



Республиканская физическая олимпиада 2024 года (3 этап)

Экспериментальный тур

Решения задач 10 класс (для жюри)

Задания экспериментального тура данной олимпиады предоставляют для участников большие возможности для самостоятельного выбора параметров установок, диапазонов исследования, методов измерений. Иными словами – проявить свои творческие способности. Кроме того, результаты измерений сильно зависят от предоставленного оборудования, которое может различаться в разных областях нашей Республики.

Поэтому, относитесь к приведенным ниже результатам, как к ориентировочным. Желательно (или даже обязательно) провести собственные измерения. Поэтому здесь приводятся только основные теоретические положения и результаты некоторых измерений, полученные авторами данных заданий. Методы обработки результатов измерений являются в большинстве своем, стандартными, поэтому подробно не описываются.



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.

$$h = (14,8 \pm 0,1)\text{см}, \quad l = (42,8 \pm 0,1)\text{см}.$$

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

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 $\varepsilon_{\mu} = \frac{\Delta h}{\langle h \rangle} + \frac{\Delta l}{\langle l \rangle}$ (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

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

$$F_{\text{тр}} = \mu N \quad (5),$$

$$N = n(m_1 g + F_{\text{M1}}) \quad (6),$$

где m_1 – масса одной шайбы. Массой бумажной полоски пренебрегаем, так как сила тяжести, действующая на полоску много меньше магнитной силы F_{M1} , действующей на шайбу со стороны магнитной пластинки. Подставляя (6) и (5) в (4), получим:

$$F_{\text{упр2}} = \mu(m_1 g + F_{\text{M1}})n \quad (7).$$

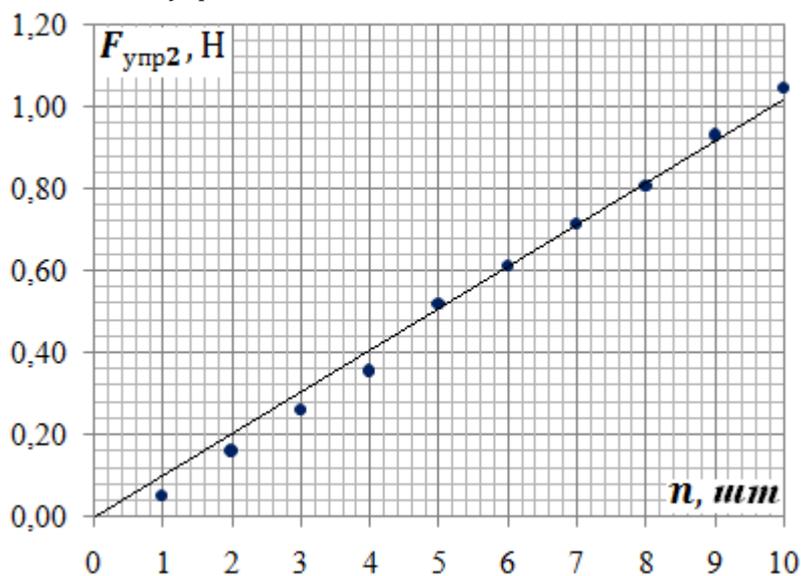
2.2

Результаты эксперимента представьте в таблице 1 и на графике 1. Уравнение (7) представляет собой линеаризованную зависимость $F_{\text{упр}2}(n)$, поэтому построен график по уравнению (7).

Таблица 1

Повторные измерения $F_{\text{упр}2i}$, Н					$\langle F_{\text{упр}2i} \rangle$, Н	Колич. шайб n , шт
1	2	3	4	5		
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 $F_{\text{упр}2}(n)$



2.3 Введём обозначение:

$$a = \mu(m_1 g + F_{\text{м}1}) \quad (8).$$

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:

Экспериментальный тур.

10 класс. Решения задач. Бланк для жюри.

$$m_{20} = (58,6 \pm 0,1)\text{г.}$$

Тогда масса одной шайбы:

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

Получим:

$$m_1 = (2,93 \pm 0,01)\text{г.}$$

Из (8) получим:

$$F_{M1} = \frac{a}{\mu} - m_1 g \quad (10).$$

$$\langle F_{M1} \rangle = \frac{0,102\text{Н}}{0,346} - 2,93 \cdot 10^{-3}\text{кг} \cdot 9,814 \frac{\text{М}}{\text{с}^2} = 0,295\text{Н} - 0,029\text{Н} = 0,266\text{Н}.$$

Анализируя вычисления, видим, что магнитная сила F_{M1} , действующую на шайбу со стороны магнитной пластинки в девять раз больше чем сила тяжести, действующая на шайбу.

Вычислим абсолютную погрешность ΔF_{M1} .

$$\Delta F_{M1} = \Delta\left(\frac{a}{\mu}\right) + \Delta(m_1 g) \quad (11).$$

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

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

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

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

$$\Delta F_{M1} = 0,0177\text{Н} + 0,0001\text{Н} = 0,018\text{Н}.$$

$$\mathbf{F_{M1} = (0,266 \pm 0,018)\text{Н}}$$

Часть 3

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

Таблица 2

Повторные измерения $F_{упрzi}$, Н			$\langle F_{упрzi} \rangle$, 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 $F_{упрз}$ почти не изменяется с увеличением количества шайб в каждом столбике. Шестикратное увеличение количества шайб привело к увеличению $F_{упрз}$ всего лишь в 1,1раза. 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:

$$F_M(n) = const \quad (16).$$

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

Часть 4.

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

Таблица 3

Повторные измерения $F_{упр4i}$, Н					$\langle F_{упр4i} \rangle$, Н	Колич. слоёв бумаги n , шт
i	2	3	4	5		
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 $F_{упр4}(n_{сл})$ (график 2). Полученный график похож на график обратной пропорциональности. Вычислим значения $\frac{1}{n_{сл}}$ (таблица 4) и построим график $F_{упр4}\left(\frac{1}{n_{сл}}\right)$ (график 3). Видим, что график 3 похож на график зависимости $F_{упр4}\left(\sqrt{\frac{1}{n_{сл}}}\right)$ или $F_{упр4}\left(\frac{1}{\sqrt{n_{сл}}}\right)$. Вычислим значения $\frac{1}{\sqrt{n_{сл}}}$ (таблица 5) и построим график $F_{упр4}\left(\frac{1}{\sqrt{n_{сл}}}\right)$ (график 4).

График 2. Зависимость $F_{упр4}(n_{сл})$

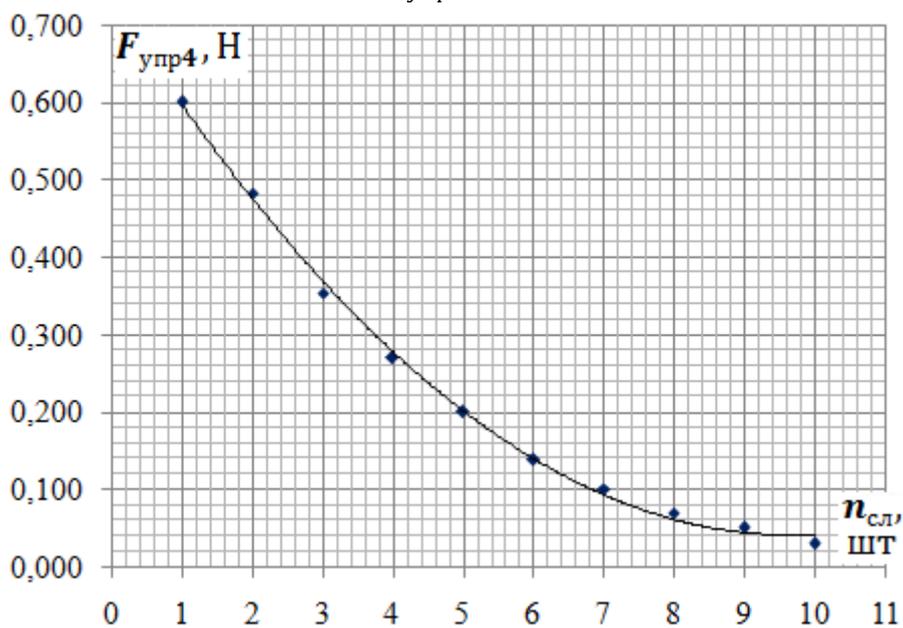


График 3. Зависимость $F_{упр4} \left(\frac{1}{n_{сл}} \right)$

Таблица 4.

Колич. слоёв бумаги n , шт	$\frac{1}{n}$	$\langle F_{упр4i} \rangle$, 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

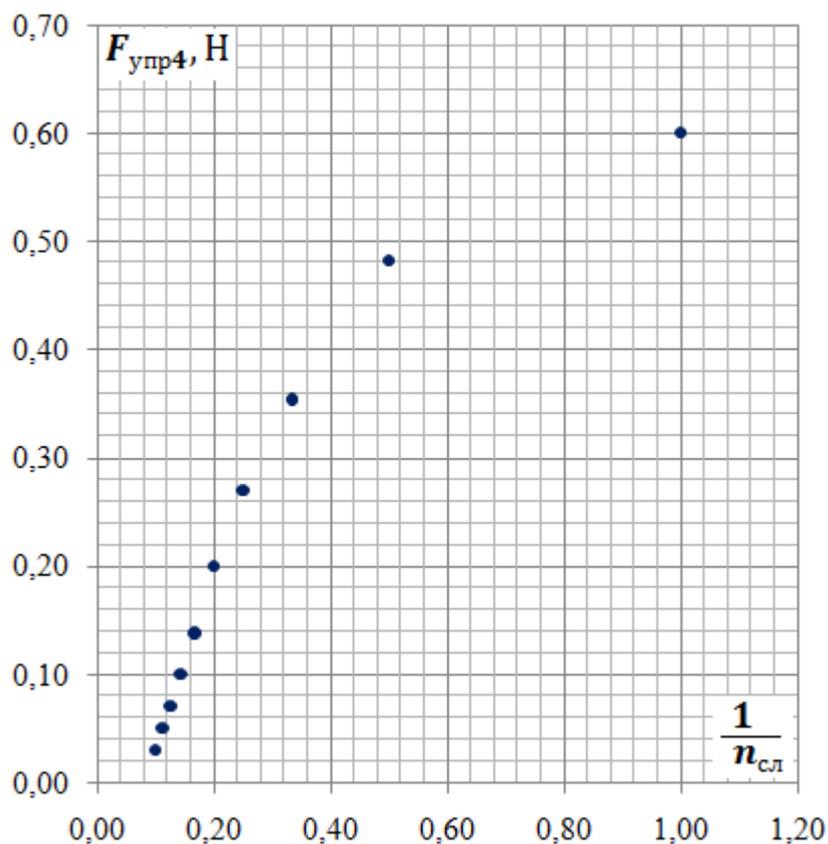
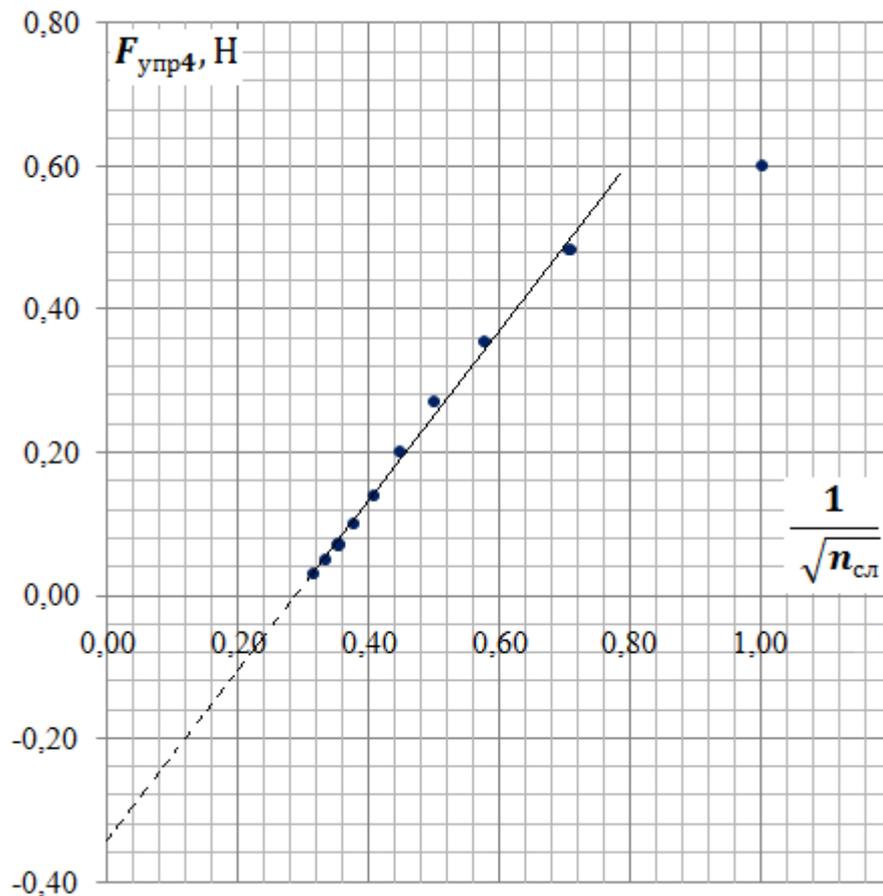


График 4. Зависимость $F_{\text{упр4}} \left(\frac{1}{\sqrt{n_{\text{сл}}}} \right)$

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:

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

Задание 10-2. Капли ...

Решение

1.

$$F_{\text{пн}} = \sigma l_{\text{гр}} \quad (10),$$

где $l_{\text{гр}}$ – длина границы области соприкосновения воды и шприца:

$$l_{\text{гр}} = \pi d \quad (11),$$

где d – внутренний диаметр носика шприца. Массу капли можно определить как

$$m_0 = \frac{V}{n} \rho \quad (12),$$

где: V – объём выдавленной из шприца воды, ρ – плотность воды, n – количество образовавшихся капель. Подставляя (11) в (10) и (12) в (1), после чего приравняв правые части (10) и (1) получим:

$$\sigma \pi d = \frac{V}{n} \rho g \quad (13).$$

Откуда получаем

$$n = \frac{\rho g}{\sigma \pi d} V \quad (2).$$

2. $d = (2,0 \pm 0,1)$ мм.

3. Массу измеряем с помощью электронных весов: $C_{\text{в}} = 0,1 \frac{\text{г}}{\text{дел}}$.

Объём воды измеряем с помощью шприца: $C_{\text{ш}} = 0,5 \frac{\text{мл}}{\text{дел}}$.

Масса пустого шприца: $m_{\text{ш}} = (6,5 \pm 0,1)$ г.

Набранный объём воды в шприц: $V_{\text{в}} = (12,0 \pm 0,5)$ см³. (Шприцы (10мл) градуируются шкалой до 12мл).

Масса шприца с водой: $m_{\text{шв}} = (18,6 \pm 0,1)$ г.

Масса воды: $\langle m_{\text{в}} \rangle = \langle m_{\text{шв}} \rangle - \langle m_{\text{ш}} \rangle = 18,6\text{г} - 6,5\text{г} = 12,1\text{г} \quad (14).$

Плотность воды:

$$\langle \rho \rangle = \frac{\langle m_{\text{в}} \rangle}{\langle V_{\text{в}} \rangle} = \frac{12,1\text{г}}{12,0\text{см}^3} = 1,01 \frac{\text{г}}{\text{см}^3} \quad (15).$$

$$\Delta m_{\text{в}} = \Delta m_{\text{шв}} + \Delta m_{\text{ш}} = 0,1\text{г} + 0,1\text{г} = 0,2\text{г} \quad (16),$$

$$\varepsilon_{\rho} = \sqrt{\left(\frac{\Delta m_{\text{в}}}{\langle m_{\text{в}} \rangle}\right)^2 + \left(\frac{\Delta V_{\text{в}}}{\langle V_{\text{в}} \rangle}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{0,2\text{г}}{12,1}\right)^2 + \left(\frac{0,5\text{см}^3}{12,0\text{см}^3}\right)^2} = 0,045 = 4,5\% \quad (17),$$

Допускается упрощённое уравнение $\varepsilon_{\rho} = \frac{\Delta m_{\text{в}}}{\langle m_{\text{в}} \rangle} + \frac{\Delta V_{\text{в}}}{\langle V_{\text{в}} \rangle} \quad (17')$

$$\Delta \rho = \langle \rho \rangle \cdot \varepsilon_{\rho} = 1,01 \frac{\text{г}}{\text{см}^3} \cdot 0,045 = 0,05 \frac{\text{г}}{\text{см}^3} \quad (18),$$

Экспериментальный тур.

10 класс. Решения задач. Бланк для жюри.

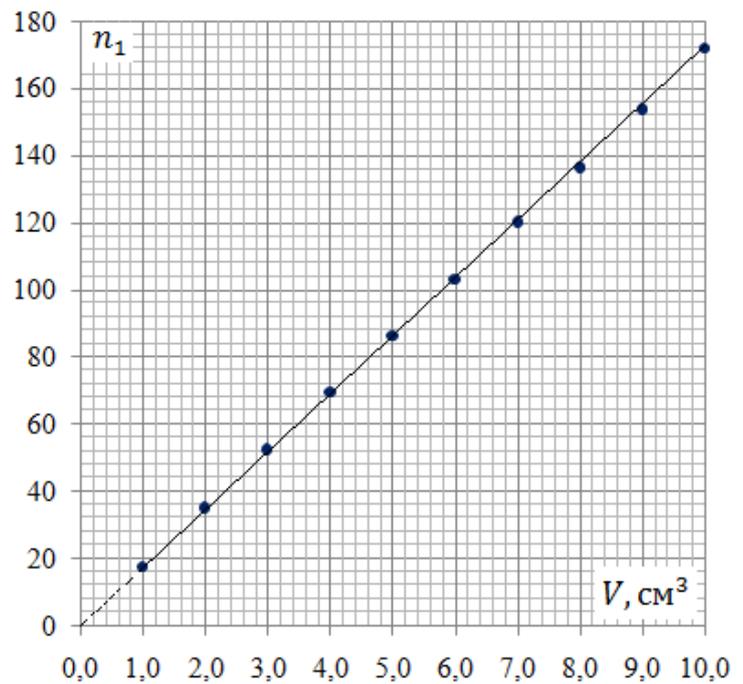
$$\rho = (1,01 \pm 0,05) \frac{\Gamma}{\text{см}^3}.$$

4. Результаты экспериментов представлены в таблице 2.

Таблица 2

Повторные изм., Колич. капель n_1			$\langle n_1 \rangle$	Объём воды $V, \text{см}^3$
1	2	3		
18	17	17	17	1,0
35	35	35	35	2,0
52	52	53	52	3,0
69	69	70	69	4,0
86	86	86	86	5,0
103	103	103	103	6,0
120	120	120	120	7,0
136	137	136	136	8,0
153	154	154	154	9,0
171	172	172	172	10,0
Сред.			94,5	5,5
Дисп.			2391	8
Ковар.			140	
				$\langle a_1 \rangle,$ $\frac{1}{\text{см}^3}$
				17,1
				$\Delta a_1,$ $\frac{1}{\text{см}^3}$
				0,1

График 1. Зависимость $n_1(V)$



5. Построим график зависимости $n_1(V)$ (график 1). Видим, что экспериментальные точки расположились вблизи усредняющей прямой, проходящей через начало координат. Это свидетельствует о том, что зависимость $n_1(V)$ прямопропорциональная.

Используя МНК определим среднее значение углового коэффициента наклона усредняющей прямой (таблица 2 третья строчка снизу) и его абсолютную погрешность (таблица 2 последняя строчка)

$$\langle a_1 \rangle = 17,1 \frac{1}{\text{см}^3}.$$

$$n_1 = 17,1V \quad [V] = 1\text{см}^3 \quad (19).$$

Экспериментальный тур.

10 класс. Решения задач. Бланк для жюри.

6. В уравнении (2) можно ввести обозначение:

$$a_1 = \frac{\rho g}{\sigma \pi d} \quad (20).$$

Из (13) получим:

$$\sigma = \frac{\rho g}{a_1 \pi d} \quad (21).$$

$$\langle \sigma \rangle = \frac{1,01 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 9,81 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}}{17,1 \cdot 10^6 \frac{1}{\text{м}^3} \cdot 3,1416 \cdot 2,0 \cdot 10^{-3} \text{м}} = 0,092 \frac{\text{Н}}{\text{м}}.$$

$$\varepsilon_\sigma = \sqrt{\left(\frac{\Delta \rho}{\langle \rho \rangle}\right)^2 + \left(\frac{\Delta g}{\langle g \rangle}\right)^2 + \left(\frac{\Delta a_1}{\langle a_1 \rangle}\right)^2 + \left(\frac{\Delta d}{\langle d \rangle}\right)^2} \quad (22).$$

Допускается упрощённое уравнение аналогичное (17')

$$\varepsilon_\sigma = \sqrt{\left(\frac{0,05 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}}{1,01 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}}\right)^2 + \left(\frac{0,01 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}}{9,81 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}}\right)^2 + \left(\frac{0,1 \frac{1}{\text{см}^3}}{17,1 \frac{1}{\text{см}^3}}\right)^2 + \left(\frac{0,1 \text{мм}}{2,0 \text{мм}}\right)^2} = 0,071.$$

$$\Delta \sigma = \langle \sigma \rangle \cdot \varepsilon_\sigma = 0,092 \frac{\text{Н}}{\text{м}} \cdot 0,071 = 0,007 \frac{\text{Н}}{\text{м}} \quad (23).$$

$$\sigma = \left(0,092 \pm 0,007 \frac{\text{Н}}{\text{м}}\right)$$

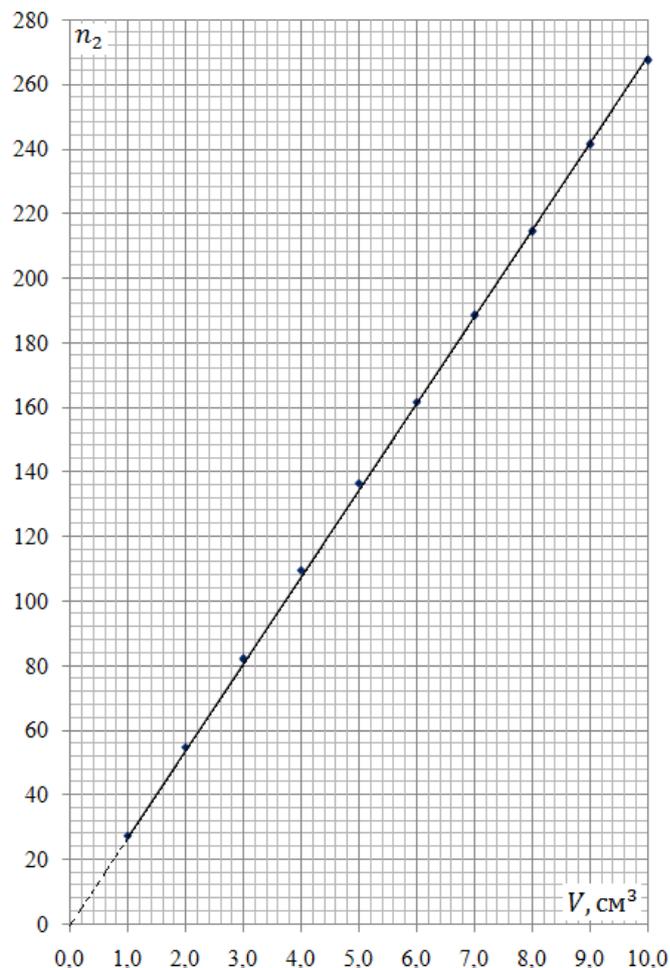
Полученный результат не совпадает с табличным значением. Измерения проводились при температуре воздуха в кабинете 21°C. Табличное значение коэффициента поверхностного натяжения при данной температуре не попадает в интервал абсолютной погрешности полученного нами значения. Причиной несовпадения значений может быть наличие примесей в водопроводной воде. В таблице 1 даны значения для дистиллированной воды. На результат также будет влиять краевой угол. Однако данный угол уменьшает значение проекции силы поверхностного натяжения на вертикальную ось и это должно приводить к результату меньше табличного. У нас получился результат больше чем табличный, следовательно значение краевого угла не является определяющей причиной. Ещё одной причиной может быть то, что диаметр шейки капли при отрыве несколько больше чем внутренний диаметр носика шприца.

7. Результаты экспериментов представлены в таблице 3.

Таблица 2

Повторные изм., Колич. капель n_2			$\langle n_2 \rangle$	Объем воды $V, \text{ см}^3$
1	2	3		
27	27	28	27	1,0
55	54	55	55	2,0
82	82	82	82	3,0
110	110	109	110	4,0
136	137	137	137	5,0
162	162	161	162	6,0
188	189	188	188	7,0
214	215	214	214	8,0
241	242	241	241	9,0
267	268	267	267	10,0
		Сред.	148,3	5,5
		Дисп.	5839	8
		Ковар.	219	
				$\langle a_2 \rangle,$ $\frac{1}{\text{см}^3}$
				26,9
				$\Delta a_2,$ $\frac{1}{\text{см}^3}$
				0,2

График 2. Зависимость $n_2(V)$



8. Построим график зависимости $n_2(V)$ (график 2). Видим, что экспериментальные точки расположились вблизи усредняющей прямой, проходящей через начало координат. Это свидетельствует о том, что зависимость $n_2(V)$ так же прямопропорциональная.

Используя МНК определим среднее значение углового коэффициента наклона усредняющей прямой (таблица 3 третья строчка снизу) и его абсолютную погрешность (таблица 3 последняя строчка)

$$\langle a_2 \rangle = 26,9 \frac{1}{\text{см}^3}.$$

$$n_2 = 26,9V \quad [V] = 1\text{см}^3 \quad (24).$$

9. Причина отличий результатов полученных в п.4 и п.7 в том, что при горизонтальном расположении шприца форма сечения шейки капли будет не круг, а близкой к эллипсу. Длина границы, перпендикулярно которой будет действовать сила поверхностного натяжения при отрыве капли уменьшится. Значит уменьшится и модуль силы поверхностного натяжения при отрыве капли, а следовательно силы поверхностного натяжения будут удерживать каплю меньшей массы. Если масса капли уменьшается, то их количество, выдавленное из такого же объёма, увеличивается.

10. Характерные линейные размеры сечения шейки капли в момент её отрыва – это полуоси эллиптического сечения. Большая полуось примем равной внутреннему радиусу носика шприца.

$$a = \frac{d}{2} = \frac{2,0\text{мм}}{2} = 1,0\text{мм} \quad (25).$$

Для вычисления значения малой полуоси воспользуемся уравнением (13). Заменим в нём длину окружности πd , на длину эллипса $\pi(a + b)$, получим:

$$\sigma\pi(a + b) = \frac{V}{n}\rho g \quad (26).$$

Из (26) получим:

$$n = \frac{\rho g}{\sigma\pi(a + b)}V \quad (27).$$

В уравнении (27) можно ввести обозначение:

$$a_2 = \frac{\rho g}{\sigma\pi(a + b)} \quad (28).$$

Из (28) получим:

$$b = \frac{\rho g}{\sigma\pi a_2} - a \quad (29),$$

$$b = \frac{1,01 \cdot 10^3 \frac{\text{КГ}}{\text{М}^3} \cdot 9,81 \frac{\text{М}}{\text{С}^2}}{0,092 \frac{\text{Н}}{\text{М}} \cdot 3,1416 \cdot 26,9 \cdot 10^6 \frac{1}{\text{М}^3}} - 1,0 \cdot 10^{-3}\text{М} = 0,3 \cdot 10^{-3}\text{М}.$$