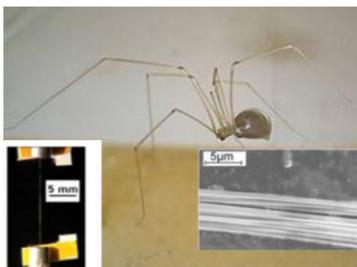




**Физика для школьников 7 – 11 класса (очный тур)
 Простые задачи (вариант 1)**

Задача 1. Сверхпрочная паутина

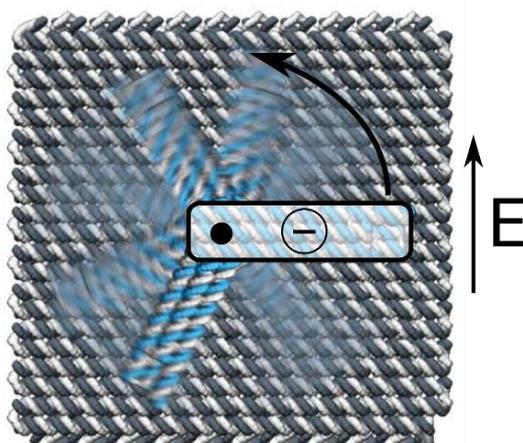
В результате эксперимента с пауками, спрыснутыми содержащей углеродные нанотрубки водой, учеными была получена уникальная сверхпрочная паутина с модулем Юнга в 15 раз большим, чем у обычной паутины.



1. На сколько миллиметров будут различаться удлинение одной нити такой усиленной углеродными нанотрубками паутины Δl_{CNT} по сравнению с удлинением нити обычной паутины, равном $\Delta l_0 = 3$ мм, если к этим нитям прикладывать одну и ту же растягивающую силу? **(3 балла)** Что при этом будет больше: Δl_{CNT} или Δl_0 ? **(1 балл)** При расчетах полагать, что исходная длина обеих нитей была одинаковой, а их диаметр был постоянным и составлял 7 мкм.
2. Какова максимальная масса груза, который сможет выдержать исследуемая усиленная углеродными нанотрубками нить, если ее предел прочности составляет $\sigma_0 = 2$ ГПа? **(4 балла)**

Всего – 8 баллов

Задача 2. Ротор из ДНК

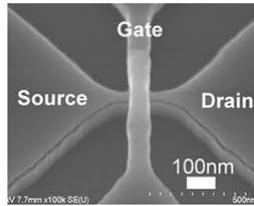


Ученые из Мюнхена изобрели новый тип наномотора: его ротор состоит из молекулы ДНК, закрепленной на полимерной подложке. Для поворота наномотора они приложили однородное электрическое поле, направленное перпендикулярно ротору.

1. Найдите длину ротора из ДНК l , если напряженность внешнего поля равна $E = 1$ В/м, заряд молекулы ДНК $q = -1,28 \cdot 10^{-17}$ Кл и сосредоточен в середине молекулы, а момент электрической силы, действующий на ротор относительно левого края, равен $M = 8 \cdot 10^{-25}$ Н·м. **(3 балла)**
2. Какая сила возникнет у левого края, если в точке, отстоящей на $1/6$ длины молекулы от правого края, она будет удерживаться силой направленной вдоль поля, так что молекула остается неподвижной? **(5 баллов)**

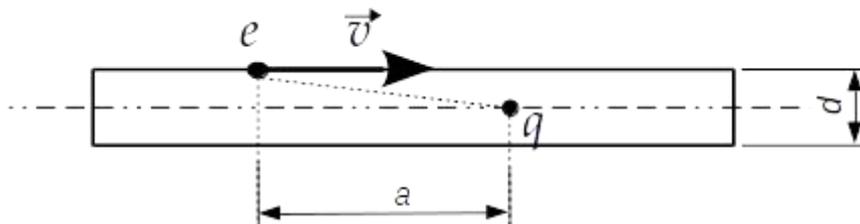
Всего – 8 баллов

Задача 3. Примесь в нанопроводе



Характерные размеры транзисторов и подводящих проводов в современных процессорах продолжают уменьшаться. В этой связи возрастает требование к чистоте материала, т. к. вклад примесей в электрическое сопротивление будет существенным. В полупроводниковом проводе оказалась отрицательно заряженная примесь (величина заряда q равна заряду электрона). Она расположена на центральной оси цилиндрического провода, имеющего диаметр $d = 50$ нм.

1. Определите, в каком случае проекция силы взаимодействия на направление скорости (см. рис.) будет больше: при $a = d$ или при $a = d/2$. **(3 балла)**
2. Найдите, на каком расстоянии от примеси a свободный электрон, двигаясь по поверхности провода, будет испытывать максимальную силу отталкивания (проекция силы взаимодействия на направление скорости). **(5 баллов)**



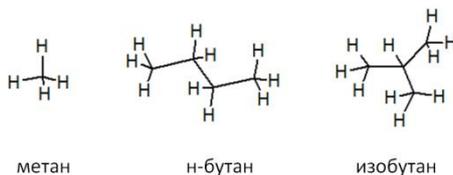
Всего – 8 баллов

Задача 4. Конденсация алканов

Известно, что конденсация газов в порах нанометрового размера происходит при более низком давлении, чем над плоской поверхностью. Соотношение, связывающее давление конденсации и радиус поры, называется уравнением Томсона-Кельвина:

$$\frac{RT}{V_m} \cdot \ln\left(\frac{P_c}{P_0}\right) = -\frac{2\sigma \cdot \cos\theta}{r}$$

где P_c – давление конденсации (Па), P_0 – давление насыщенных паров над плоской поверхностью (Па), R – универсальная газовая постоянная (8,314 Дж/(моль·К)), T – температура (К), V_m – молярный объём конденсата (м³/моль), σ – поверхностное натяжение конденсата (Н/м), θ – угол смачивания, r – радиус поры (м).



Предельные углеводороды, начиная с C₄H₁₀, легко конденсируются уже при комнатной температуре. Во сколько раз уменьшится давление конденсации *n*-бутана в порах диаметром 30 нм по сравнению с давлением насыщенных паров над плоской поверхностью? Температура 27 °С, молярная масса *n*-бутана 0,058 кг/моль, поверхностное натяжение 11,3·10⁻³ Н/м, угол смачивания 0, плотность конденсата 601,26 кг/м³.

Всего – 8 баллов

Задача 5. Нанотехнологии для косметологии

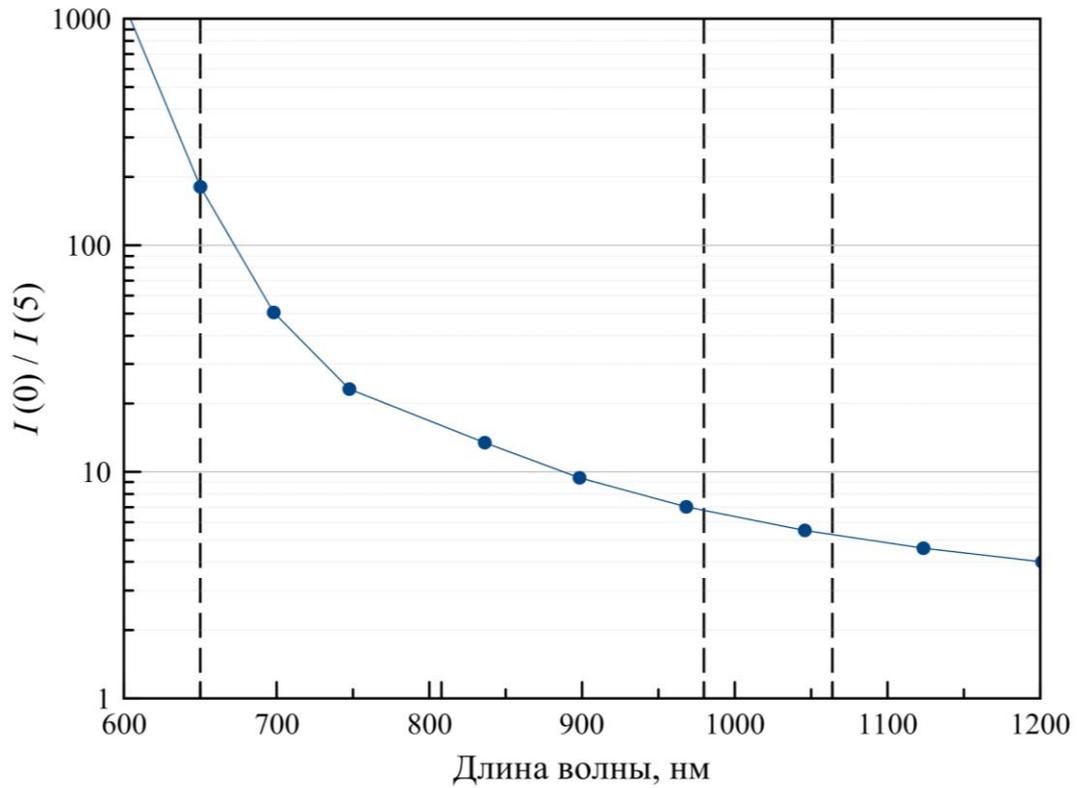
Лазерные технологии давно успешно используются в медицине и косметологии. В последнее время нанотехнологии получают применение в этих сферах.

Для повышения эффективности лазерной эпиляции на поверхность кожи наносят карбоновый гель, в состав которого входят наночастицы углерода. Излишки геля удаляют с поверхности кожи салфеткой, после чего медицинским лазером производится процедура удаления волосяных корней (фолликул) путем локального нагрева.

1. Поясните, какова роль наночастиц углерода в данной процедуре. **(2 балла)**

На рисунке представлена зависимость ослабления интенсивности излучения, проникающего в кожные покровы на глубину 5 мм, от длины волны.

2. Используя рисунок и характеристики перечисленных ниже лазеров, определите, какой из них следует использовать для удаления волосяных фолликул, расположенных на глубине 5 мм от поверхности кожи. Предпочтительным является лазер у которого максимальна суммарная энергия за 1 с, достигшая глубины 5 мм. **(6 баллов)**



- 1) Импульсный лазер с длиной волны $\lambda = 1064$ нм, интенсивностью в импульсе $I = 10$ Дж/см², длительностью импульса $\tau = 5$ нс, частотой следования импульсов $f = 10$ Гц. Площадь сфокусированного пятна $S = 10$ мм².
- 2) Непрерывный лазер с длиной волны $\lambda = 980$ нм, мощность $P = 30$ мВт.
- 3) Непрерывный лазер с длиной волны $\lambda = 650$ нм, мощность $P = 100$ мВт.

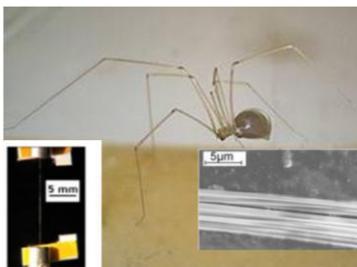
Всего – 8 баллов



**Физика для школьников 7 – 11 класса (очный тур)
 Простые задачи (вариант 2)**

Задача 1. Сверхпрочная паутина

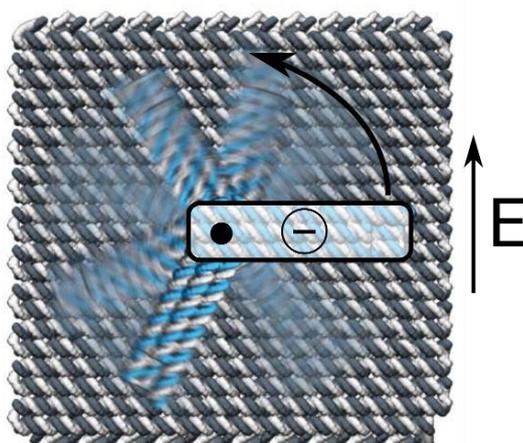
В результате эксперимента с пауками, спрыснутыми содержащей углеродные нанотрубки водой, учеными была получена уникальная сверхпрочная паутина с модулем Юнга в 16 раз большим, чем у обычной паутины.



1. На сколько миллиметров будут различаться удлинение одной нити такой усиленной углеродными нанотрубками паутины Δl_{CNT} по сравнению с удлинением нити обычной паутины, равном $\Delta l_o = 4$ мм, если к этим нитям прикладывать одну и ту же растягивающую силу? **(3 балла)** Что при этом будет больше: Δl_{CNT} или Δl_o ? **(1 балл)**. При расчетах полагать, что исходная длина обеих нитей была одинаковой, а их диаметр был постоянным и составлял 5 мкм.
2. Какова максимальная масса груза, который сможет выдержать исследуемая усиленная углеродными нанотрубками нить, если ее предел прочности составляет $\sigma_0 = 2.5$ ГПа? **(4 балла)**

Всего – 8 баллов

Задача 2. Ротор из ДНК

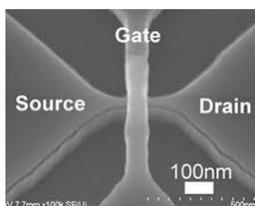


Наномотор, приводимый в движение внешним однородным электрическим полем, имеет в составе заряженную молекулу ДНК. Она играет роль ротора, закрепленного левым концом на полимерной подложке. Внешнее поле перпендикулярно ротору.

1. Считая, что напряженность внешнего поля $E = 1$ В/м, заряд молекулы ДНК $q = -1,28 \cdot 10^{-17}$ Кл и сосредоточен в середине молекулы, а момент электрической силы, действующий на ротор относительно левого края, $M = 8 \cdot 10^{-25}$ Н·м, найдите длину ротора из ДНК l . (3 балла)
2. Какая сила возникнет у левого края, если в точке, отстоящей на $1/3$ длины молекулы от правого края, она будет удерживаться силой, направленной вдоль поля, так что молекула остается неподвижной? (5 баллов)

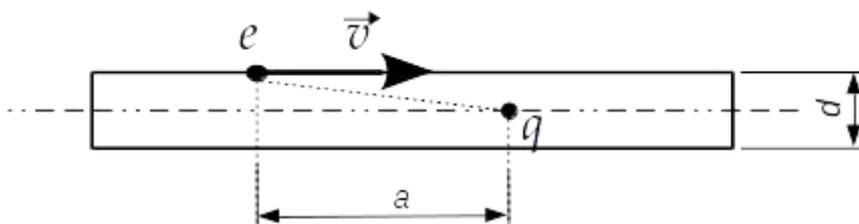
Всего – 8 баллов

Задача 3. Примесь в нанопроводе



Характерные размеры транзисторов и подводящих проводов в современных процессорах продолжают уменьшаться. В этой связи возрастает требование к чистоте материала, т. к. вклад примесей в электрическое сопротивление будет существенным. В полупроводниковом проводе оказалась отрицательно заряженная примесь (величина заряда q равна заряду электрона). Она расположена на центральной оси цилиндрического провода, имеющего диаметр $d = 50$ нм.

1. Определите, в каком случае проекция силы взаимодействия на направление скорости будет больше: при $a = d/2$ или при $a = d/4$. (3 балла)
2. Найдите, на каком расстоянии от примеси a свободный электрон, двигаясь по поверхности провода, будет испытывать максимальную силу отталкивания (проекция силы взаимодействия на направление скорости). (5 баллов)



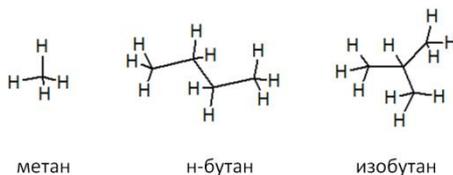
Всего – 8 баллов

Задача 4. Конденсация алканов

Конденсация газов в порах нанометрового размера происходит при более низком давлении, чем над плоской поверхностью. Соотношение, связывающее давление конденсации и радиус поры, называется уравнением Томсона-Кельвина:

$$\frac{RT}{V_m} \cdot \ln\left(\frac{P_c}{P_0}\right) = -\frac{2\sigma \cdot \cos \theta}{r}$$

где P_c – давление конденсации (Па), P_0 – давление насыщенных паров над плоской поверхностью (Па), R – универсальная газовая постоянная (8,314 Дж/(моль·К)), T – температура (К), V_m – молярный объём конденсата (м³/моль), σ – поверхностное натяжение конденсата (Н/м), θ – угол смачивания, r – радиус поры (м).



Предельные углеводороды, начиная с C_4H_{10} , легко конденсируются уже при комнатной температуре. Во сколько раз уменьшится давление конденсации н-бутана в порах диаметром 20 нм по сравнению с давлением насыщенных паров над плоской поверхностью? Температура 27 °С, молярная масса н-бутана 0,058 кг/моль, поверхностное натяжение $11.3 \cdot 10^{-3}$ Н/м, угол смачивания 0 рад, плотность конденсата 601,26 кг/м³.

Всего – 8 баллов

Задача 5. Нанотехнологии для косметологии

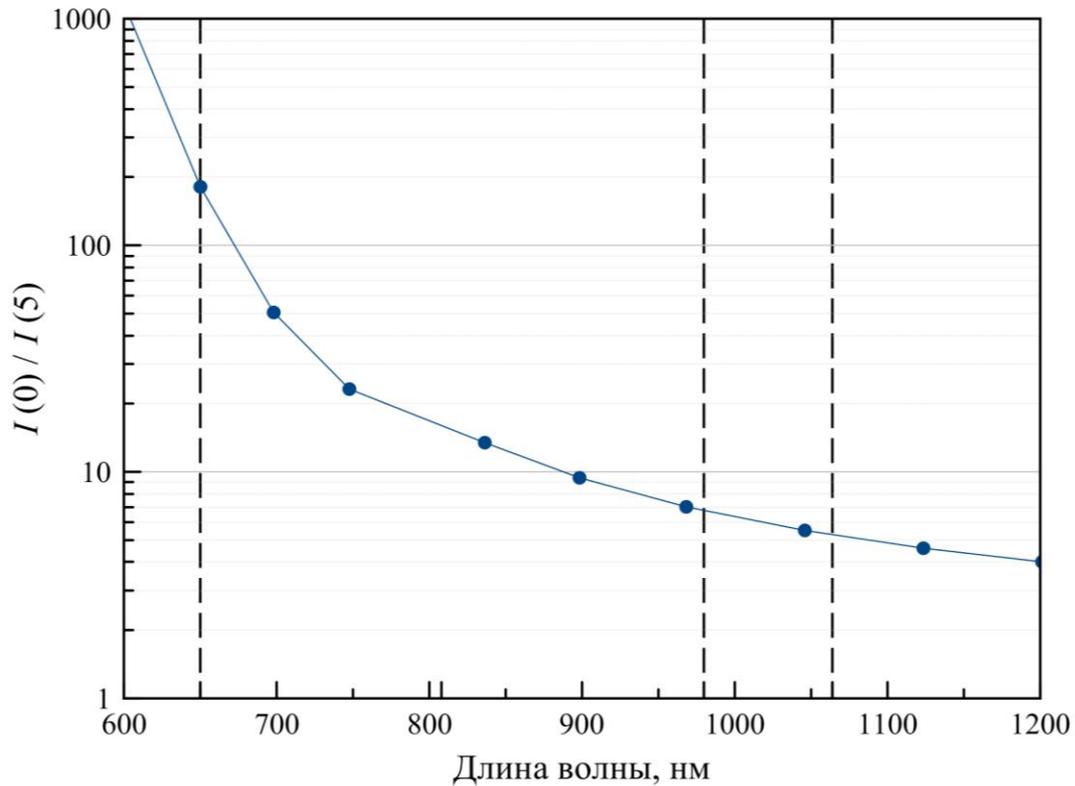
Лазерные технологии давно успешно используются в медицине и косметологии. В последнее время нанотехнологии получают применение в этих сферах.

Для повышения эффективности лазерной эпиляции на поверхность кожи наносят карбоновый гель, в состав которого входят наночастицы углерода. Излишки геля удаляют с поверхности кожи салфеткой, после чего медицинским лазером производится процедура удаления волосяных корней (фолликул) путем локального нагрева.

1. Поясните, какова роль наночастиц углерода в данной процедуре. **(2 балла)**

На рисунке представлена зависимость ослабления интенсивности излучения, проникающего в кожные покровы на глубину 5 мм, от длины волны.

2. Используя рисунок и характеристики перечисленных ниже лазеров, определите, какой из них следует использовать для удаления волосяных фолликул, расположенных на глубине 5 мм от поверхности кожи. Предпочтительным является лазер у которого максимальна суммарная энергия за 1 с, достигшая глубины 5 мм. **(6 баллов)**



- 1) Импульсный лазер с длиной волны $\lambda = 808$ нм, интенсивностью в импульсе $I = 100$ Дж/см², длительностью импульса $\tau = 10$ мс, частотой следования импульсов $f = 10$ Гц. Площадь сфокусированного пятна $S = 20$ мм².
- 2) Импульсный лазер с длиной волны $\lambda = 1064$ нм, интенсивностью в импульсе $I = 10$ Дж/см², длительностью импульса $\tau = 5$ нс, частотой следования импульсов $f = 10$ Гц. Площадь сфокусированного пятна $S = 10$ мм².
- 3) Непрерывный лазер с длиной волны $\lambda = 980$ нм, мощность $P = 30$ мВт.

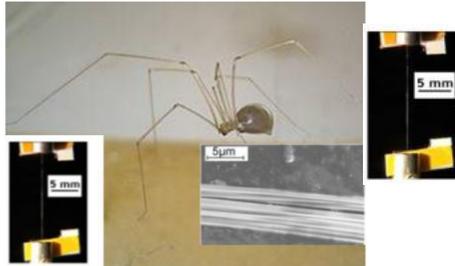
Всего – 8 баллов



**Физика для школьников 7 – 11 класса (очный тур)
 Простые задачи (вариант 3)**

Задача 1. Сверхпрочная паутина

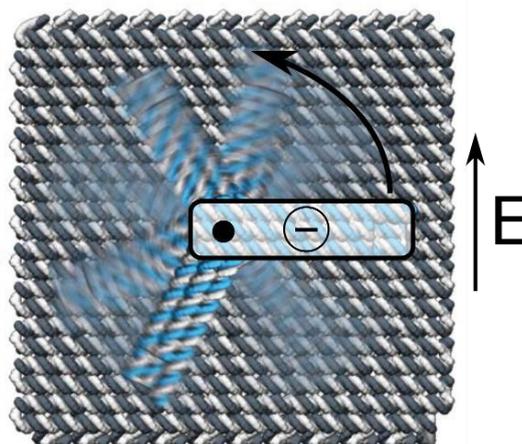
В результате эксперимента с пауками, спрыснутыми содержащей углеродные нанотрубки водой, учеными была получена уникальная сверхпрочная паутина с модулем Юнга в 18 раз большим, чем у обычной паутины.



1. На сколько миллиметров будут различаться удлинение одной нити такой усиленной углеродными нанотрубками паутины Δl_{CNT} по сравнению с удлинением нити обычной паутины, равном $\Delta l_0 = 3.5$ мм, если к этим нитям прикладывать одну и ту же растягивающую силу? **(3 балла)** Что при этом будет больше: Δl_{CNT} или Δl_0 ? **(1 балл)** При расчетах полагать, что исходная длина обеих нитей была одинаковой, а их диаметр был постоянным и составлял 6 мкм.
2. Какова максимальная масса груза, который сможет выдержать исследуемая усиленная углеродными нанотрубками нить, если ее предел прочности составляет $\sigma_0 = 2.2$ ГПа? **(4 балла)**

Всего – 8 баллов

Задача 2. Ротор из ДНК

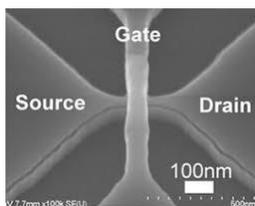


Наномотор, приводимый в движение внешним однородным электрическим полем, основан на заряженной молекуле ДНК. Она играет роль ротора, закрепленного левым концом на полимерной подложке. Внешнее поле перпендикулярно ротору.

1. Считая, что напряженность внешнего поля равна $E = 1$ В/м, а заряд молекулы ДНК $q = -1,28 \cdot 10^{-17}$ Кл и сосредоточен в ее середине, рассчитайте момент сил, действующий на ротор из ДНК длиной $l = 30$ нм. **(3 балла)**
2. Какая сила возникнет у левого края, если в точке, отстоящей на $1/3$ длины молекулы от правого края, она будет удерживаться силой, направленной вдоль поля, так что молекула остается неподвижной? **(5 баллов)**

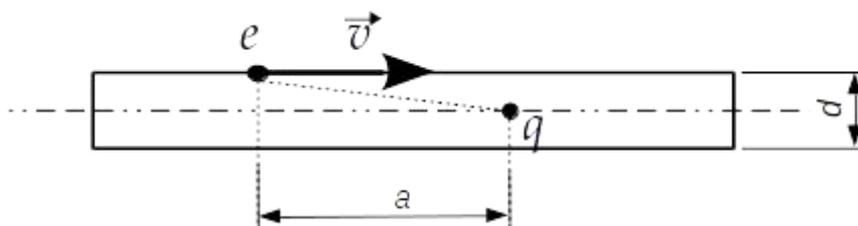
Всего – 8 баллов

Задача 3. Примесь в нанопроводе



Характерные размеры транзисторов и подводящих проводов в современных процессорах продолжают уменьшаться. В этой связи возрастает требование к чистоте материала, т. к. вклад примесей в электрическое сопротивление будет существенным. В полупроводниковом проводе оказалась отрицательно заряженная примесь (величина заряда q равна заряду электрона). Она расположена на центральной оси цилиндрического провода, имеющего диаметр $d = 50$ нм.

1. Определите, в каком случае проекция силы взаимодействия на направление скорости будет больше: при $a = d$ или при $a = d/4$. **(3 балла)**
2. Найдите, на каком расстоянии от примеси a свободный электрон, двигаясь по поверхности провода, будет испытывать максимальную силу отталкивания (проекция силы взаимодействия на направление скорости). **(5 баллов)**



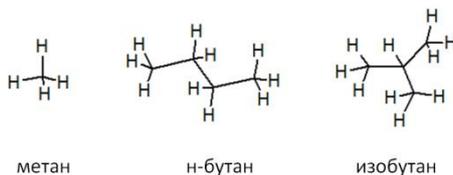
Всего – 8 баллов

Задача 4. Конденсация алканов

Конденсация газов в порах нанометрового размера происходит при более низком давлении, чем над плоской поверхностью. Соотношение, связывающее давление конденсации и радиус поры, называется уравнением Томсона-Кельвина:

$$\frac{RT}{V_m} \cdot \ln\left(\frac{P_c}{P_0}\right) = -\frac{2\sigma \cdot \cos\theta}{r}$$

где P_c – давление конденсации (Па), P_0 – давление насыщенных паров над плоской поверхностью (Па), R – универсальная газовая постоянная (8,314 Дж/(моль·К)), T – температура (К), V_m – молярный объём конденсата (м³/моль), σ – поверхностное натяжение конденсата (Н/м), θ – угол смачивания, r – радиус поры (м).



Предельные углеводороды, начиная с C₄H₁₀, легко конденсируются уже при комнатной температуре. Определите диаметр пор, при котором давление конденсации *n*-бутана оказывается в 1,15 раза меньше, чем давление насыщенных паров над плоской поверхностью при температуре 27°C. Молярная масса *n*-бутана 0,058 кг/моль, поверхностное натяжение 11,3·10⁻³ Н/м, угол смачивания 0, плотность конденсата 601,26 кг/м³.

Всего – 8 баллов

Задача 5. Нанотехнологии для косметологии

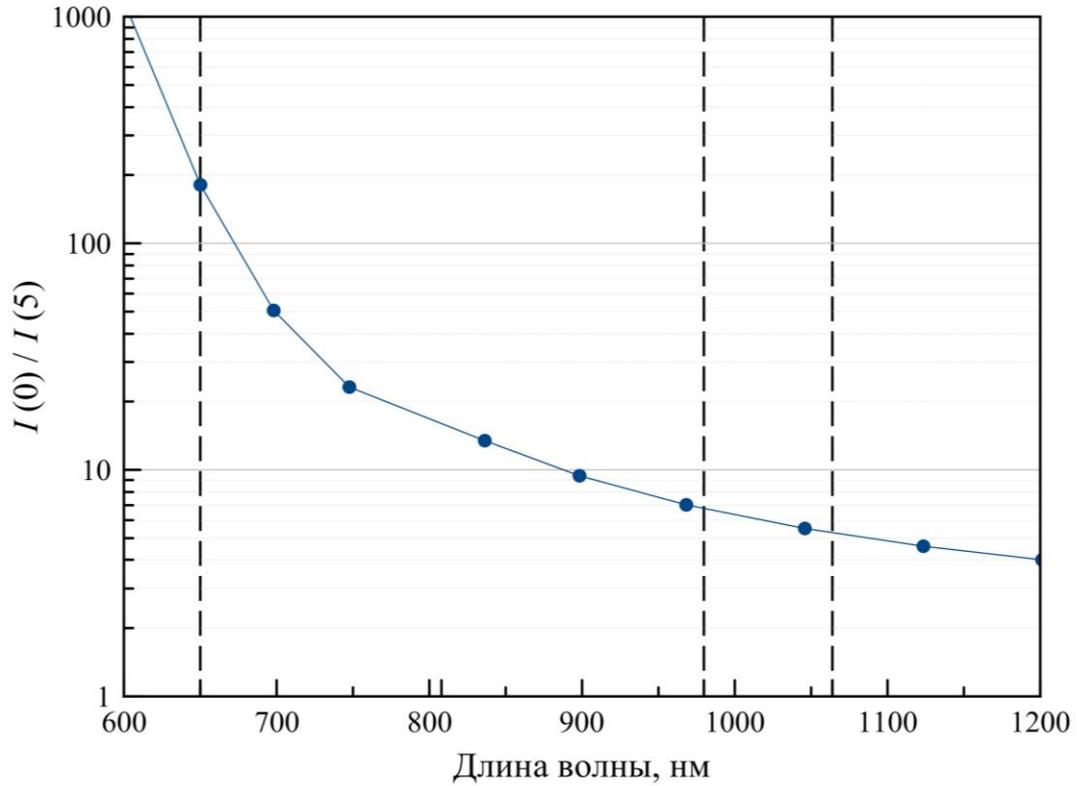
Лазерные технологии давно успешно используются в медицине и косметологии. В последнее время нанотехнологии получают применение в этих сферах.

Для повышения эффективности лазерной эпиляции на поверхность кожи наносят карбоновый гель, в состав которого входят наночастицы углерода. Излишки геля удаляют с поверхности кожи салфеткой, после чего медицинским лазером производится процедура удаления волосяных корней (фолликул) путем локального нагрева.

1. Поясните, какова роль наночастиц углерода в данной процедуре. **(2 балла)**

На рисунке представлена зависимость ослабления интенсивности излучения, проникающего в кожные покровы на глубину 5 мм, от длины волны.

2. Используя рисунок и характеристики перечисленных ниже лазеров, определите, какой из них следует использовать для удаления волосяных фолликул, расположенных на глубине 5 мм от поверхности кожи. Предпочтительным является лазер у которого максимальна суммарная энергия за 1 с, достигшая глубины 5 мм. **(6 баллов)**



- 1) Импульсный лазер с длиной волны $\lambda = 1064$ нм, интенсивностью в импульсе $I = 10$ Дж/см², длительностью импульса $\tau = 5$ нс, частотой следования импульсов $f = 10$ Гц. Площадь сфокусированного пятна $S = 10$ мм².
- 2) Непрерывный лазер с длиной волны $\lambda = 980$ нм, мощность $P = 30$ мВт.
- 3) Непрерывный лазер с длиной волны $\lambda = 650$ нм, мощность $P = 100$ мВт.

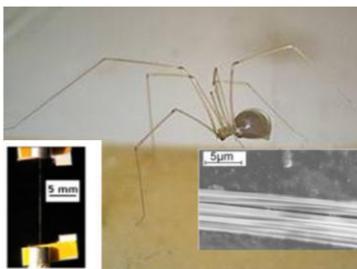
Всего – 8 баллов



**Физика для школьников 7 – 11 класса (очный тур)
 Простые задачи (вариант 4)**

Задача 1. Сверхпрочная паутина

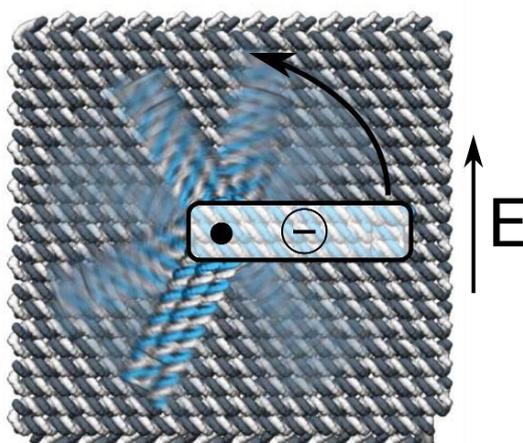
В результате эксперимента с пауками, спрыснутыми содержащей углеродные нанотрубки водой, учеными была получена уникальная сверхпрочная паутина с модулем Юнга в 17 раз большим, чем у обычной паутины.



1. На сколько миллиметров будут различаться удлинение одной нити такой усиленной углеродными нанотрубками паутины Δl_{CNT} по сравнению с удлинением нити обычной паутины, равном $\Delta l_0 = 5$ мм, если к этим нитям прикладывать одну и ту же растягивающую силу? **(3 балла)** Что при этом будет больше: Δl_{CNT} или Δl_0 ? **(1 балл)** При расчетах полагать, что исходная длина обеих нитей была одинаковой, а их диаметр был постоянным и составлял 5.5 мкм.
2. Какова максимальная масса груза, который сможет выдержать исследуемая усиленная углеродными нанотрубками нить, если ее предел прочности составляет $\sigma_0 = 2.1$ ГПа? **(4 балла)**

Всего – 8 баллов

Задача 2. Ротор из ДНК



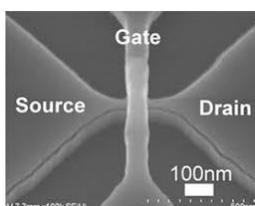
Ученые из Мюнхена изобрели новый тип наномотора: его ротор состоит из молекулы ДНК, закрепленной на полимерной подложке. Для поворота наномотора они приложили

однородное электрическое поле, направленное перпендикулярно ротору. Левый край молекулы прикреплен к поверхности платформы.

1. Найдите момент сил M относительно левого края, действующий на ротор из ДНК длиной $l = 30$ нм, если напряженность внешнего поля $E = 1$ В/м, а заряд молекулы ДНК $q = -1,44 \cdot 10^{-17}$ Кл и сосредоточен в середине молекулы. **(3 балла)**
2. Какая сила возникнет у левого края, если в точке, отстоящей на $1/6$ длины молекулы от правого края, она будет удерживаться силой, направленной вдоль поля, так что молекула остается неподвижной?

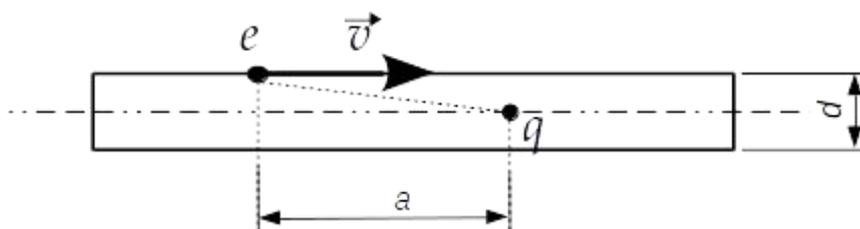
Всего – 8 баллов

Задача 3. Примесь в нанопроводе



Характерные размеры транзисторов и подводящих проводов в современных процессорах продолжают уменьшаться. В этой связи возрастает требование к чистоте материала, т. к. вклад примесей в электрическое сопротивление будет существенным. В полупроводниковом проводе оказалась отрицательно заряженная примесь (величина заряда q равна заряду электрона). Она расположена на центральной оси цилиндрического провода, имеющего диаметр $d = 50$ нм.

1. Определите, в каком случае проекция силы взаимодействия на направление скорости будет больше: при $a = 2d$ или при $a = d/2$. **(3 балла)**
2. Найдите, на каком расстоянии от примеси a свободный электрон, двигаясь по поверхности провода, будет испытывать максимальную силу отталкивания (проекция силы взаимодействия на направление скорости). **(5 баллов)**



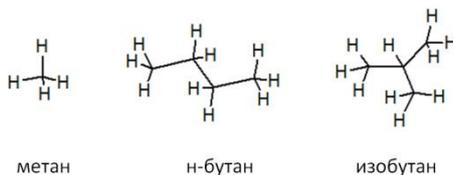
Всего – 8 баллов

Задача 4. Конденсация алканов

Известно, что конденсация газов в порах нанометрового размера происходит при более низком давлении, чем над плоской поверхностью. Соотношение, связывающее давление конденсации и радиус поры, называется уравнением Томсона-Кельвина:

$$\frac{RT}{V_m} \cdot \ln\left(\frac{P_c}{P_0}\right) = -\frac{2\sigma \cdot \cos\theta}{r}$$

где P_c – давление конденсации (Па), P_0 – давление насыщенных паров над плоской поверхностью (Па), R – универсальная газовая постоянная (8,314 Дж/(моль·К)), T – температура (К), V_m – молярный объём конденсата (м³/моль), σ – поверхностное натяжение конденсата (Н/м), θ – угол смачивания, r – радиус поры (м).



Предельные углеводороды, начиная с C₄H₁₀, легко конденсируются уже при комнатной температуре. Определите диаметр пор, при котором давление конденсации *n*-бутана оказывается в 1,25 раз меньше, чем давление насыщенных паров над плоской поверхностью при температуре 27 °С. Молярная масса *n*-бутана 0,058 кг/моль, поверхностное натяжение 11,3·10⁻³ Н/м, угол смачивания 0, плотность конденсата 601,26 кг/м³.

Всего – 8 баллов

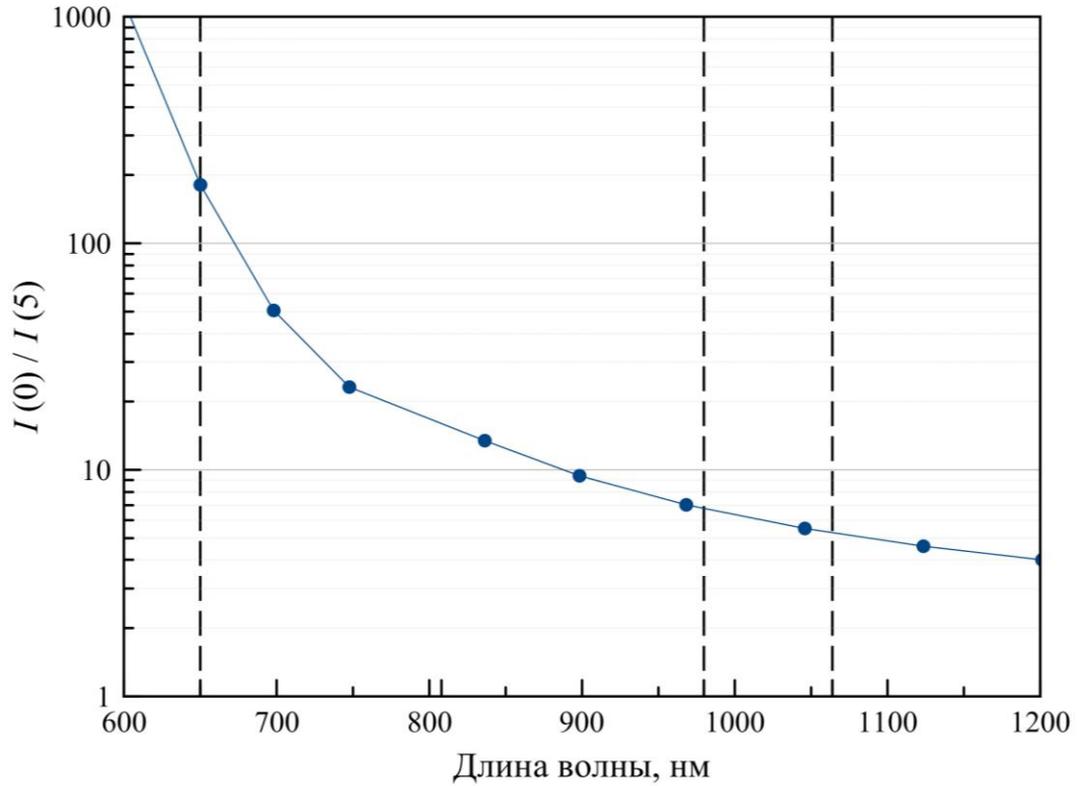
Задача 5. Нанотехнологии для косметологии

В медицине и косметологии часто применяются лазеры для эффективного и локального нагрева разных по глубине кровеносных сосудов или волосяных фолликул. Для повышения эффективности лазерной эпиляции на поверхность кожи наносят карбоновый гель, в состав которого входят наночастицы углерода. Излишки геля удаляют с поверхности кожи салфеткой, после чего медицинским лазером производится процедура удаления волосяных фолликул.

1. Поясните, какова роль наночастиц углерода в данной процедуре. **(2 балла)**

На рисунке представлена зависимость ослабления интенсивности излучения, проникающего в кожные покровы на глубину 5 мм, от длины волны.

2. Используя рисунок и характеристики перечисленных ниже лазеров, определите, какой из них следует использовать для удаления волосяных фолликул, расположенных на глубине 5 мм от поверхности кожи. Предпочтительным является лазер, у которого максимальна суммарная энергия за 1 с, достигшая глубины 5 мм. **(6 баллов)**



- 1) Импульсный лазер с длиной волны $\lambda = 808$ нм, интенсивностью в импульсе $I = 100$ Дж/см², длительностью импульса $\tau = 10$ мс, частотой следования импульсов $f = 10$ Гц. Площадь сфокусированного пятна $S = 20$ мм².
- 2) Импульсный лазер с длиной волны $\lambda = 1064$ нм, интенсивностью в импульсе $I = 10$ Дж/см², длительностью импульса $\tau = 5$ нс, частотой следования импульсов $f = 10$ Гц. Площадь сфокусированного пятна $S = 10$ мм².
- 3) Непрерывный лазер с длиной волны $\lambda = 980$ нм, мощность $P = 30$ мВт.

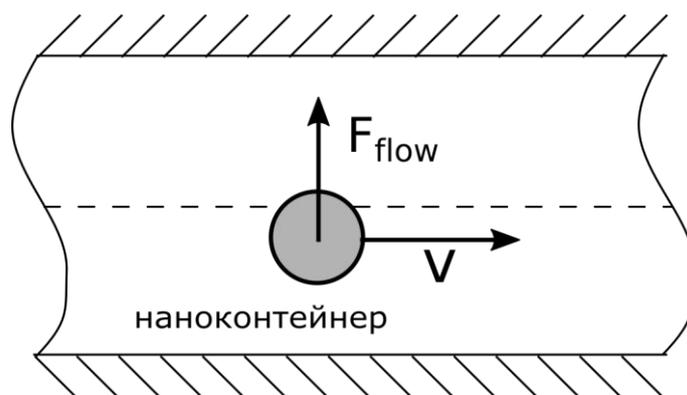
Всего – 8 баллов



**Физика для школьников 7 – 11 класса (очный тур)
 Более сложные задачи**

Задача 6. Наноконтейнер в кровотоке

Для усиления действия противораковых лекарств их помещают в наноконтейнеры, которые с помощью инъекций вводят в кровоток пациента. Как правило, наноконтейнеры вводят в вены, где скорость потока составляет $v_v = 20$ см/с, и легко им увлекаются. Затем они попадают в узкие капилляры, в том числе, и внутри раковой опухоли, где скорость движения потока, v_{cap} , уменьшается, поэтому наноконтейнеры “выпадают” из потока, накапливаясь на стенках сосудов. После этого лекарство освобождается в опухоли, уничтожая ее.



Примем, что кровеносная система человека содержит 25 параллельных венозных сосудов диаметром 0,5 см каждый, а также 500 млрд. параллельных капилляров диаметром 10 мкм. При отклонении траектории наноконтейнера от центра сосуда (показан пунктиром) на нее действует возвращающая подъемная сила достигающая $F_{flow} = 0,2 \rho v^2 S$, где ρ – плотность крови, v – скорость потока, а S – площадь вертикальной проекции наночастицы. Найдите диапазон размеров наноконтейнеров, при котором они осаждаются на стенках капилляров, не оседая в венах и артериях. Плотность частицы принять за $1,5$ г/см³, плотность крови равной плотности воды.

Всего – 20 баллов

Задача 7. Лазерное позиционирование наночастиц

Наночастицы могут быть захвачены в так называемые оптические ловушки – области жестко сфокусированного лазерного излучения. При смещении захваченного объекта из центра ловушки на него начинает действовать возвращающая сила – сила оптического захвата (принцип оптического пинцета).

Недавно был предложен способ прецизионного осаждения золотых наночастиц из коллоидного раствора на подложку, основанный на принципе оптического пинцета. Для предотвращения спонтанного осаждения наночастиц их, как и поверхность подложки, покрывают слоем положительно заряженных молекул, создавая, таким образом, отталкивающую силу F_{el} , величина которой зависит от степени удаления наночастиц от подложки. На малых расстояниях на наночастицы начинает действовать сила притяжения Ван-дер-Ваальса (F_{vdw}) со стороны подложки (см. рис. 1). Для контролируемого осаждения наночастиц их необходимо захватить в оптическую ловушку, для чего фокус лазерного пучка

помещают ниже поверхности подложки. Совершающие броуновское движение наночастицы, попадая в лазерный пучок, движутся по направлению к его фокусу за счет силы оптического захвата (см. рис. 2). При достаточной мощности лазера наночастицы преодолевают потенциальный барьер, образуемый при сложении сил F_{el} и F_{VdW} .

Учитывая, что сила оптического захвата F_{opt} прямо пропорциональна мощности лазера и удалению наночастицы от точки фокуса с коэффициентом пропорциональности $k = 3.75 \cdot 10^{-2}$ Н/(Вт·м), определите минимальную мощность лазера P_{min} , достаточную для контролируемого осаждения наночастиц, находящихся вблизи от подложки, если известно, что точка фокуса располагается на $z_{foc} = 29$ нм ниже поверхности подложки. При расчетах полагать, что вдали от подложки наночастицы находятся в коллоидном растворе в равновесии, а максимальное значение результирующей силы, действующей на наночастицы в отсутствие лазерного пучка, $F_{summ}^{max} = 12$ пН достигается при расстоянии между наночастицами и подложкой равном $z_{min} = 3$ нм (см. рис. 1). Ускорением движущихся наночастиц, попавших в лазерный пучок, пренебречь.

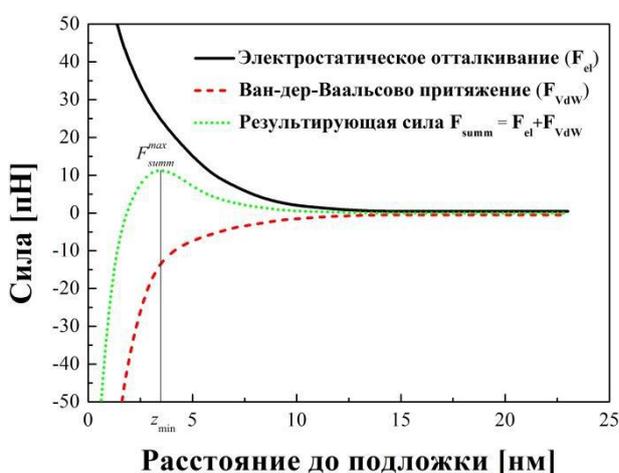


Рис. 1

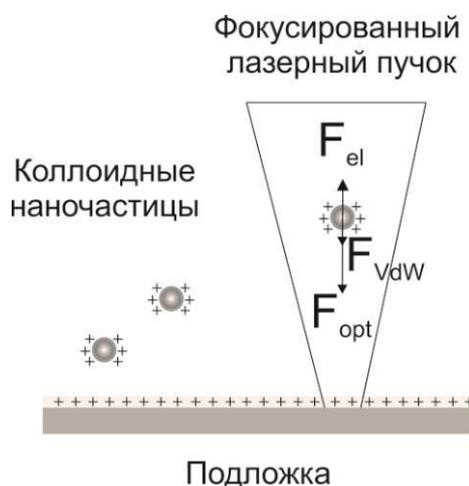


Рис. 2

Всего – 20 баллов

Задача 8. Эпитаксия

Эпитаксия – явление ориентированного роста одного кристалла на поверхности другого. В идеальном случае кристаллическая решётка растущего кристалла продолжает структуру подложки. Однако в большинстве случаев параметры элементарных ячеек плёнки и подложки незначительно различаются. В результате растущий кристалл оказывается в напряжённом состоянии, а параметры ячейки – искажёнными относительно ненапряжённого образца. Например, можно эпитаксиально вырастить тонкие плёнки Nd_2NiMnO_6 на поверхности монокристалла перовскита (длина ребра кубической элементарной ячейки $a = 3.905 \text{ \AA}$). Согласно результатам рентгеновской дифракции (длина волны излучения $\lambda = 1.54 \text{ \AA}$), пики (дифракционные максимумы), которые соответствуют направлению, перпендикулярному плоскости плёнки, смещаются в сторону больших углов по сравнению с пиками от объёмного монокристалла того же состава. При этом уменьшение толщины плёнки приводит к более сильному смещению пика (таблица).

Таблица. Положение первого дифракционного максимума для образцов $\text{Nd}_2\text{NiMnO}_6$ различной толщины.

Толщина плёнки, нм	Положение первого дифракционного максимума, градусы
60	11.7000
180	11.6135
300	11.5920
Объёмный монокристалл	11.5765

- Исходя из приведённых данных, определите параметры элементарной ячейки $\text{Nd}_2\text{NiMnO}_6$ для случаев объёмного монокристалла и тонких плёнок с толщиной 60 нм, 180 нм и 300 нм. Известно, что объёмный монокристалл данного соединения имеет кубическую структуру (как и перовскит), а подложка ориентирована так, чтобы определяемое межплоскостное расстояние совпадало с параметром ячейки. В расчётах следует учесть, что параметры ячейки, параллельные плоскости подложки, также будут искажаться для лучшего соответствия параметрам подложки и сохранения объёма элементарной ячейки. **(15 баллов)**
- Объясните зависимость параметров элементарной ячейки плёнок от их толщины. **(5 баллов)**

Для справки. Формула Брэгга-Вульфа для первого дифракционного максимума: $2d \cdot \sin\theta = \lambda$.

Всего – 20 баллов