

# -1. Магнитное взаимодействие Оборудование

## Условие

### Задание 10-1. Магнитное взаимодействие

**Оборудование:** пластинка магнитная (монетница 7,0x12,5см, можно больших размеров, но не меньших), шайба под гайку (20шт., диаметр – 2,0см с как можно меньшим внутренним отверстием), динамометры (2,5Н и 5,0Н), весы электронные (одни на кабинет), листочки из тетрадной бумаги (12 шт, размеры 6,0x8,0см), полоска из тетрадной бумаги с прикрепленной петелькой из скотча посередине меньшей стороны (размеры полоски 7,0x15,0см), штатив с лапкой, дощечка (40 – 60см), мерная лента, линейка (30 – 40см), скотч узкий, ножницы.

### Часть 1. Коэффициент трения

**1.1** Определите однократным измерением коэффициент трения  $\mu$  бумаги о магнитную пластинку. Опишите эксперимент (3 – 4 предложения).

**1.2** Результат запишите в виде  $\mu = \langle \mu \rangle \pm \Delta\mu$ .

### Часть 2. Магнитная сила

**2.1** Прикрепите магнитную пластинку к поверхности стола. Положите бумажную полоску с петелькой на магнитную пластинку. На полоску положите в один слой несколько шайб. Прилагая горизонтальную силу к полоске с помощью динамометра, смещайте её и наблюдайте за показаниями динамометра. Получите уравнение зависимости силы упругости, показываемой динамометром, от количества шайб на полоске  $F_{\text{упр2}}(n)$  при равномерном перемещении.

**2.2** Исследуйте зависимость  $F_{\text{упр2}}(n)$  экспериментально (значение силы определяйте именно при равномерном перемещении, а не при срыве полоски с места). Результаты представьте таблично и графиком линеаризованной зависимости.

**2.3** По результатам эксперимента определите магнитную силу  $F_{\text{м1}}$ , действующую на одну шайбу со стороны магнитной пластинки. Укажите, какие дополнительные измерения Вы провели. Результат представьте в виде  $F_{\text{м1}} = \langle F_{\text{м1}} \rangle \pm \Delta F_{\text{м1}}$ .

### Часть 3. Простая эмпирическая зависимость

**3.1** В данной части шайбы укладываем в столбик. Исследуйте зависимость силы упругости, показываемой динамометром от количества шайб в столбике при равномерном перемещении листка  $F_{\text{упр3}}(n)$ . *Подсказка:* шайбы укладывайте в три или четыре столбика, в таблице указывайте количество шайб в одном столбике.\*

**3.2** По результатам эксперимента определите математический вид зависимости силы магнитного взаимодействия между шайбами и пластинкой от количества шайб в столбике  $F_{\text{м}}(n)$ . Дайте объяснение полученным результатам.

## Часть 4. Сложная эмпирическая зависимость

**4.1** Исследуйте зависимость силы упругости, показываемой динамометром от количества слоёв бумаги между магнитной пластинкой и шайбами при равномерном перемещении листка  $F_{\text{упр4}}(n_{\text{сл}})$ . В данном эксперименте одинаковое количество шайб укладывают в один слой.

**4.2** По результатам эксперимента определите математический вид зависимости  $F_{\text{упр4}}(n_{\text{сл}})$ . Зависимость получите с числовыми коэффициентами.

В части 3 и 4 погрешности вычислять не нужно! ( $g = 9,81 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ )

### Решение

#### Задание 10-1. Магнитное взаимодействие *Решение* Часть 1

**1.1** Коэффициент трения определим по тангенсу угла наклона плоскости, при котором листок бумаги будет начинать соскальзывать с пластинки с исчезающе малой скоростью. Пластинку закрепим скотчем на дощечке и с помощью штатива устанавливаем дощечку под необходимым углом. Вертикальный и горизонтальный катеты измеряем с помощью линейки и мерной ленты.  $h = (14,8 \pm 0,1)$  см,  $l = (42,8 \pm 0,1)$  см.

$$\langle \mu \rangle = \frac{\langle h \rangle}{\langle l \rangle} = \frac{14,8 \text{ см}}{42,8 \text{ см}} = 0,346. \quad (1)$$

#### 1.2

$$\varepsilon_{\mu} = \sqrt{\left(\frac{\Delta h}{\langle h \rangle}\right)^2 + \left(\frac{\Delta l}{\langle l \rangle}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{0,1 \text{ см}}{14,8 \text{ см}}\right)^2 + \left(\frac{0,1 \text{ см}}{42,8 \text{ см}}\right)^2} = 0,007 = 0,7\%, \quad (2)$$

Допускается упрощённое уравнение

$$\varepsilon_{\mu} = \frac{\Delta h}{\langle h \rangle} + \frac{\Delta l}{\langle l \rangle} \quad (2')$$

.

$$\Delta \mu = \langle \mu \rangle \cdot \varepsilon_{\mu} = 0,346 \cdot 0,007 = 0,0024 = 0,003. \quad (3)$$

Абсолютную погрешность округляем с избытком.

$$\mu = (0,346 \pm 0,003).$$

## Часть 2

### 2.1

$$F_{\text{упр2}} = F_{\text{тр}}, \quad (4)$$

$$F_{\text{тр}} = \mu N, \quad (5)$$

$$N = n(m_1 g + F_{\text{м1}}), \quad (6)$$

где  $m_1$  — масса одной шайбы. Массой бумажной полоски пренебрегаем, так как сила тяжести, действующая на полоску много меньше магнитной силы  $F_{\text{м1}}$ , действующей на шайбу со стороны магнитной пластинки. Подставляя (6) и (5) в (4), получим:

$$F_{\text{упр2}} = \mu(m_1 g + F_{\text{м1}})n. \quad (7)$$

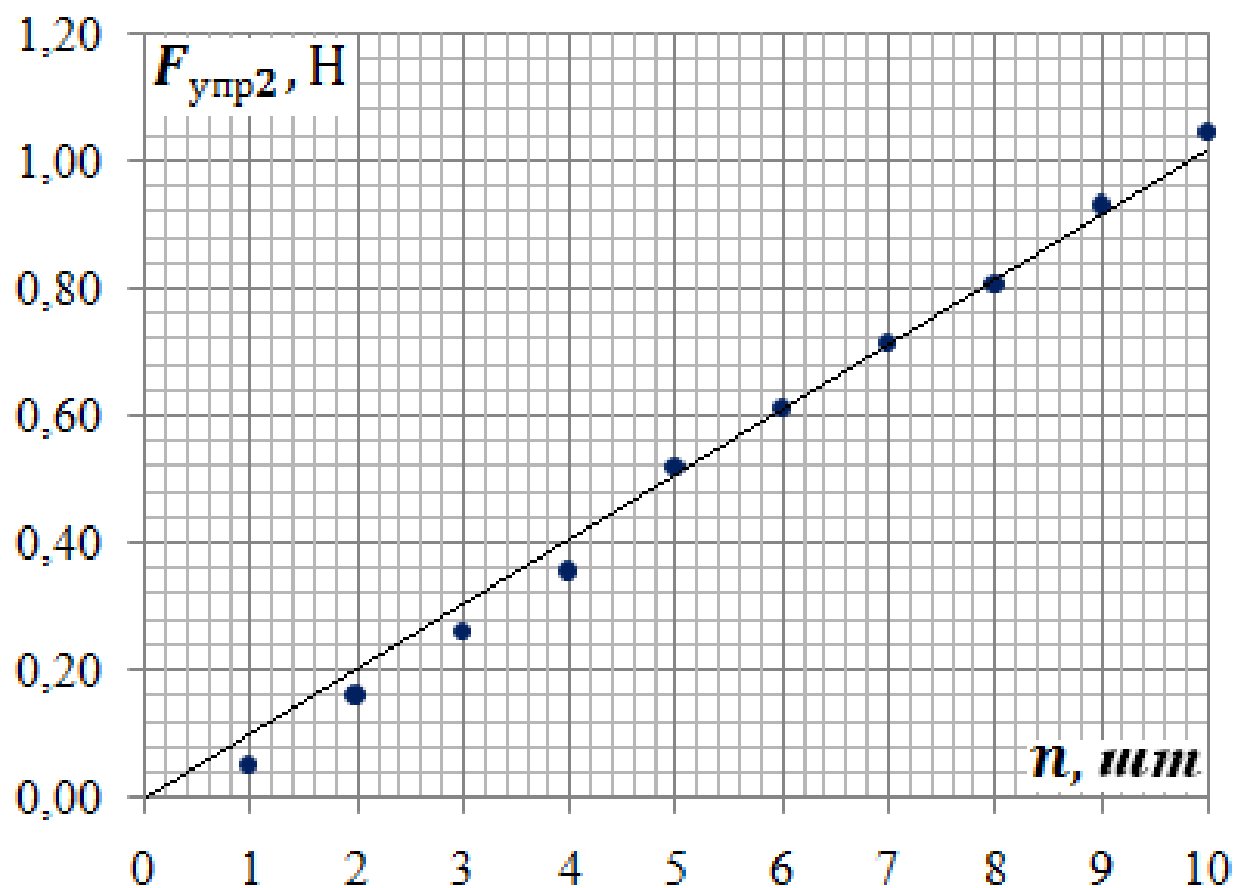
2023-2024 учебный год

**2.2** Результаты эксперимента представьте в таблице 1 и на графике 1. Уравнение (7) представляет собой линеаризованную зависимость  $F_{\text{упр2}}(n)$ , поэтому построен график по уравнению (7).

**Таблица 1**

| Повторные измерения $F_{\text{упр2}i}$ , Н |          |          |          |          | $\langle F_{\text{упр2}i} \rangle$ , Н | Колич. шайб $n$ , шт |
|--------------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------------------------------------|----------------------|
| <b>1</b>                                   | <b>2</b> | <b>3</b> | <b>4</b> | <b>5</b> |                                        |                      |
| 0,05                                       | 0,05     | 0,05     | 0,05     | 0,05     | 0,05                                   | 1                    |
| 0,15                                       | 0,17     | 0,15     | 0,15     | 0,17     | 0,16                                   | 2                    |
| 0,27                                       | 0,25     | 0,25     | 0,25     | 0,27     | 0,26                                   | 3                    |
| 0,35                                       | 0,35     | 0,37     | 0,35     | 0,35     | 0,35                                   | 4                    |
| 0,50                                       | 0,52     | 0,52     | 0,50     | 0,55     | 0,52                                   | 5                    |
| 0,60                                       | 0,62     | 0,62     | 0,60     | 0,60     | 0,61                                   | 6                    |
| 0,72                                       | 0,70     | 0,72     | 0,72     | 0,70     | 0,71                                   | 7                    |
| 0,80                                       | 0,80     | 0,80     | 0,82     | 0,80     | 0,80                                   | 8                    |
| 0,90                                       | 0,95     | 0,95     | 0,92     | 0,92     | 0,93                                   | 9                    |
| 1,05                                       | 1,05     | 1,02     | 1,05     | 1,05     | 1,04                                   | 10                   |

\*\*График 1. Зависимость  $F_{\text{упр2}}(n)$ \*\*



2.3 Введём обозначение:

$$a = \mu(m_1 g + F_{\text{м1}}). \quad (8)$$

Используя простую графическую обработку (ПГО), находим:

$$\langle a \rangle = 0,102 \text{ Н}, \quad \Delta a = 0,006 \text{ Н}.$$

Определим массу одной шайбы. Взвешиваем 20 шайб на весах, получаем:

2023-2024 учебный год

$$m_{20} = (58,6 \pm 0,1) \text{ г}.$$

Тогда масса одной шайбы:

$$m = \frac{m_{20}}{20}. \quad (9)$$

Получим:

$$m_1 = (2,93 \pm 0,01)\text{г}.$$

Из (8) получим:

$$F_{\text{м1}} = \frac{a}{\mu} - m_1 g. \quad (10)$$

$$\langle F_{\text{м1}} \rangle = \frac{0,102\text{Н}}{0,346} - 2,93 \cdot 10^{-3}\text{кг} \cdot 9,814 \frac{\text{М}}{\text{с}^2} = 0,295\text{Н} - 0,029\text{Н} = 0,266\text{Н}.$$

Анализируя вычисления, видим, что магнитная сила  $F_{\text{м1}}$ , действующую на шайбу со стороны магнитной пластинки в девять раз больше чем сила тяжести, действующая на шайбу.

Вычислим абсолютную погрешность  $\Delta F_{\text{м1}}$ .

$$\Delta F_{\text{м1}} = \Delta \left( \frac{a}{\mu} \right) + \Delta(m_1 g). \quad (11)$$

$$\varepsilon_{\frac{a}{\mu}} = \sqrt{\left( \frac{\Delta a}{\langle a \rangle} \right)^2 + \left( \frac{\Delta \mu}{\langle \mu \rangle} \right)^2} = \sqrt{\left( \frac{0,006\text{Н}}{0,102\text{Н}} \right)^2 + \left( \frac{0,003}{0,346} \right)^2} = 0,060 = 6,0\%, \quad (12)$$

$$\Delta \left( \frac{a}{\mu} \right) = \frac{\langle a \rangle}{\langle \mu \rangle} \cdot \varepsilon_{\frac{a}{\mu}} = \frac{0,102\text{Н}}{0,346} \cdot 0,060 = 0,0177\text{Н}. \quad (13)$$

$$\varepsilon_{m_1 g} = \sqrt{\left( \frac{\Delta m_1}{\langle m_1 \rangle} \right)^2 + \left( \frac{\Delta g}{\langle g \rangle} \right)^2} = \sqrt{\left( \frac{0,01\text{г}}{2,93\text{г}} \right)^2 + \left( \frac{0,01 \frac{\text{М}}{\text{с}^2}}{9,81 \frac{\text{М}}{\text{с}^2}} \right)^2} = 0,0035 = 0,35\%. \quad (14)$$

$$\Delta(m_1 g) = \langle m_1 \rangle \cdot \langle g \rangle \cdot \varepsilon_{m_1 g} = 2,93 \cdot 10^{-3}\text{кг} \cdot 9,81 \frac{\text{М}}{\text{с}^2} \cdot 0,0035 = 0,0001\text{Н}. \quad (15)$$

$$\Delta F_{\text{м1}} = 0,0177\text{Н} + 0,0001\text{Н} = 0,018\text{Н}.$$

$$F_{\text{м1}} = (0,266 \pm 0,018)\text{Н}$$

2023-2024 учебный год

### Часть 3

**3.1** Авторы задачи укладывали шайбы в три столбика. Результаты эксперимента представлены в таблице 2.

Таблица 2

| Повторные измерения $F_{\text{упр}3i}$ , Н |      |      | $\langle F_{\text{упр}3i} \rangle$ , Н | Колич. шайб в каждом столбике $n$ , шт |
|--------------------------------------------|------|------|----------------------------------------|----------------------------------------|
| 1                                          | 2    | 3    |                                        |                                        |
| 0,25                                       | 0,25 | 0,25 | 0,25                                   | 1                                      |
| 0,25                                       | 0,27 | 0,27 | 0,26                                   | 2                                      |
| 0,27                                       | 0,27 | 0,25 | 0,26                                   | 3                                      |
| 0,27                                       | 0,27 | 0,27 | 0,27                                   | 4                                      |
| 0,27                                       | 0,27 | 0,30 | 0,28                                   | 5                                      |
| 0,30                                       | 0,27 | 0,27 | 0,28                                   | 6                                      |

**3.2** Анализируя результаты представленные в таблице 2, видим, что  $F_{\text{упр}3}$  почти не изменяется с увеличением количества шайб в каждом столбике. Шестикратное увеличение количества шайб привело к увеличению  $F_{\text{упр}3}$  всего лишь в 1,1 раза. Данное изменение вызвано увеличением веса шайб. Поэтому можно считать, что сила магнитного взаимодействия между шайбами и пластинкой не зависит от количества шайб в столбике. Уравнение можно записать в виде:

$$F_{\text{м}}(n) = \text{const} \quad (16)$$

Данный факт можно объяснить тем, что область магнитного поля над пластинкой представляет собой очень тонкий слой, высотой около 1 мм. Магнитное взаимодействие проявляется только между пластинками и шайбами первого слоя. Между пластинкой и шайбами второго слоя магнитное взаимодействие уже не проявляется.

2023-2024 учебный год

#### Часть 4.

**4.1** Авторы задачи укладывали шесть шайб. Результаты эксперимента представлены в таблице 3.

Таблица 3

| Повторные измерения $F_{\text{упр}4i}$ , Н |          |          |          |          | $\langle F_{\text{упр}4i} \rangle$ , Н | Колич. слоёв бумаги $n$ , шт |
|--------------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------------------------------------|------------------------------|
| <b>1</b>                                   | <b>2</b> | <b>3</b> | <b>4</b> | <b>5</b> |                                        |                              |
| 0,60                                       | 0,60     | 0,60     | 0,60     | 0,60     | 0,60                                   | 1                            |
| 0,47                                       | 0,47     | 0,50     | 0,50     | 0,47     | 0,48                                   | 2                            |
| 0,35                                       | 0,35     | 0,37     | 0,35     | 0,35     | 0,35                                   | 3                            |
| 0,27                                       | 0,27     | 0,27     | 0,27     | 0,27     | 0,27                                   | 4                            |
| 0,20                                       | 0,20     | 0,20     | 0,20     | 0,20     | 0,20                                   | 5                            |
| 0,15                                       | 0,15     | 0,12     | 0,12     | 0,15     | 0,14                                   | 6                            |
| 0,10                                       | 0,10     | 0,10     | 0,10     | 0,10     | 0,10                                   | 7                            |
| 0,07                                       | 0,07     | 0,07     | 0,07     | 0,07     | 0,07                                   | 8                            |
| 0,05                                       | 0,05     | 0,05     | 0,05     | 0,05     | 0,05                                   | 9                            |
| 0,03                                       | 0,03     | 0,03     | 0,03     | 0,03     | 0,03                                   | 10                           |

4.2 Построим график зависимости  $F_{\text{упр4}}(n_{\text{сл}})$  (график 2). Полученный график похож на график обратной пропорциональности. Вычислим значения  $\frac{1}{n_{\text{сл}}}$  (таблица 4) и построим график  $F_{\text{упр4}}\left(\frac{1}{n_{\text{сл}}}\right)$  (график 3). Видим, что график 3 похож на график зависимости  $F_{\text{упр4}}\left(\sqrt{\frac{1}{n_{\text{сл}}}}\right)$  или  $F_{\text{упр4}}\left(\frac{1}{\sqrt{n_{\text{сл}}}}\right)$ . Вычислим значения  $\frac{1}{\sqrt{n_{\text{сл}}}}$  (таблица 5) и построим график  $F_{\text{упр4}}\left(\frac{1}{\sqrt{n_{\text{сл}}}}\right)$  (график 4).

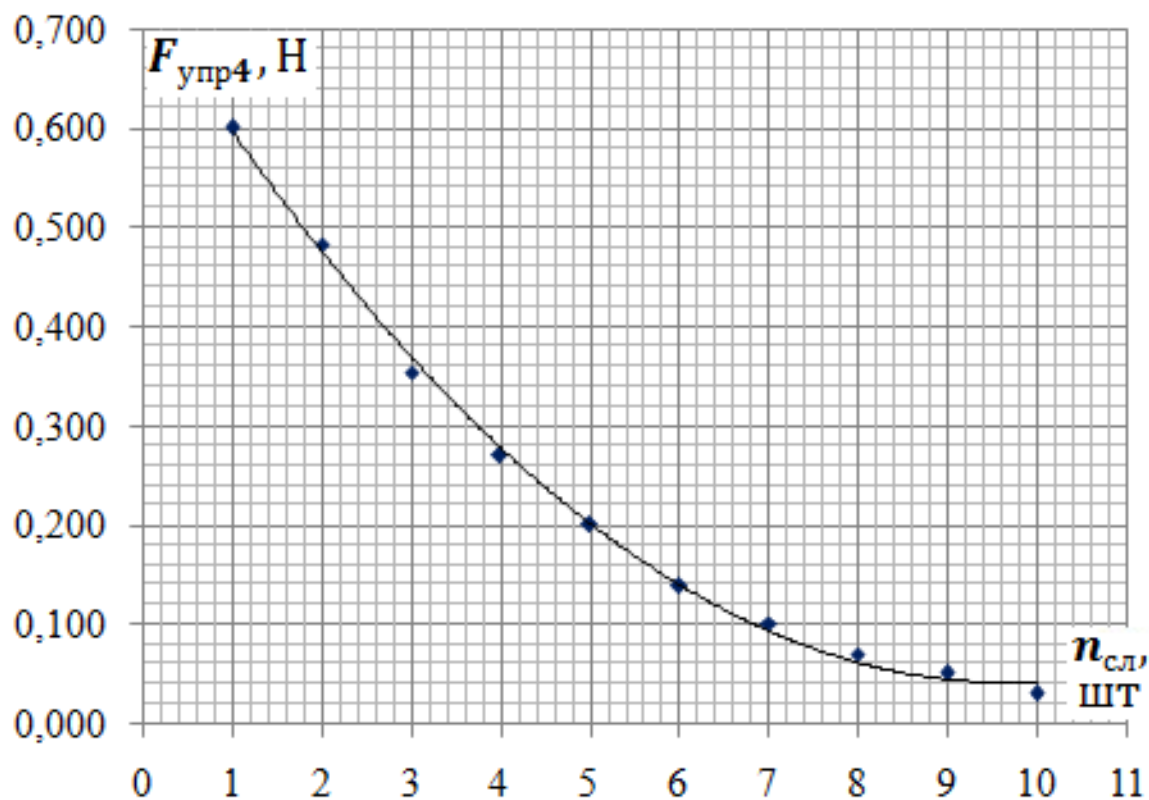
2023-2024 учебный год

\*\*График 2. Зависимость  $F_{\text{упр4}}(n_{\text{сл}})$  Таблица 4.\*\*

| Колич. слоёв бумаги $n$ , шт | $\frac{1}{n}$ | $\langle F_{\text{упр4}i} \rangle$ , Н |
|------------------------------|---------------|----------------------------------------|
| 1                            | 1,00          | 0,60                                   |
| 2                            | 0,50          | 0,48                                   |
| 3                            | 0,33          | 0,35                                   |
| 4                            | 0,25          | 0,27                                   |
| 5                            | 0,20          | 0,20                                   |
| 6                            | 0,17          | 0,14                                   |
| 7                            | 0,14          | 0,10                                   |
| 8                            | 0,13          | 0,07                                   |
| 9                            | 0,11          | 0,05                                   |
| 10                           | 0,10          | 0,03                                   |

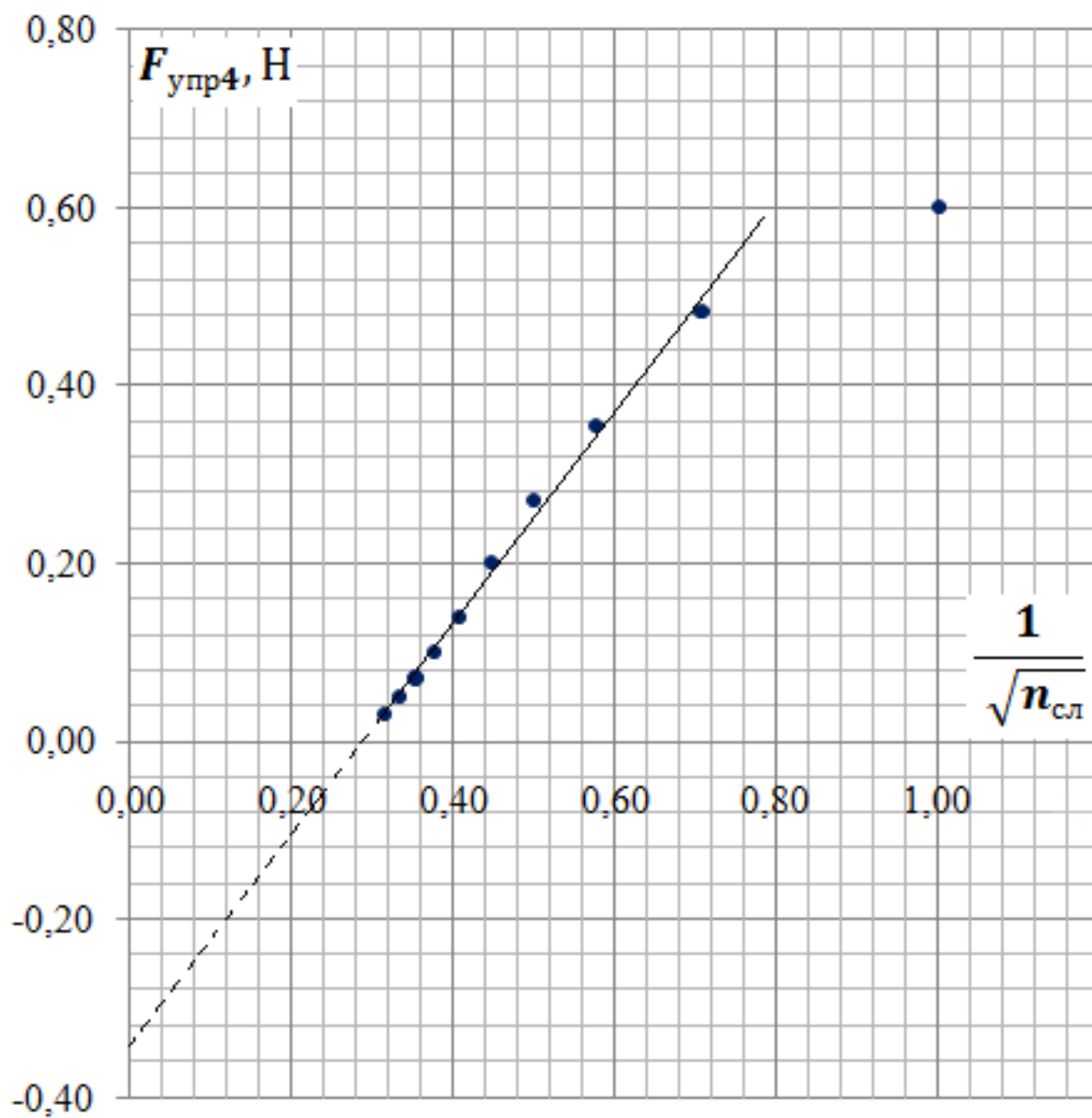
\*\*График 3. Зависимость  $F_{\text{упр4}}\left(\frac{1}{n_{\text{сл}}}\right)$ \*\*

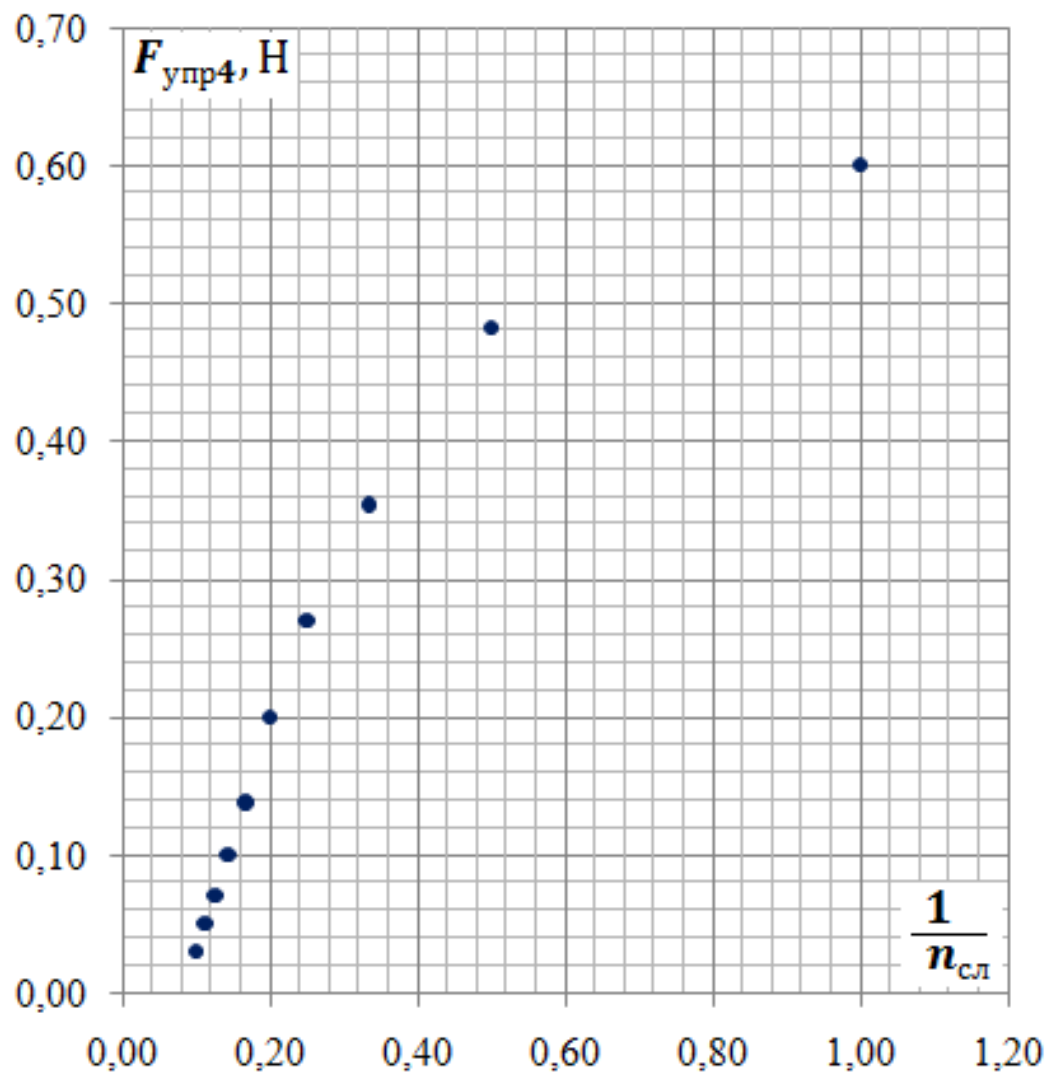
2023-2024 учебный год



\*\*График 4. Зависимость  $F_{\text{упр4}} \left( \frac{1}{\sqrt{n_{\text{сл}}}} \right)$  \*\*

Таблица 5.





| Колич. слоёв бумаги $n$ , шт | $\frac{1}{\sqrt{n}}$ | $\langle F_{\text{упр4}i} \rangle$ , Н |
|------------------------------|----------------------|----------------------------------------|
| 1                            | 1,00                 | 0,60                                   |
| 2                            | 0,71                 | 0,48                                   |
| 3                            | 0,58                 | 0,35                                   |
| 4                            | 0,50                 | 0,27                                   |
| 5                            | 0,45                 | 0,20                                   |
| 6                            | 0,41                 | 0,14                                   |
| 7                            | 0,38                 | 0,10                                   |
| 8                            | 0,35                 | 0,07                                   |
| 9                            | 0,33                 | 0,05                                   |
| 10                           | 0,32                 | 0,03                                   |

Из графика 4 видим что на интервале от 2-х до 10-ти слоёв бумаги зависимость  $F_{\text{упр4}} \left( \frac{1}{\sqrt{n_{\text{сл}}}} \right)$  близка к линейной. Используя ПГО, найдём угловой коэффициент наклона усредняющей прямой  $a$  и свободное слагаемое  $b$ .

$$a = 1,2\text{Н}; \quad b = -0,34\text{Н}.$$

Уравнение  $F_{\text{упр4}}(n_{\text{сл}})$  можно записать в виде:

$$F_{\text{упр4}} = \frac{1,2}{\sqrt{n_{\text{сл}}}} - 0,34 \text{ (Н)}. \quad (17)$$

2023-2024 учебный год