Международная физическая олимпиада
«Формула Единства» / «Третье тысячелетие»
2023–2024 учебный год. Отборочный этап

Решения задач для 11 класса

11.1. (7 баллов) С поверхности земли бросают камень.

[1] С какой минимальной по модулю начальной скоростью его нужно бросить, чтобы он перелетел через стену толщиной 5,2 м? Высота стены равна ее толщине. Точка бросания камня находится на расстоянии 5,2 м от стены. Траектория камня симметрична относительно стены. Сопротивлением воздуха пренебречь.

(*А.Г.Арешкин, О.С. Комарова, В.Г. Мозговая, Д.Л. Федоров*)

Ответ: 13 (допускается 13,0 с уменьшением балла до 6).

Решение. 1. Изобразим на рисунке 16 стену и оптимальную траекторию камня, когда он перелетает через стену

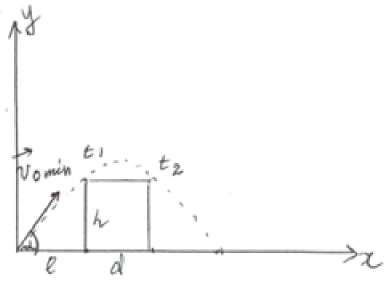

Рис. 16

2. В произвольный момент времени скорость камня равна

$$\vec{v} = \vec{v_0} + \vec{a}t \qquad (1)$$

3. Спроецируем (1) для оптимальной траектории на ось x

$$v_x = v_{o\text{мин}} \cos\alpha$$

4. Оптимальная траектория должна проходить через обе угловые точки стены, соответственно в моменты t_1 и t_2, тогда

$$l = v_x t_1 = v_{0\text{мин}} \cos\alpha * t_1 \qquad (2)$$

5. Так как $l = d$, то

$$t_2 = 2t_1$$

и

$$d + l = 2l = v_x t_2 = v_{0\text{мин}} \cos\alpha * t_2$$

6. Для равноускоренного движения

$$\vec{r} = \vec{v_0} + \frac{\vec{a}t^2}{2} \qquad (3)$$

7. Спроецируем (3) для оптимальной траектории на ось y

$$h = v_{0\text{мин}} \sin\alpha * t - \frac{gt^2}{2}$$

тогда

$$\frac{gt^2}{2} - v_{0\text{мин}} \sin\alpha * t + h = 0 \qquad (4)$$

8. Подставляем в (4) числовые

$$5t^2 - v_{0\text{мин}} \sin\alpha * t + 5.2 = 0 \quad (5)$$

9. Обозначаем $v_{0\text{мин}} \sin\alpha = x$, тогда

$$5t^2 - xt + 5.2 = 0 \qquad (6)$$

10. Решения уравнения (6)

$$t_{1,2} = \frac{x \pm \sqrt{x^2 - 104}}{10} \qquad (7)$$

11. Так как

$$t_2 = 2t_1 \qquad (8)$$

, то подставив в (8) решения (7), получаем:

$$x = 3\sqrt{x^2 - 104} \qquad (9)$$

12. Возведем обе стороны уравнения (9) в квадрат

$$x^2 = 9x^2 - -936$$

тогда

$$x^2 = \frac{936}{8} = 117\ (\frac{\text{м}^2}{\text{с}^2})$$

13. Извлечем квадратный корень, тогда

$$v_{0\text{мин}} \sin\alpha = \sqrt{117} = 3\sqrt{13} \qquad (10)$$

14. Так как

$$sin^2\alpha + cos^2\alpha = 1 \qquad (11)$$

15. Умножим (11) на $v^2_{0\text{мин}}$, тогда

$$v^2_{0\text{мин}} \sin^2\alpha + v^2_{0\text{мин}} \cos^2\alpha = v^2_{0\text{мин}} \qquad (12)$$

16. Из (2) и (7) получаем

$$v_{0\text{мин}} \cos\alpha = \frac{l}{t_1} = \frac{l}{\frac{x-\sqrt{x^2-104}}{10}} = \frac{10l}{x - \sqrt{x^2-104}} = \frac{52}{3\sqrt{13} - \sqrt{117-104}} = \frac{26}{\sqrt{13}} = 2\sqrt{13} \qquad (13)$$

Тогда

$$v^2_{0\text{мин}} \cos^2\alpha = 52 \qquad (14)$$

17. Подставляем (10) и (14) в (12), тогда

$$v_{0\text{мин}} = \sqrt{117+52} = 13\ (\frac{\text{м}}{\text{с}})$$

11.2. (7 баллов) На одном из островов Бермудского треугольника, почему-то названном Косогравией, ускорение свободного падения, как и везде, равно g $= 9.8$ м/с^2 по величине, но направлено под углом $\alpha = 15°$ к вертикали, то есть слегка скошено в Северном направлении. Очень низкорослый туземец стреляет из лука под углом $\beta = 60°$ к поверхности острова, и сообщает стреле известную начальную скорость $v_0 = 3$ м/с.

[2] На каком расстоянии от туземца стрела упадёт на поверхность острова если выстрел производился в северном направлении? В южном направлении? В западном направлении?

Замечание. Ответ дать с точностью до одного сантиметра. Ответы указывайте через точку с запятой. *(А.С. Чирцов)*

Ответ: 1,21; 0,44; 0,92 (допускается 1,21; 0,44; 0,91 с уменьшением балла до 6).

Решение. 1. Введем систему координат с началом в точке выстрела, осью z, направленной вертикально вверх, осью x - в направлении на север и осью y - в направлении на запад.

2. Тогда составляющие ускорения вдоль осей будут иметь следующие значения

$$g_x = g\sin\alpha$$

$$g_z = -g\cos\alpha$$

$$g_y = 0$$

3. Так как туземец низкорослый, можно считать, что выстрел производится с поверхности земли.
4. Рассмотрим первый случай. Задача двухмерная.
4.1. Компоненты начальной скорости

$$v_{0z} = v_0 \sin\beta \qquad (1)$$

$$v_{0x} = v_0 \cos\beta \qquad (2)$$

4.2. Запишем уравнения для координат стрелы в произвольный момент времени

$$x(t) = v_{0x}t + \frac{g_x t^2}{2} \qquad (3)$$

$$z(t) = v_{0z}t + \frac{g_z t^2}{2} \qquad (4)$$

4.3. Определим время полета $t_{\text{п}}$, приравняв высоту к нулю

$$v_{0z}t_{\text{п}} + \frac{g_z t_{\text{п}}^2}{2} = 0$$

Тогда

$$t_{\text{п}} = \frac{2v_{0z}}{-g_z} \qquad (5)$$

4.4 Подставив (5) в (3), получим

$$x\left(t_{\text{п}}\right) = v_{0x}t_{\text{п}} + \frac{g_x {t_{\text{п}}}^2}{2} = v_{0x}\frac{2v_{0z}}{-g_z} + \frac{g_x}{2}\left(\frac{2v_{0z}}{-g_z}\right)^2 \qquad (6)$$

4.5. Преобразуем (6) и получим

$$L_{\text{север}} = \frac{2v_0^2}{g}\left(\frac{\cos\beta\sin\beta}{\cos\alpha} + \frac{\sin\alpha\left(\sin\beta\right)^2}{\left(\cos\alpha\right)^2}\right)$$

4.6. Подставив числовые значения, получим

$$L_{\text{север}} = 1{,}21 \text{ (м)}$$

5. Рассмотрим второй случай. Задача двухмерная.
5.1. Компоненты начальной скорости

$$v_{0z} = v_0 \sin\beta \qquad (7)$$

$$v_{0x} = -v_0 \cos\beta \qquad (8)$$

5.2. Запишем уравнения для координат стрелы в произвольный момент времени

$$x(t) = v_{0x}t + \frac{g_x t^2}{2} \qquad (9)$$

$$z(t) = v_{0z}t + \frac{g_z t^2}{2} \qquad (10)$$

5.3. Определим время полета $t_{\text{п}}$, приравняв высоту к нулю

$$v_{0z}t_{\text{п}} + \frac{g_z t_{\text{п}}^2}{2} = 0$$

Тогда

$$t_{\text{п}} = \frac{2v_{0z}}{-g_z} \qquad (11)$$

5.4 Подставив (11) в (9), получим

$$x\left(t_{\text{п}}\right) = v_{0x}t_{\text{п}} + \frac{g_x {t_{\text{п}}}^2}{2} = v_{0x}\frac{2v_{0z}}{-g_z} + \frac{g_x}{2}\left(\frac{2v_{0z}}{-g_z}\right)^2 \qquad (12)$$

5.5. Преобразуем (12) и получим

$$L_{\text{юг}} = \frac{2v_0^2}{g}\left(\frac{\cos\beta\sin\beta}{\cos\alpha} - \frac{\sin\alpha\left(\sin\beta\right)^2}{\left(\cos\alpha\right)^2}\right)$$

5.6. Подставив числовые значения, получим

$$L_{\text{юг}} = 0{,}44 \text{ (м)}$$

6. Рассмотрим третий случай. Задача трехмерная.
6.1. Компоненты начальной скорости

$$v_{0z} = v_0\sin\beta \qquad (13)$$

$$v_{0y} = v_0\cos\beta \qquad (14)$$

$$v_{0x} = 0 \qquad (15)$$

6.2. Запишем уравнения для координат стрелы в произвольный момент времени

$$x(t) = \frac{g_x t^2}{2} \qquad (16)$$

$$z(t) = v_{0z}t + \frac{g_z t^2}{2} \qquad (17)$$

$$y(t) = v_{0y}t \qquad (18)$$

6.3. Определим время полета $t_{\text{п}}$, приравняв высоту к нулю

$$v_{0z}t_{\text{п}} + \frac{g_z t_{\text{п}}^2}{2} = 0$$

Тогда

$$t_{\text{п}} = \frac{2v_{0z}}{-g_z} \qquad (19)$$

6.4. Подставив (19) в (16) и (18), получим

$$x\left(t_{\text{п}}\right) = \frac{g_x {t_{\text{п}}}^2}{2} = \frac{g_x}{2}\left(\frac{2v_{0z}}{-g_z}\right)^2 \qquad (20)$$

$$y\left(t_{\text{п}}\right) = v_{0y}t_{\text{п}} = v_{0y}\frac{2v_{0z}}{-g_z} \qquad (21)$$

6.5. В этом случае

$$L_{\text{запад}} = \sqrt{\left(x\left(t_{\text{п}}\right)\right)^2 + \left(y\left(t_{\text{п}}\right)\right)^2} \qquad (22)$$

6.6. Преобразуем (20) - (22) и получим

$$L_{\text{запад}} = \frac{2v_0^2}{g}\frac{\sin\beta}{\cos\alpha}\sqrt{(\sin\beta\tan\alpha)^2 + (\cos\beta)^2}$$

6.7. Подставив числовые значения, получим

$$L_{\text{запад}} = 0{,}92\ (\text{м})$$

11.3. (5 баллов) Тело массой 10 г равномерно тонет в воде.

[3] Считая, что на нагревание тела идет 50% выделяющейся при движении теплоты, определить, на сколько градусов возрастет температура тела при погружении на 10 м. Теплоемкость тела 0,4 Дж/К. Плотность тела много больше плотности воды.

(*Ю.В. Максимачев, Т.Н. Стрелкова, Б.К. Галякевич*)

Ответ: 1,3 (допускается 1,25 с уменьшением балла до 2).

Решение. 1. Изобразим на рисунке 17 силы, действующие на тело

2. Так как скорость $v = const$, то

$$\vec{F_{\text{рез}}} = 0 \qquad (1)$$

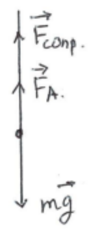

Рис. 17

3. Спроецируем (1) на вертикальную ось

$$F_{\text{сопр}} + F_{\text{А}} - mg = 0 \qquad (2)$$

4. Из формул для силы Архимеда

$$F_{\text{А}} = \rho_{\text{в}} g V$$

5. Так как плотность тела

$$\rho = m/V$$

получим

$$mg = \rho_{\text{т}} g V$$

6. Так как $\rho_{\text{т}} >> \rho_{\text{в}}$, то $mg >> F_{\text{А}}$ и поэтому силой Архимеда можно пренебречь и

$$F_{\text{сопр}} = mg \qquad (3)$$

7. Полные тепловые потери равны мощности силы $F_{\text{сопр}}$. Тогда, используя (3) получаем

$$Q_{\text{полн}} = F_{\text{сопр}} h = mgh \qquad (4)$$

8. По определению теплоемкости

$$Q_{\text{тела}} = c\Delta T$$

9. Так как на нагревание тела идет 50% выделяющейся при движении теплоты

$$c\Delta T = 0.5mgh \qquad (5)$$

10. Преобразуем (5) и подставляем числовые значения

$$\Delta T = \frac{0.5mgh}{c} = \frac{0.5 * 0.01 * 10 * 10}{0.4} = 1.25\ (\text{К})$$

11. Округляем

11.4. (6 баллов) Электрический чайник имеет две обмотки. При включении только первой из них вода закипает через 40 мин, только второй – через 60 мин.

[4] Через сколько минут закипит вода при одновременном включении обеих обмоток параллельно?

(*Ю.В. Максимачев, Т.Н. Стрелкова, Б.К. Галякевич*)

Ответ: 24.

Решение. 1. По закону Джоуля - Ленца

$$Q = \frac{U^2 t}{R}$$

2. Так как для осуществления процесса закипания воды необходимо определенное (и одинаковое во всех случаях) количество тепла

$$\frac{U^2 t_1}{R_1} = \frac{U^2 t_2}{R_2} = \frac{U^2 t_{\text{пар}}}{R_{\text{пар}}} \qquad (1)$$

3. Сопротивление при параллельном соединении

$$R_{\text{пар}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

4. Преобразуя (1) находим отношение сопротивлений обмоток плитки

$$\frac{U^2 t_1}{R_1} = \frac{U^2 t_2}{R_2}$$

тогда

$$\frac{t_1}{R_1} = \frac{t_2}{R_2} \qquad (2)$$

5. Подставим в (2) числовые значения

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{t_2}{t_1} = 1.5$$

тогда

$$R_2 = 1.5 R_1 \qquad (3)$$

6. Используя (3) определим сопротивление при параллельном соединении

$$R_{\text{пар}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{R_1 * 1.5 R_1}{R_1 + 1.5 R_1} = \frac{1.5 R_1^2}{2.5 R_1} = 0.6 R_1$$

7. Из (1) получим

$$\frac{t_1}{R_1} = \frac{t_{\text{пар}}}{R_{\text{пар}}} \qquad (4)$$

8. Преобразуем (4) и подставляем числовые значения

$$t_{\text{пар}} = \frac{t_1 R_{\text{пар}}}{R_1} = 0.6 * 40 = 24 \text{ (мин)}$$

11.5. (7 баллов) С вершины длинной наклонной плоскости, образующей с горизонтом угол 60°, бросают вниз тело с начальной скоростью 10 м/с под углом 30° к наклонной плоскости.

[5] На каком расстоянии от точки бросания находится точка падения тела на наклонную плоскость? Сопротивлением воздуха пренебречь.

(*Ю.В. Максимачев, Т.Н. Стрелкова, Б.К. Галякевич*)

Ответ: 34,6.

Решение. 1. Изобразим на рисунке 18 наклонную плоскость, введенную систему координат и компоненты скорости и ускорения

2. Положение тела в произвольный момент времени при равноускоренном движении задается уравнением

$$\vec{r} = \vec{v_0} + \frac{\vec{a}t^2}{2} \qquad (1)$$

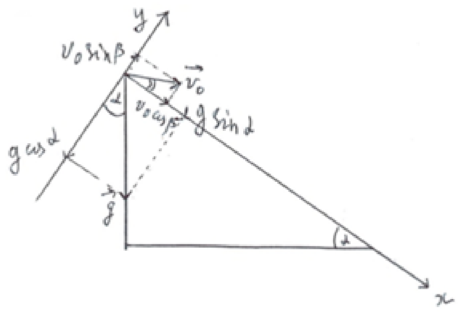

Рис. 18

3. Спроецируем (1) на ось x

$$l = v_0 \cos\beta * t + \frac{g \sin\alpha * t^2}{2} \qquad (2)$$

4. Определим момент времени, когда $v_y = 0$. Для этого запишем уравнение для скорости в произвольный момент времени при равноускоренном движении

$$\vec{v} = \vec{v_0} + \vec{a}t \qquad (3)$$

5. Спроецируем (3) на ось y и приравняем результат к нулю

$$v_y = v_0 \sin\beta - g \cos\alpha * t = 0 \qquad (4)$$

6. Решая (4) и подставляя числовые значения, получим

$$t = \frac{v_0 \sin\beta}{g \cos\alpha} = 1 \text{ (с)}$$

7. Так как $t_{\text{полн}} = t_{\text{подъем}} + t_{\text{спуск}} = 2t_{\text{подъем}} = 2\text{с}$, то подставив численные значения в (2), имеем

$$l = 20\frac{\sqrt{3}}{2} + 20\frac{\sqrt{3}}{2} = 20\sqrt{3} = 34.6 \text{ (м)}$$

11.6. (7 баллов) Тело массой 0,4 кг начинает скользить с начальной скоростью 12 м/с вверх по наклонной плоскости, составляющей угол 30° с горизонтом.

[6] Определить работу сил трения за 3,6 с движения, если коэффициент трения в 6 раз меньше кв. корня из 3.

(Ю.В. Максимачев, Т.Н. Стрелкова, Б.К. Галякевич)

Ответ: −14,6.

Решение. 1. Разобьем процесс движения на 2 этапа: подъем и спуск

2. Рассмотрим первый этап - подъем

3. Изобразим на рисунке 19 наклонную плоскость, тело, направление оси и силы, действующие на тело

4. По определению работы постоянной силы

$$A_{F_{\text{тр}}} = -F_{\text{тр}}S \qquad (1)$$

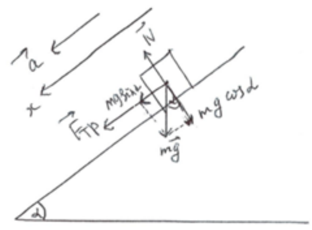

Рис. 19

5. Так как $F_{\text{тр}} = \mu N$ и $N = mg\cos\alpha$, подставив числовые значения, получим

$$F_{\text{тр}} = \mu mg cos\alpha = 1 \text{ (Н)} \qquad (2)$$

6. Спроецируем уравнение второго закона Ньютона $F_{\text{рез}} = ma$ на ось x

$$\mu mg\cos\alpha + mg\sin\alpha = ma \qquad (3)$$

7. Решая (3) и подставив числовые значения, получим

$$a = g(\mu\cos\alpha + \sin\alpha) = 10\left(\frac{\sqrt{3}}{6}\frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{1}{2}\right) = 7.5\ (\frac{\text{м}}{\text{с}^2}) \qquad (4)$$

8. Для произвольного момента времени при равноускоренном движении справедливо соотношение

$$v_0^2 - v^2 = 2aS_{\text{подъем}} \qquad (5)$$

тогда

$$S_{\text{подъем}} = \frac{v_0^2}{2\text{a}} = 9.6\ (\text{м}) \qquad (6)$$

9. Согласно (1)

$$A_{F_{\text{тр}}\text{подъем}} = -F_{\text{тр}}S_{\text{подъем}} = -9.6\ (\text{Дж}) \qquad (7)$$

10. Определим время подъема. Для этого приравняем к нулю скорость движения вдоль плоскости

$$v = v_0 - at_{\text{подъем}} = 0$$

тогда

$$t_{\text{подъем}} = \frac{v_0}{a} = 1.6\ (\text{с}) \qquad (8)$$

11. Рассмотрим второй этап - спуск
12. Изобразим на рисунке 20 наклонную плоскость, тело, направление оси и силы, действующие на тело
13. Учитывая (8), определим время спуска

$$t_{\text{спуск}} = t - t_{\text{подъем}} = 3{,}6 - 1{,}6 = 2\ (\text{с}) \qquad (9)$$

14. Определим дистанцию спуска

$$S_{\text{спуск}} = \frac{a' t_{\text{спуск}}^2}{2} \qquad (10)$$

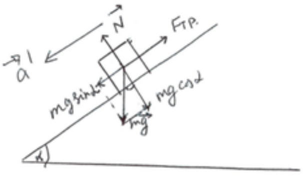

Рис. 20

15. Спроецируем уравнение второго закона Ньютона $F_{\text{рез}} = ma$ на ось x

$$mg\sin\alpha - \mu mg\cos\alpha = ma' \qquad (11)$$

тогда

$$a' = g(\sin\alpha - \mu\cos\alpha) = g\left(\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{3}}{6}\frac{\sqrt{3}}{2}\right) = 2.5\ (\frac{\text{м}}{\text{с}^2}) \qquad (12)$$

16. Подставив (12) в (10), получим

$$S_{\text{спуск}} = 5\ (\text{м})$$

17. Согласно (1)

$$A_{F_{\text{тр}}\text{спуск}} = -F_{\text{тр}}S_{\text{спуск}} = -5\ (\text{Дж}) \qquad (13)$$

18. Складываем (7) и (13), получим

$$A_{F_{\text{тр}}} = A_{F_{\text{тр}}\text{подъем}} + A_{F_{\text{тр}}\text{спуск}} = -9.6 - 5 = -14.6\ (\text{Дж})$$

11.7. (5 баллов) При изотермическом расширении 2 молям идеального газа сообщено 249 Дж теплоты. Затем газ перевели в начальное состояние путем изобарического сжатия и изохорического нагревания. Работа газа за цикл равна 83 Дж.

[7] Определить разность максимальной и минимальной температуры газа в цикле.

(*Ю.В. Максимачев, Т.Н. Стрелкова, Б.К. Галякевич*)

Ответ: 10.

Решение. 1. Изобразим на рисунке 21 график рассматриваемого цикла

2. Так как рассматривается цикл, то начальное и конечное состояния совпадают и, следовательно, полное изменение внутренней энергии рано нулю. Поэтому из первого закона термодинамики

$$A = Q_1 - Q_2 \qquad (1)$$

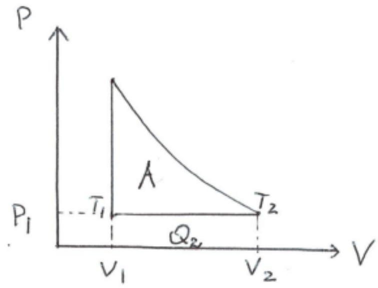

Рис. 21

3. Определим количество тепла, потерянного в ходе изобарического сжатия и изохорического нагревания

$$Q_2 = Q_1 - A = 249 - 83 = 166 \text{ (Дж)} \qquad (2)$$

4. Если рассмотреть суммарный процесс, состоящий из изобарического сжатия и изохорического нагревания, то в начальной и конечной точках температура газа одинаковая и, следовательно, изменение внутренней энергии рано нулю. Поэтому количество тепла в суммарном процессе равно работе при изобарическом сжатии (так как при изохорическом нагревании работа равна нулю)

$$Q_2 = P_1(V_2 - V_1) = P_1 \Delta V \qquad (3)$$

5. Тогда из уравнения Майкельсона - Менделеева

$$Q_2 = P_1 \Delta V = \nu R \Delta T \qquad (4)$$

6. Преобразуем (4) и подставляем числовые значения

$$\Delta T = \frac{Q_2}{\nu R} = \frac{166}{16.6} = 10 \text{ (K)} \qquad (5)$$

7. Очевидно, что $T_1 = T_{min}$, т.к. $P_1 = P_{min}$ и $V_1 = V_{min}$ (см. рис. 21)

8. Докажем, что $T_2 = T_{max.}$ Выберем и зафиксируем V, такое что $V_1 < V < V_2$; ему соответствуют 2 значения давления p' и p, причем $p' > p$. Так как $V = const$, то $T' > T$, следовательно температура изотермы выше температуры изобары при любом $V_1 < V < V_2$, т.к. T_2 - температура изотермы, то $T_2 = T_{max}$.

9. Следовательно

$$T_{max} - T_{min} = 10 \text{ (K)}$$

11.8. (6 баллов) Бусинка может свободно скользить по обручу радиусом 4,5 м, который вращается относительно вертикальной оси, проходящей через его центр с угловой скоростью 2 рад/с.

[8] На какую максимальную высоту относительно нижнего положения поднимется бусинка? Ось лежит в плоскости обруча.

(*Ю.В. Максимачев, Т.Н. Стрелкова, Б.К. Галякевич*)

Ответ: 2 (допускается 2,0).

Решение. 1. Изобразим (рис. 22) обруч и силы, действующие на бусинку при некотором угле отклонения от вертикали

2. Спроецируем уравнение 2 закона Ньютона $\vec{F_{\text{рез}}} = m\vec{a}$ на вертикальную и горизонтальную оси, соответственно

$$N\cos\alpha - mg = 0 \qquad (1)$$

(так как $a_y = 0$)

$$N\sin\alpha = ma_{\text{цс}} = m\omega^2 R_{\text{обр}}\sin\alpha \qquad (2)$$

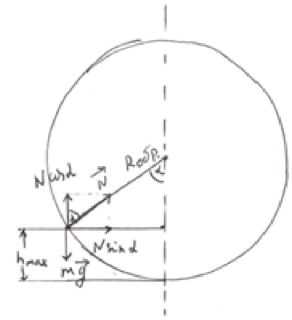

Рис. 22

3. Преобразуем (1) и (2) и запишем в виде системы уравнений

$$\begin{cases} N\cos\alpha = mg \\ N = m\omega^2 R_{\text{обр}} \end{cases} \qquad (3)$$

4. Из (3) получаем

$$\cos\alpha = \frac{g}{\omega^2 R_{\text{обр}}} \qquad (4)$$

5. Используя обозначения на рисунке и формулу (4) и подставив числовые значения, получим

$$h_{max} = R_{\text{обр}} - R_{\text{обр}}\cos\alpha = R_{\text{обр}} - R_{\text{обр}}\frac{g}{\omega^2 R_{\text{обр}}} = 4.5 - 4.5 * \frac{5}{9} = 2 \text{ (м)}$$

11.9. (6 баллов) Два шарика массами 0,2 г и 0,8 г и зарядами 0,3 мкКл и 0,2 мкКл соединены тонкой нитью длиной 20 см и движутся вдоль силовой линии однородного электрического поля с напряженностью 10 кВ/м, направленной вертикально вниз.

[9] Определить в миллиньютонах модуль силы натяжения нити.

(Ю.В. Максимачев, Т.Н. Стрелкова, Б.К. Галякевич)

Ответ: 11,5 или 15,5.

Решение. 1. Изобразим на рисунке 23 нить, направления оси и вектора напряженности электрического поля и силы, действующие на оба шарика

2. Задача - одномерная, все силы направлены вдоль оси x. Запишем уравнение второго закона Ньютона для каждого из шариков

$$\vec{F_{\text{рез}}} = m\vec{a} \qquad (1)$$

3. По 3 закону Ньютона: $F_{12} = F_{21}$

4. Спроецируем уравнение (1) для каждого из шариков на ось x.

$$T + q_1E + m_1g - F_{12} = m_1a \qquad (2)$$

$$F_{21} + q_2E + m_2g - T = m_2a \qquad (3)$$

Так как шарики движутся вместе, у них одинаковые ускорения.

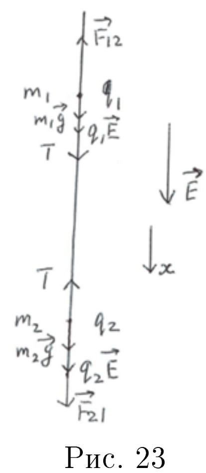

Рис. 23

5. Разделим (3) на (2) и подставим числовые значения

$$\frac{F_{21} + q_2E + m_2g - T}{T + q_1E + m_1g - F_{12}} = \frac{m_2a}{m_1a} = \frac{8 * 10^{-4}}{2 * 10^{-4}} = 4 \qquad (4)$$

то есть

$$F_{21} + q_2E + m_2g - T = 4T + 4q_1E + 4m_1g - 4F_{12} \qquad (5)$$

6. Так как $\frac{m_2}{m_1} = 4$, из (5) получим

$$T = F_{21} + \frac{E(q_2 - 4q_1)}{5} = 9*10^9 * \frac{q_1 q_2}{c^2} - \frac{E(4q_1 - q_2)}{5} = 9*10^9 \frac{6*10^{-14}}{0.04} + \frac{10\,(8*10^{-4} - 8*10^{-4}) - 10^4(12*10^{-7}}{5}$$

$$= \frac{9*6*10^{-3}}{4} - \frac{10*10^{-3}}{5} = 11.5*10^{-3}\text{Н} = 11.5\ (\text{мН})$$

Возможный ответ: 15,5 (если поменять местами шарики)

Таблица констант

Ускорение свободного падения	g = 10 м/с^2
Скорость света	c = 3·10^8 м/с
Универсальная газовая постоянная	R = 8,3 Дж/(моль·К)
Модуль заряда электрона	e = 1,6·10^{-19} Кл
Число Авогадро	NA = 6·10^{23} моль$^{-1}$
Коэффициент в законе Кулона	k= 9·10^9 Нм^2/Кл^2
Молярная масса водорода	M_{H2} = 2·10^{-3} кг/моль
Постоянная Планка	h = 6,6·10^{-34} Дж·с
Молярная масса гелия	M_{He} = 4·10^{-3} кг/моль
Электронвольт	1 эВ = 1,6·10^{-19} Дж
$\pi = 3{,}14$	$\pi^2 = 10$
$\sqrt{2} = 1{,}41$	$\sqrt{3} = 1{,}73$