

**A0** Запишите в листах ответов ваше значение угла  $\theta$ . Запишите все прямые измерения, в том числе использованные для определения вашего значения угла  $\theta$ . **0.2**

**A1** Снимите зависимость времени скатывания шарика  $t$  от расстояния  $\ell$ , которое он проходит при этом по профилю (не менее 3 повторений при не менее чем 5 значениях  $\ell$ ). Линеаризуйте полученную зависимость так, чтобы минимизировать возможную систематическую ошибку в измерении времени. **1.3**

**A2** Постройте график полученной линеаризованной зависимости. Определите ускорение свободного падения  $g$ . Оцените погрешность. **1.0**  
*Примечание.* Кинетическая энергия шарика, катящегося по прямоугольному V-образному жёлобу со скоростью  $v$ , равна

$$K = \frac{9}{10}mv^2,$$

где  $m$  — масса шарика.

# Road to IPhO

## Часть В. Увязание в песке (5 баллов)

При попадании в песок шарик начинает замедляться под воздействием силы трения  $F_{\text{тр}}$ . Для её описания существуют две возможные теоретические модели:

1. **Модель №1. Сухое трение:** как и между двумя твердыми телами, находящимися в относительном движении, песок оказывает на шарик постоянную силу сопротивления  $F_{\text{тр}} = -\mu_{\text{eff}}mg$ , где  $\mu_{\text{eff}}$  — эффективный коэффициент трения при контакте шарика с песком, а  $m$  — масса шарика.
2. **Модель №2. Вязкое трение:** сила сопротивления линейно зависит от скорости шарика,  $F_{\text{тр}} = -kv$ , где  $k$  — некоторый коэффициент, а  $v$  — поступательная скорость.

В этой части необходимо установить, какая модель лучше описывает торможение шарика.

При движении в песке считайте шарик точечной массой. Т.к. угол наклона профиля крайне мал, потерями энергии при ударе о песок можете пренебречь.

**В1** Снимите зависимость тормозного пути шарика  $L$  от расстояния  $\ell$ , которое он проходит при этом по профилю (не менее 5 значений  $\ell$  и не менее 3 повторений при каждом значении  $\ell$ ). **3.0**

**В2** Линеаризуйте зависимости для обеих моделей и постройте линеаризованные графики. Анализируя графики, выберите модель, которая лучше описывает полученную зависимость. **1.5**

**В3** Исходя из выбранной модели, вычислите значение коэффициента  $\mu_{\text{eff}}$  или  $k$ . Оцените погрешность. **0.5**

По окончании эксперимента аккуратно ссыпьте песок из футляра и подноса обратно в ведро.