

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1.

## ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ТЕЛ С ПОМОЩЬЮ МАШИНЫ АТВУДА

### Цель работы:

Убедиться в справедливости второго закона Ньютона, научиться рассчитывать погрешности измерений и оформлять результаты измерений в виде таблиц и графиков.

### Приборы и оборудование:

Машина Атвуда, набор грузов и перегрузков, секундомер, линейка

### Описание лабораторной установки

Изучение зависимости ускорения при поступательном движении от действующей силы и массы выполняется с помощью машины Атвуда. Она представляет собой блок, закрепленный на неподвижной оси, через который перекинута тонкая нерастяжимая нить с привязанными на ее концах двумя грузами одинаковой массы  $m$ . На грузы могут устанавливаться перегрузки различных масс  $m_1$  и  $m_2$ , которые приводят систему «грузы-перегрузки» в поступательное движение с ускорением  $a$ , а блок – во вращение с угловым ускорением  $\varepsilon$ .

### Задание 1. Изучение зависимости ускорения от величины приложенной силы

№ изм	$m_1, 10^{-3}$ кг лев	$m_2, 10^{-3}$ кг прав	$m_2 - m_1, 10^{-3}$ кг	$F_g, 10^{-2}$ Н	$t_1, c$	$t_2, c$	$t_3, c$	$t_4, c$	$t_{cp}, c$	$\Delta t_{сл}, c$	$\Delta t, c$	$a, м/с^2$	$\Delta a, м/с^2$	$\varepsilon_a, \%$
1	$5+2+3=10$	10	0	0	Проверка равновесия системы									
2	$5+3=8$	$10+2=12$	4	4	5.34	5.51	5.0	5.12	5.24	0.36	0.37	0.09	0.01	14.13
3	$5+2=7$	$10+3=13$	6	6	3.88	3.94	4.08	3.95	3.96	0.13	0.14	0.15	0.01	7.08
4	5	$10+2+3=15$	10	10	3.09	3.09	3.23	3.03	3.11	0.13	0.14	0.25	0.02	9.01
5	3	$10+2+5=17$	14	14	2.63	2.56	2.7	2.69	2.65	0.1	0.11	0.34	0.03	8.31
6	2	$10+3+5=18$	16	16	2.37	2.48	2.31	2.44	2.4	0.12	0.13	0.42	0.05	10.84

$$h = 1.2 \text{ м}; m_{\text{пост}} = 0.12 \text{ кг}$$

$$\Delta t_{\text{сист}} = 0.01 \text{ с}; \Delta h_{\text{сист}} = 0.005 \text{ м};$$

$$\alpha = 0.95; n = 4; t_{n,\alpha} = 3.2;$$

$$m_{\text{бл}} = 0.28 \text{ кг}; F_{\text{тр}}^{\text{пок}} = 0.4 * 10^{-2} \text{ Н}$$

## Задание 2. Изучение зависимости ускорения от массы системы

№ изм	$m_{\text{пр}}=m_{\text{лев}}=m \cdot 10^{-3} \text{ кг}$	$m_{\text{пост}}=2m + m_2 \text{ кг}$	$1/(m_{\text{пост}}+m_{\text{бл}}), \text{ кг}^{-1}$	$t_1, \text{ с}$	$t_2, \text{ с}$	$t_3, \text{ с}$	$t_4, \text{ с}$	$t_{\text{ср}}, \text{ с}$	$\Delta t_{\text{сл}}, \text{ с}$	$\Delta t, \text{ с}$	$a, \text{ м/с}^2$	$\Delta a, \text{ м/с}^2$	$\varepsilon_a, \%$
1	50	0.115	2.53	2.5	2.51	2.38	2.41	2.45	0.1	0.11	0.31	0.03	8.99
2	50+50=100	0.215	2.02	2.82	2.95	2.83	2.64	2.81	0.2	0.21	0.3	0.04	14.95
3	50+100=150	0.315	1.68	3.02	3.01	3.35	3.29	3.17	0.28	0.29	0.24	0.04	18.3
4	50+100+50=200	0.415	1.44	3.62	3.36	3.36	3.48	3.46	0.11	0.12	0.2	0.01	6.95

$h = 1.2 \text{ м}; m_{\text{бл}} = 0.28 \text{ кг}; m_2 = 0.015 \text{ кг}; F_g = 0.15 \text{ Н}$

$\Delta t_{\text{сист}} = 0.01 \text{ с}; \Delta h_{\text{сист}} = 0.005 \text{ м};$

$F_g^{\text{эк}} = 0.13 \text{ Н}$

### Обработка результатов измерений

Расчёты для задания 1, изм. 2:

$m_1 = 8, m_2 = 12, m_1 - m_2 = 4, F_g = 4$

$t_1 = 5.34, t_2 = 5.51, t_3 = 5.0, t_4 = 5.12$

$t_{\text{ср}} = (5.34 + 5.51 + 5.0 + 5.12) / 4 \approx 5.24$

$a = 2 * 1.2 / 27.4576 \approx 0.09$

$(m_{\text{пост}} + m_{\text{бл}}) = AB/BC = (10-6) * 10^{-2} / (0.25-0.15) = 0.04 / 0.1 = 0.4$

$m_{\text{бл}} = (m_{\text{пост}} + m_{\text{бл}}) - m_{\text{пост}} = 0.4 - 0.12 = 0.28$

Расчёты для задания 2, изм 1:

$m_{\text{пост}} = 0.115$

$m_{\text{пост}} = 0.115$

$1 / (m_{\text{пост}} + m_{\text{бл}}) = 2.53$

$t_1 = 2.5, t_2 = 2.51, t_3 = 2.38, t_4 = 2.41$

$t_{\text{ср}} = (2.5 + 2.51 + 2.38 + 2.41) / 4 \approx 2.45$

$a = 2 * 1.2 / 6.0025 \approx 0.31$

$F_g^{\text{эк}} = \tan a = AB/BC = 0.18/1.4 = 0.13$

**Расчёты для задания 3, изм 2 из 1 таблицы:**

$$\sigma = \sqrt{((5.34 - 5.24)^2 + (5.51 - 5.24)^2 + (5.0 - 5.24)^2 + (5.12 - 5.24)^2) / (4 * (4 - 1)))}$$
$$= \sqrt{(0.1549 / 12)} \approx 0.114$$

$$\Delta t_{\text{сл}} = 3.2 * 0.114 \approx 0.36, \Delta t = 0.36 + 0.01 = 0.37$$

$$E_a = \sqrt{((0.005 / 1.2)^2 + (2 * 0.37 / 5.24)^2)} * 100\%$$
$$= \sqrt{(1.7361111111111111e-05 + 0.01994347648738418)} * 100\%$$
$$\approx 14.0\%$$

$$\Delta a = 0.09 * 14.0\% \approx 0.01$$

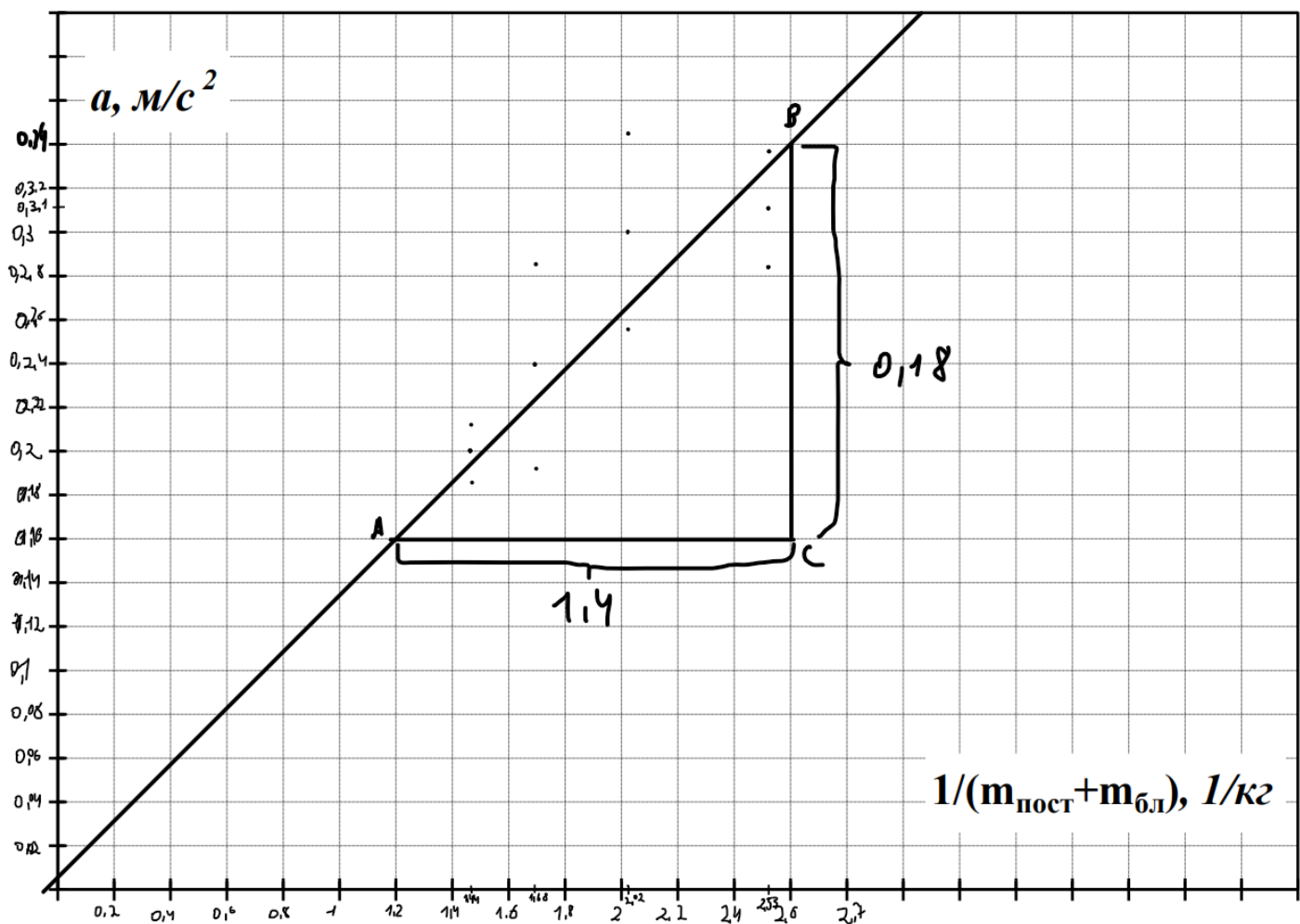
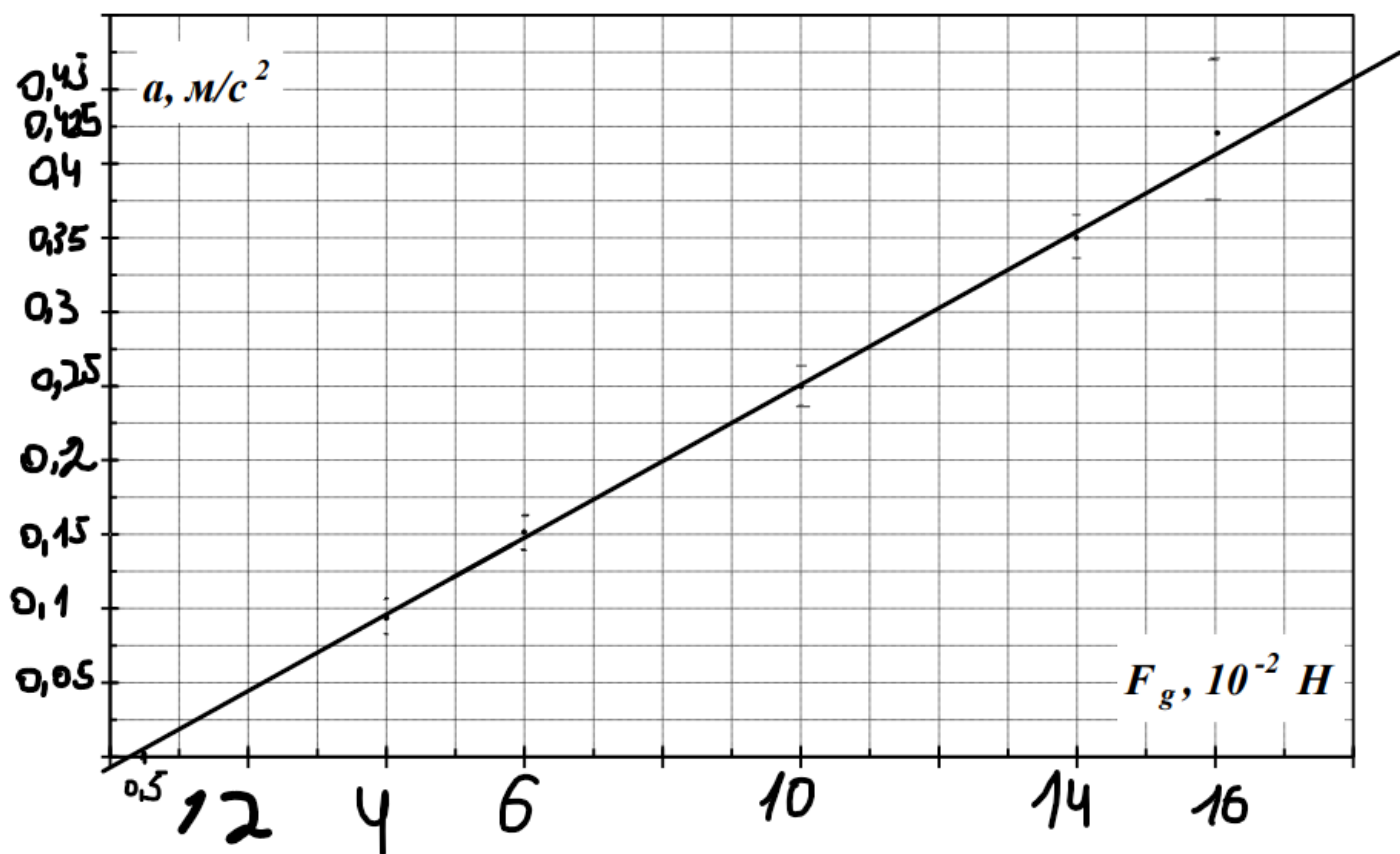
**Расчёты для задания 3, изм 1 из 2 таблицы:**

$$\sigma = \sqrt{((2.5 - 2.45)^2 + (2.51 - 2.45)^2 + (2.38 - 2.45)^2 + (2.41 - 2.45)^2) / (4 * (4 - 1)))}$$
$$= \sqrt{(0.0126 / 12)} \approx 0.032$$

$$\Delta t_{\text{сл}} = 3.2 * 0.032 \approx 0.1, \Delta t = 0.1 + 0.01 = 0.11$$

$$E_a = \sqrt{((0.005 / 1.2)^2 + (2 * 0.11 / 2.45)^2)} * 100\%$$
$$\approx 9.0\%$$

$$\Delta a = 0.31 * 9.0\% \approx 0.03$$



## Выводы

В результате выполнения лабораторной работы были экспериментально изучены законы поступательного движения тел с помощью машины Атвуда, а также доказаны зависимости  $a \sim F_g$  и  $a \sim 1/m$ , что подтверждает справедливость второго закона Ньютона. По графикам были определены  $m_{\text{бл}} = 0.28 \text{ кг}$ ,  $F_{\text{тр}}^{\text{пок}} = 0.004 \text{ Н}$  и  $F_g^{\text{экс}} = 0.13 \text{ Н}$ . Расхождение с теоретическим значением  $F_g = 0.15 \text{ Н}$  составило 13%, что может быть обусловлено погрешностями измерений. Измерения проводились с доверительной вероятностью  $\alpha = 0.95$ . Относительная погрешность измерения ускорения в опытах составила от 6.95% до 18.3%

## Теоретическое обоснование работы:

### 1. Дайте определение следующих понятий: скорость, ускорение (полное, тангенциальное, нормальное), масса, импульс, сила. Объясните их физический смысл. Укажите единицы измерения.

Скорость –  $[V^{\rightarrow}] \text{ м/с}$  – (физическая) векторная величина, характеризующая быстроту и направление движения. Показывает расстояние и направление, которое прошло тело за какое-то время.

Ускорение (полное) –  $[a^{\rightarrow}] \text{ м/с}^2$  – векторная величина, характеризующая быстроту изменения скорости по модулю и направлению. Показывает, как изменяется скорость по модулю и направлению тела за какое-то время. Тангенциальное ускорение ( $a_t$ ) характеризует быстроту изменения скорости по величине, нормальное ускорение ( $a_n$ ) характеризует быстроту изменения вектора скорости по направлению.

Масса –  $[m] \text{ кг}$  – скалярная величина, являющаяся мерой инертности тела, т.е. свойства тела сохранять состояние, в котором оно находилось до внешнего воздействия.

Импульс –  $[p^{\rightarrow}] \text{ кг} \cdot \text{м/с}$  – динамическая характеристика поступательного движения, напрямую зависящая от массы и скорости.

Сила –  $[F^{\rightarrow}] \text{ Н} = \text{кг} \cdot \text{м/с}^2$  – векторная величина, являющаяся мерой действия на тело со стороны других тел или полей, имеет модуль, направление и точку приложения. Показывает результат взаимодействия тел.

### 2. Сформулируйте I, II III законы Ньютона, объясните их физический смысл и область применения.

I закон Ньютона – существуют такие системы отсчёта, называемые инерциальными, относительно которых тело сохраняет состояние покоя или равномерного прямолинейного движения, если на него не действуют другие тела или действие скомпенсировано. Физический смысл: тело сохраняет скорость неизменной при отсутствии внешних воздействий или если они скомпенсированы.

II закон Ньютона – ускорение, приобретаемое телом в результате действия на него сил, прямо пропорционально равнодействующей этих сил, совпадает с ней по направлению и обратно пропорционально массе тела. Физический смысл: скорость тела зависит от равнодействующей сил, действующих на него, и от массы ( $a^{\rightarrow} = F^{\rightarrow}/m$ ).

III закон Ньютона - силы, с которыми два тела действуют друг на друга, имеют одинаковую природу, равны по модулю, противоположны по направлению и действуют вдоль одной прямой ( $F^{\rightarrow}_{1 \rightarrow 2} = -F^{\rightarrow}_{2 \rightarrow 1}$ )

Область применения: Законы Ньютона справедливы для макроскопических тел, движущихся со скоростями, много меньшими скорости света ( $v \ll c$ ), в инерциальных системах отсчёта.

### 3. Поясните устройство и принцип работы машины Атвуда. Какие силы действуют на грузы и блок в машине Атвуда? Запишите уравнения, описывающие движение данной системы. Каким образом можно убедиться в справедливости второго закона Ньютона?

Устройство и принцип работы машины Атвуда - см. описание лабораторной установки.

Силы, действующие на грузы: сила тяжести  $mg^{\rightarrow}$  и сила натяжения нити  $T^{\rightarrow}$ .

Силы, действующие на блок: силы натяжения нити  $T^{\rightarrow}_1$  и  $T^{\rightarrow}_2$ , сила тяжести блока  $m_{\text{бл}}g^{\rightarrow}$  и сила реакции оси  $N^{\rightarrow}$

Уравнения движения грузов и блока, с учетом того, что при вращении блока возникает момент силы трения в оси  $M^{\rightarrow}_{\text{тр}}$ , имеют вид:

$$\begin{cases} (m + m_1) \vec{a}_1 = (m + m_1) \vec{g} + \vec{T}_1, \\ (m + m_2) \vec{a}_2 = (m + m_2) \vec{g} + \vec{T}_2, \\ J \vec{\epsilon} = \vec{M}_1 + \vec{M}_2 + \vec{M}_{\text{тр}}. \end{cases} \quad \frac{F_g - F_{\text{тр}}}{m_{\text{пост}} + m_{\text{бл}}}.$$

Упростим систему:  $a =$

Чтобы убедиться в справедливости второго закона Ньютона, нужно провести ряд опытов и доказать зависимости  $a \sim F_g$  (при постоянной массе системы и переменной силе) и  $a \sim 1 / m$  (при постоянной силе и переменной массе), а затем сравнить экспериментальные значения с теоретическими.

### 4. Почему ускорение системы определяется по кинематической формуле $a = 2h / t^2$ , а не из соотношения $a = F_g / m$ ? Объясните методику определения ускорения а грузов в данной работе.

Формула  $a = F_g / m$  используется для идеальной системы без трения и с невесомым блоком (т.е. не для машины Атвуда). Поэтому из формулы  $S = V_0 t + at^2/2$ .  $V_0 = 0 \Rightarrow h = at^2/2 \Rightarrow a = 2h/t^2$

Для определения ускорения а грузов нужно измерить расстояние h от груза до пола, секундомером измерить время t опускания груза (повторить несколько раз) и посчитать ускорение по полученной формуле.

### 5. Какой смысл имеет отрезок, отсекаемый прямой на оси абсцисс, на графике зависимости $a = f(F_g)$ ?

Длина отрезка, отсекаемого прямой на оси абсцисс, на графике зависимости  $a \sim F_g$  равна силе трения покоя, которая не даёт системе прийти в движение

### 6. Сформулируйте основные правила построения графиков.

1. На координатных осях должны быть указаны величины, их единицы измерения и масштаб.
2. Площадь графика должна быть использована максимально.
3. Точки изображаются чётко и крупно маркерами, координаты экспериментальных точек не указывают.
4. От каждой точки вверх и вниз, вправо и влево откладывают в виде отрезков соответствующие абсолютные погрешности измерений.
5. График строится карандашом и должен проходить через отложенные на графике отрезки погрешностей

### 7. Что такое абсолютная и относительная погрешности измерений? Для чего вводятся эти погрешности?

Абсолютной погрешностью измерения  $\Delta X$  называют модуль разности между измеренным значением  $X$  и ее истинным значением  $X_{\text{ист}}$

Относительная погрешность – это отношение абсолютной погрешности измеряемой величины  $\Delta X$  к её среднему значению  $X_{\text{ср}}$

Результаты измерения физических величин всегда являются не абсолютно точными, а приближенными. Абсолютная погрешность нужна для записи результата, а относительная для сравнения точности разных измерений.

## 8. Дайте понятие случайной и систематической погрешностей, класса точности прибора.

Систематические погрешности – погрешности, которые систематически появляются при повторных измерениях одним и тем же прибором (из-за неточности приборов).

Случайные погрешности – погрешности, которые изменяются при повторных измерениях случайным образом (из-за случайностей).

Класс точности  $E_x$  прибора указан на шкале прибора (обычно нижний левый угол) как число в десятичном формате и позволяет посчитать систематическую ошибку по формуле:

$$\Delta X_{\text{сист}} = \frac{E_x \cdot X_{\text{пред}}}{100\%}$$

## 9. Как определяются погрешности табличных величин?

Если в расчетах используются табличные данные (без указания погрешностей), то обычно считается, что погрешность этой величины составляет  $\pm 0,5$  разряда последней значащей цифры. Например,  $\pi = 3,14 \pm 0,005$  или ускорение свободного падения  $g = 9,8 \pm 0,05$ .

9.

## 10. Какие измерения называются прямыми, косвенными? Методы определения погрешностей прямых и косвенных измерений

Измерения любых величин делятся на два вида: прямые и косвенные.

- 1) При прямых измерениях искомая физическая величина  $X$  считывается непосредственно со шкалы прибора, предназначенного для измерения. Так, массу тела можно измерить с помощью весов, длину – с помощью линейки и т. д.

Определение погрешности прямых измерений:

$$\Delta x = \Delta x_{\text{сист}} + \Delta x_{\text{случ}}$$

- 2) При косвенных измерениях искомая величина  $Y$  не измеряется, а вычисляется по формуле с использованием величин прямых измерений  $X_i$ , входящих в расчетную формулу. Например, определение скорости тела по пройденному пути, измеренному линейкой, и времени, определенному по часам; или определение плотности тела по массе, измеренной на весах, и объему тела, определенному с помощью мензурки с водой.

Определение погрешности косвенных измерений:

$$x = f(a, c)$$

$$\Delta x = \sqrt{(f'_a \cdot \Delta a)^2 + (f'_c \cdot \Delta c)^2}$$

10.

