

Указание: в некоторых задачах физика может выходить за рамки обычной школьной программы. Внимательно читать пояснения к тексту задачи.

1. Антидроновое ружье

Для предотвращения несанкционированного проникновения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в воздушное пространство над охраняемой территорией используют средства подавления, которые создают электромагнитные помехи на определенных частотах, блокируя радиообмен БПЛА с наземной станцией и спутниками навигационной системы. Мобильные носимые комплексы подавления называют антидроновыми ружьями. Антенна такого ружья формирует мощный поток радиоизлучения по некоторому направлению. На приемной антенне БПЛА складываются электромагнитные колебания, наведенные полезным радиосигналом от наземной станции, и бесполезный шум от антидронowego ружья. Когда отношение сигнал/шум достигает некоторого порогового значения, БПЛА перестает реагировать на управляющие сигналы, зависает на месте или падает.

Пусть БПЛА движется горизонтально со скоростью $v = 5$ м/с на высоте $H = 100$ м над плоской горизонтальной поверхностью земли, на которой расположены стрелок с антидроновым ружьем и наземная станция (рис. 1). Стрелок расположен на расстоянии $L_1 = 150$ м от БПЛА, а наземная станция — на расстоянии $L_2 = 1$ км. Наземная станция, стрелок и БПЛА находятся в данный момент в одной вертикальной плоскости. На рис. 1 показан вид сбоку, однако необходимо иметь в виду, что при виде сверху стрелок, наземная станция и БПЛА не обязательно все время находятся на одной прямой.

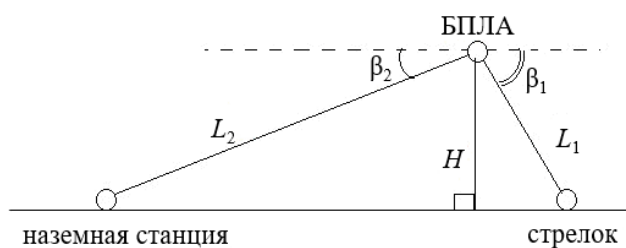


Рис. 1. Схема движения БПЛА

- 1) Определить минимальную угловую скорость Ω в данный момент, с которой может оказаться необходимо поворачивать ружье, следя за БПЛА при прицеливании.
- 2) Антидроновое ружье излучает мощность помех $P_1 = 10$ Вт на частоте модема БПЛА в конус с углом при вершине равным $\beta = 0,1$ рад (не показан на рис. 1). Наземная станция излучает сигнал управления мощностью $P_2 = 100$ Вт по всем направлениям в верхнюю полусферу. Пороговое отношение сигнал/шум по мощности на приемной антенне БПЛА равно $a = -10$ дБ. Считая, что антенна беспилотника принимает сигналы одинаково со всех направлений, и пренебрегая мощностью собственного шума в цепях управления, определить, сможет ли оператор в условиях задачи по-прежнему управлять БПЛА.

Примечание: в радиотехнике отношение мощностей $P_{10} < P_{20}$ принято выражать в децибелах по формуле

$$a = 20 \lg \frac{P_{20}}{P_{10}}.$$

А) При потере управления некоторые БПЛА начинают использовать другую приемную антенну. Ее чувствительность зависит от направления. Объяснить, как это может помочь восстановить управление.

Б) Можно ли выстрелом из антидроновой пушки остановить электросамолет? Ответ пояснить.

2. Правильная ориентация

Космический аппарат (КА) в виде тора массой $M_0 = 1$ т изначально стабилизирован (не вращается относительно своего центра масс). Его требуется развернуть на 180° вокруг главной оси вращения x , перпендикулярной плоскости тора, чтобы к моменту окончания разворота вращение было вновь погашено. Предусмотрены четыре блока двигателей ориентации, работающих на сжатом газе (рис. 2). Блоки удалены на $L = 3$ м от центра масс КА и расположены на внешних сторонах КА через равные отрезки дуг в плоскости тора (размерами блоков можно пренебречь по сравнению с L). В каждом блоке — по четыре взаимно перпендикулярных сопла, направленных попарно в противоположные стороны вдоль главных осей вращения аппарата (на двух блоках, расположенных диаметрально противоположно по оси z , сопла направлены вдоль осей x , y ; и еще на двух блоках, расположенных диаметрально противоположно по оси y , сопла направлены вдоль осей x , z). При включении любого двигателя через его сопло истекает $\mu = 0,01$ г/с газа со скоростью $v = 1000$ м/с относительно аппарата. При развороте в каждый момент времени одновременно задействовано два сопла (вдоль оси y или вдоль оси z) — по одному от двух диаметрально противоположных блоков, создающих максимальный момент вращения. Считать включение/выключение двигателя мгновенным. Считать толщину тора гораздо меньше его радиуса R , то есть $R = L$.

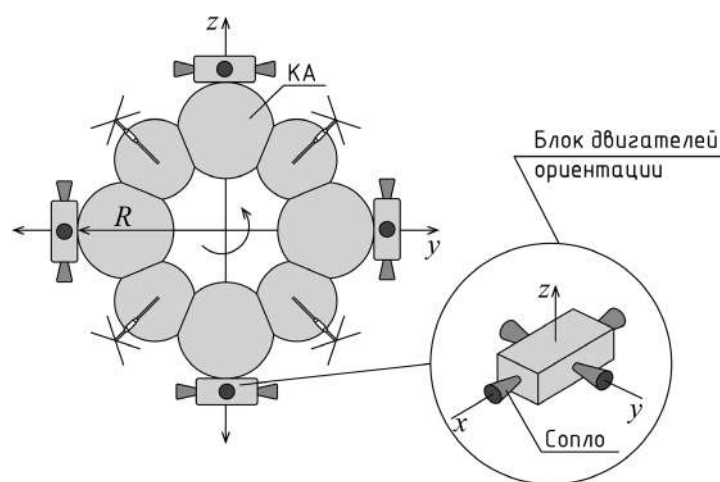


Рис. 2. Космический аппарат с четырьмя блоками двигателей ориентации

- 1) Определить время разворота на 180° .
- 2) Сколько рабочего тела (в граммах) требуется на разворот в п. 1?

А) Какими достоинствами и недостатками с инженерно-прикладной точки зрения обладает быстрый разворот по сравнению с медленным?

3. «Изгнание примесей из одержимого ими Германия токами святого Фуко»

Зонная плавка — это метод очистки твердых веществ, основанный на различной подвижности примесей в твердой и жидкой фазах (миграция примесей — это медленный диффузионный процесс). Метод зонной плавки используют для получения сверхчистого германия при локальном плавлении заготовки токами Фуко, возникающими в самой заготовке внутри индукционных катушек (рис. 3), то есть принцип разогрева заготовки напоминает принцип работы кухонной варочной индукционной панели. Заготовку 2-3-4-5 помещают в несмазываемую расплавом графитовую лодочку 6 и передвигают со скоростью v относительно катушки с током 1. Метод основан на том, что примеси практически не могут мигрировать из части заготовки 5 через расплавленную зону 2 в часть 3, аналогично — из части 3 в часть 4. Такие проходы с локальным плавлением повторяют несколько раз, все время только слева направо (на рис. 2 две катушки соответствуют двум проходам). Последний кусок заготовки 5 с собранными примесями впоследствии удаляется.

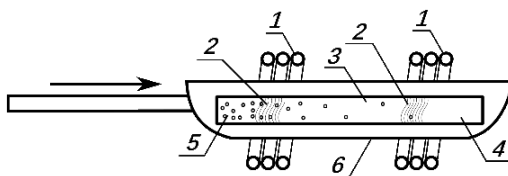


Рис. 3. Схема устройства для зонной плавки германия: индукционные катушки (1); расплавленные зоны (2); очищенный германий (3); сверхчистый германий (4); германий с повышенным содержанием примесей (5); графитовая лодочка (6)

1) Пусть заготовка из германия является тонкостенным цилиндром с внешним диаметром $D = 1$ см, толщиной стенок $h = 1$ мм. При комнатной температуре окружающей среды найти амплитуду минимально необходимого тока в катушке. Учесть, что скорость перемещения $v = 1$ см/час, длина локальной зоны расплава $L = 1$ см, параметры катушки: число витков $N = 100$, частота тока $f = 0,5$ МГц.

Примечание: катушку считать идеальным соленоидом, внутри которого образуется расплав; считать, что в силу плохой теплопроводности германия тепло от фронта кристаллизации практически не доходит до фронта плавления; цилиндрическая заготовка насажена на несмазываемый графитовый стержень, поэтому зона расплава за счет сил поверхностного натяжения сохраняет свою цилиндрическую форму; ниже приведены удельная теплота кристаллизации, плотность твердого тела/расплава, температура плавления, удельная теплоемкость, магнитная проницаемость и удельное сопротивление расплава германия: $\lambda = 509$ кДж/кг, $\rho = 5,3/5,6$ г/см³, $T = 938$ °С, $c = 0,32$ кДж/(кг·°С), $\mu = 1$ и $\rho_e = 0,004$ Ом·см.

2) Если в рамках постановки задачи в п. 1 учесть тепловые потери при зонной плавке, то потребная сила тока в индукционной катушке возрастет в три раза по сравнению с минимальной из п. 1 при прочих равных условиях. Найти мощность тепловых потерь.

А) Если увеличить мощность установки, то можно увеличить скорость плавления заготовки и сократить время ее прохода через катушку. Почему предпочитают медленное перемещение заготовки при малой мощности?

Б) При зонной плавке твердые части заготовки не сдвигаются друг относительно друга на графитовой лодочке. Больше или меньше площадь сечения расплава по сравнению с твердыми частями заготовки или такая же? Пояснить.

4. Пневматическая катапульта

Беспилотному летательному аппарату (БПЛА) самолетного типа начальная скорость может быть сообщена с помощью пневматической катапульти (рис. 4). В процессе запуска БПЛА ускоряется вдоль наклонной направляющей. Его ускоряет поршень, движущийся внутри полого цилиндра (ось цилиндра наклонена под тем же углом, что и направляющая). Вначале (когда БПЛА неподвижен) под закрепленным поршнем в небольшом объеме находится сжатый сухой воздух. Затем поршень освобождают, и он ускоряется совместно с жестко сцепленным с ним БПЛА, пока не столкнется с жесткой пружиной, закрепленной в верхней части цилиндра. При этом БПЛА расцепляется с поршнем и отправляется в свободный полет.



Рис. 4. БПЛА на пневматической катапульте

Пусть цилиндр без поршня открыт на атмосферу сверху и закрыт снизу. Внутренний диаметр цилиндра равен $D = 5$ см. В нижнем положении поршень находится на расстоянии $L_1 = 20$ см от дна, а в верхнем — на расстоянии $L_2 = 150$ см. Давление под поршнем в нижнем положении равно $p_1 = 25$ атм, а верхнем — p_2 . Масса поршня с БПЛА равна $M = 50$ кг. Угол наклона направляющей к горизонту равен $\alpha = 30^\circ$.

1) Найти давление p_2 в предположении об адиабатическом расширении газа под поршнем, когда применимо уравнение Пуассона $pV^{C_p/C_v} = \text{const}$.

2) Пренебрегая силами трения, определить КПД пневмокатапульти η с точностью до 1%.

Указание: катапульта совершает работу за счет внутренней энергии сжатого воздуха.

3) Пренебрегая силами трения, найти ускорение поршня с БПЛА во время их разгона катапультной сразу перед началом деформации жесткой пружины.

А) Как бы изменилась начальная скорость свободного полета БПЛА, если бы под поршнем оказался влажный воздух? Привести качественные обоснованные рассуждения.

5. Эффект памяти формы

Для раскрытия антенн космических аппаратов используют привод — проволоку из нитинола (никелида титана), материала с эффектом восстановления заданной формы при температуре $t \geq 130^\circ\text{C}$ (рис. 5). Эффект основан на фазовых (так называемых мартенситных) превращениях, при которых происходит перестройка кристаллической решетки вещества. После охлаждения до температуры ниже окончания прямых мартенситных превращений проволоку вытягивают (причем после снятия нагрузки сохраняется остаточное растяжение). Тогда при последующем нагреве (по окончании обратных мартенситных превращений) проволока самопроизвольно сокращается почти до исходной длины. Управляющим воздействием на активный элемент может быть нагрев солнечной радиацией или нагрев при пропускании электрического тока.

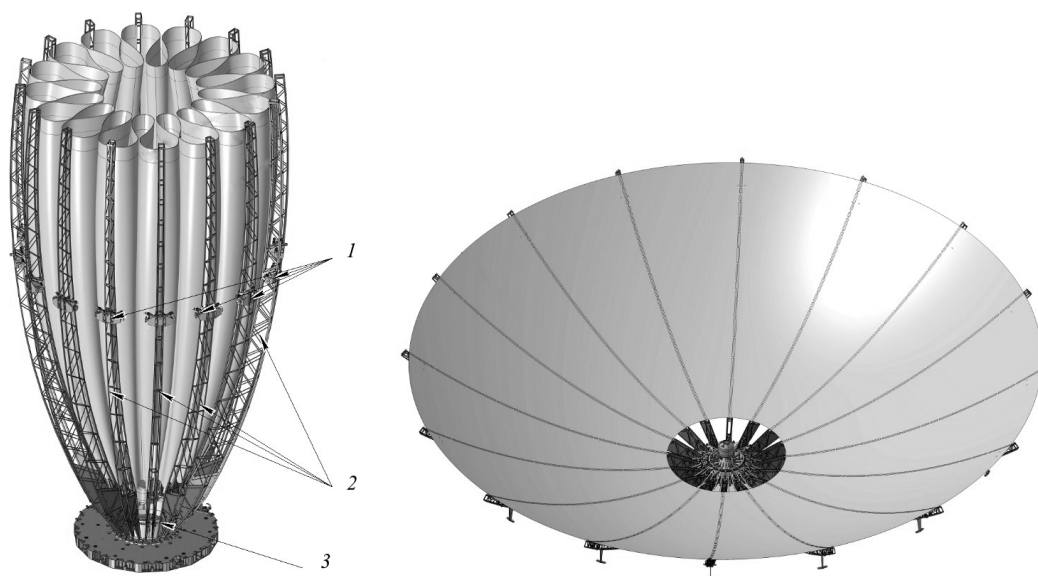


Рис. 5. Механизм раскрытия антенны: замки зачековки (1); спицы (2); механизм раскрытия с проволокой из нитинола (не видна на рисунке) (3)

1) Какой минимальный ток надо пропустить по холодной проволоке диаметром $d = 1,5$ мм, чтобы на темной стороне орбиты вокруг Земли начался процесс восстановления. Удельное сопротивление проволоки $\rho_R = 0,8$ мкОм·м, коэффициент черноты $\varepsilon = 0,66$.

2) Насколько можно уменьшить ток при переходе на солнечную сторону орбиты? Излучение падает перпендикулярно боковой поверхности проволоки, солнечная постоянная на орбите Земли равна $J_s = 1400$ Вт/м².

Температуру проволоки считать однородной по ее объему, сопротивление — независимым от температуры. Интенсивность излучения твердого тела подчиняется закону Стефана — Больцмана $J = \varepsilon \sigma T^4$ (СИ), где интенсивность J имеет размерность Вт/м², σ — постоянная Стефана — Больцмана (см. лист с константами), $\varepsilon < 1$ — безразмерная величина (для абсолютно черного тела $\varepsilon = 1$).

А) В чем преимущества привода на основе эффекта восстановления формы по сравнению, например, с обычной пружиной?

Б) Какие другие виды деформации, кроме фазовой деформации из-за эффекта восстановления формы, возможны в описанных действиях с проволокой из никелида титана?

Указание: в некоторых задачах физика может выходить за рамки обычной школьной программы. Внимательно читать пояснения к тексту задачи.

1. Антидроновое ружье

Для предотвращения несанкционированного проникновения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в воздушное пространство над охраняемой территорией используют средства подавления, которые создают электромагнитные помехи на определенных частотах, блокируя радиообмен БПЛА с наземной станцией и спутниками навигационной системы. Мобильные носимые комплексы подавления называют антидроновыми ружьями. Антенна такого ружья формирует мощный поток радиоизлучения по некоторому направлению. На приемной антенне БПЛА складываются электромагнитные колебания, наведенные полезным радиосигналом от наземной станции, и бесполезный шум от антидронowego ружья. Когда отношение сигнал/шум достигает некоторого порогового значения, БПЛА перестает реагировать на управляющие сигналы, зависает на месте или падает.

Пусть БПЛА движется горизонтально со скоростью $v = 5$ м/с на высоте $H = 50$ м над плоской горизонтальной поверхностью земли, на которой расположены стрелок с антидроновым ружьем и наземная станция (рис. 1). Стрелок расположен на расстоянии $L_1 = 200$ м от БПЛА, а наземная станция — на расстоянии $L_2 = 2$ км. На рис. 1 показан вид сбоку, однако необходимо иметь в виду, что при виде сверху стрелок, наземная станция и БПЛА не обязательно все время находятся на одной прямой.

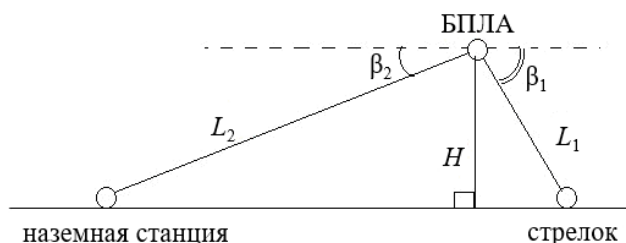


Рис. 1. Схема движения БПЛА

- 1) Определить максимальную угловую скорость ω в данный момент, с которой может оказаться необходимо поворачивать ружье, следя за БПЛА при прицеливании.
- 2) Антидроновое ружье излучает мощность помех $P_1 = 10$ Вт на частоте модема БПЛА в конус с углом при вершине равным $\beta = 0,1$ рад (не показан на рис. 1). Наземная станция излучает сигнал управления мощностью $P_2 = 100$ Вт по всем направлениям в верхнюю полусферу. Наземная станция, стрелок и БПЛА находятся в данный момент в одной вертикальной плоскости. Проведем через БПЛА горизонтальную прямую в данной плоскости. Считая, что чувствительность антенны беспилотника прямо пропорциональна квадрату синуса угла между этой прямой и направлением приема и пренебрегая мощностью собственного шума в цепях управления, определить отношение сигнал/шум по мощности на приемной антенне в данный момент. Выразить его в децибелах (дБ).

Примечание: в радиотехнике отношение мощностей $P_{10} < P_{20}$ принято выражать в децибелах по формуле

$$a = 20 \lg \frac{P_{20}}{P_{10}}.$$

А) Почему подавление более высоких частот (при прочих равных условиях) ружьем происходит более эффективно?

Б) Перечислить известные методы борьбы с БПЛА, помимо радиопомех.

2. Правильная ориентация

Космический аппарат (КА) в виде тора массой $M_0 = 1$ т изначально стабилизирован (не вращается относительно своего центра масс). Его требуется развернуть на 180° вокруг главной оси вращения x , перпендикулярной плоскости тора, чтобы к моменту окончания разворота вращение было вновь погашено. Предусмотрены четыре блока двигателей ориентации, работающих на сжатом газе (рис. 2). Блоки удалены на $L = 3$ м от центра масс КА и расположены на внешних сторонах КА через равные отрезки дуг в плоскости тора (размерами блоков можно пренебречь по сравнению с L). В каждом блоке — по четыре взаимно перпендикулярных сопла, направленных попарно в противоположные стороны вдоль главных осей вращения аппарата (на двух блоках, расположенных диаметрально противоположно по оси z , сопла направлены вдоль осей x, y ; и еще на двух блоках, расположенных диаметрально противоположно по оси y , сопла направлены вдоль осей x, z). При включении любого двигателя через его сопло истекает $\mu = 0,1$ г/с газа со скоростью $v = 100$ м/с относительно аппарата. Всего на такой разворот предусматривается $m = 10$ г газа. При развороте одновременно может быть задействовано только два сопла (вдоль оси y или вдоль оси z) — по одному от двух диаметрально противоположных блоков, создающих максимальный момент вращения. Считать толщину тора гораздо меньше его радиуса R , то есть $R = L$. Считать включение/выключение двигателя мгновенным.

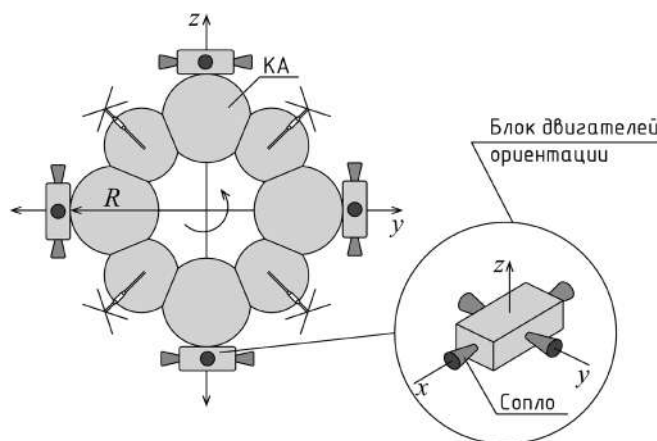


Рис. 2. Космический аппарат с четырьмя блоками двигателей ориентации

1) Определить время разворота на 180° .

2) Оценить давление газа в трубопроводе около сопла, если внутренний диаметр сопла равен 0,1 мм.

А) Какие технические достоинства и недостатки можно спрогнозировать, если разворот будет осуществляться при выносе блоков двигателей ориентации на штангах еще дальше от центра масс КА?

3. «Изгнание примесей из одержимого ими Германия токами святого Фуко»

Зонная плавка — это метод очистки твердых веществ, основанный на различной подвижности примесей в твердой и жидкой фазах (миграция примесей — это медленный диффузионный процесс). Метод зонной плавки используют для получения сверхчистого германия при локальном плавлении заготовки токами Фуко, возникающими в самой заготовке внутри индукционных катушек (рис. 3), то есть принцип разогрева заготовки напоминает принцип работы кухонной варочной индукционной панели. Заготовку 2-3-4-5 помещают в не смачиваемую расплавом графитовую лодочку 6 и передвигают со скоростью v относительно катушки с током 1. Метод основан на том, что примеси практически не могут мигрировать из части заготовки 5 через расплавленную зону 2 в часть 3, аналогично — из части 3 в часть 4. Такие проходы с локальным плавлением повторяют несколько раз, все время только слева направо (на рис. 2 две катушки соответствуют двум проходам). Последний кусок заготовки 5 с собранными примесями впоследствии удаляется.

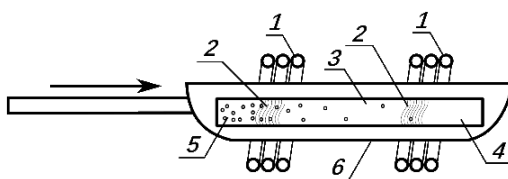


Рис. 3. Схема устройства для зонной плавки германия: индукционные катушки (1); расплавленные зоны (2); очищенный германий (3); сверхчистый германий (4); германий с повышенным содержанием примесей (5); графитовая лодочка (6)

1) Пусть заготовка из германия является тонкостенным цилиндром внешним диаметром $D = 1$ см, толщиной стенок $h = 1$ мм. При комнатной температуре окружающей среды и КПД метода зонной плавки $\eta = 10\%$ найти амплитуду необходимого тока в катушке. Учесть, что скорость перемещения $v = 1$ см/час, длина локальной зоны расплава $L = 1$ см, параметры катушки: число витков $N = 100$, частота тока $f = 0,5$ МГц.

Примечание: Катушку считать идеальным соленоидом, внутри которого образуется расплав; считать, что в силу плохой теплопроводности германия тепло от фронта кристаллизации практически не доходит до фронта плавления; цилиндрическая заготовка насажена на несмачиваемый графитовый стержень, поэтому зона расплава за счет сил поверхностного натяжения сохраняет свою цилиндрическую форму; ниже приведены удельная теплота кристаллизации, плотность твердого тела/расплава, температура плавления, удельная теплоемкость, магнитная проницаемость и удельное сопротивление расплава германия: $\lambda = 509$ кДж/кг, $\rho = 5,3/5,6$ г/см³, $T = 938$ °C, $c = 0,32$ кДж/(кг·°C), $\mu = 1$ и $\rho_e = 0,004$ Ом·см.

А) Сформулировать два основных требования к материалу лодочки.

Б) Почему индукционная катушка не может быть ни слишком длинной, ни слишком короткой, то есть почему существует оптимальная длина катушки?

В) Если зонную плавку осуществлять в космосе на борту Международной Космической Станции в нормальных условиях, то как изменится КПД процесса? Дать качественный ответ, аргументировать.

Г) Если после прохождения первой катушки содержание примесей в образце понизилось на 30%, то какой процент примесей (считая от первоначальной величины) останется в образце после прохода через вторую катушку?

4. Пневматическая катапульта

Беспилотному летательному аппарату (БПЛА) самолетного типа начальная скорость может быть сообщена с помощью пневматической катапульти (рис. 4). В процессе запуска БПЛА ускоряется вдоль наклонной направляющей. Его ускоряет движущийся внутри полого цилиндра (ось цилиндра наклонена под тем же углом, что и направляющая) поршень. Вначале (когда БПЛА неподвижен) под закрепленным поршнем в небольшом объеме находится сжатый сухой воздух. Затем поршень освобождают, и он ускоряется совместно с жестко сцепленным с ним БПЛА, пока не остановится, ударившись о верхние упоры. При этом БПЛА расцепляется с поршнем и отправляется в свободный полет.



Рис. 4. БПЛА на пневматической катапульти

Пусть цилиндр без поршня открыт на атмосферу сверху и закрыт снизу. Внутренний диаметр цилиндра равен $D = 5$ см. В нижнем положении поршень находится на расстоянии $L_1 = 20$ см от дна, а в верхнем — на расстоянии $L_2 > L_1$. Давление под поршнем в нижнем положении равно $p_1 = 25$ атм, а верхнем — $p_2 = 1,5$ атм. Масса поршня с БПЛА равна $M = 50$ кг. Угол наклона направляющей к горизонту равен $\alpha = 30^\circ$.

- 1) Найти расстояние L_2 в предположении об адиабатическом расширении газа под поршнем, когда применимо уравнение Пуассона $pV^{C_p/C_v} = \text{const}$.
 - 2) Пренебрегая силами трения, определить начальную скорость v свободного полета БПЛА.
 - 3) Определить среднюю силу трения f за время запуска, если реальная начальная скорость оказалась $0,8v$.
- А) Многократное ударное воздействие на упоры может привести к их быстрому выходу из строя. Предложить инженерное решение этой проблемы.

5. Эффект памяти формы

Для раскрытия антенн космических аппаратов используют привод — проволоку из нитинола (никелида титана), материала с эффектом восстановления заданной формы при температуре $t \geq 130^\circ\text{C}$ (рис. 5). Эффект основан на фазовых (так называемых мартенситных) превращениях,

при которых происходит перестройка кристаллической решетки вещества. После охлаждения до температуры ниже окончания прямых мартенситных превращений проволоку вытягивают (причем после снятия нагрузки сохраняется остаточное растяжение). Тогда при последующем нагреве (по окончании обратных мартенситных превращений) проволока самопроизвольно сокращается почти до исходной длины. Управляющим воздействием на активный элемент может быть нагрев солнечной радиацией или нагрев при пропускании электрического тока.

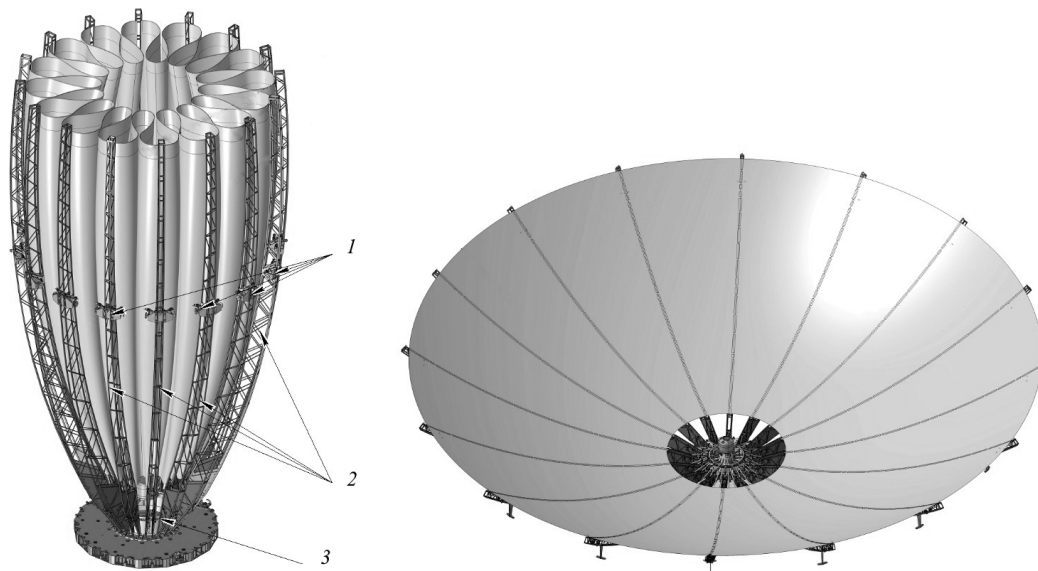


Рис. 5. Механизм раскрытия антенны: замки зачековки (1); спицы (2); механизм раскрытия с проволокой из нитинола (не видна на рисунке) (3)

1) Найти максимально возможный диаметр d холодной проволоки, чтобы при пропускании тока $I = 3,3$ А на темной стороне орбиты вокруг Земли начался процесс восстановления формы. Удельное сопротивление проволоки $\rho_R = 0,8$ мкОм·м, коэффициент черноты $\varepsilon = 0,66$.

2) Найти максимальный радиус круговой орбиты вокруг Солнца (в процентах от радиуса орбиты Земли вокруг Солнца), на которой антенна раскрылась бы только под действием солнечного излучения без пропускания электрического тока. Солнечная постоянная на орбите Земли равна $J_S = 1400$ Вт/м².

Температуру проволоки считать однородной по ее объему, сопротивление — независимым от температуры. Интенсивность излучения твердого тела подчиняется закону Стефана — Больцмана $J = \varepsilon \sigma T^4$ (СИ), где интенсивность J имеет размерность Вт/м², σ — постоянная Стефана — Больцмана (см. лист с константами), $\varepsilon < 1$ — безразмерная величина (для абсолютно черного тела $\varepsilon = 1$).

А) Большие перемещения антенных конструкций с помощью активного элемента привода, работающего на эффекте восстановления формы, требует значительных линейных размеров проволоки из никелида титана. Предложить компактную укладку проволоки, чтобы преодолеть этот недостаток. Проанализировать возможные трудности (недостатки) при предложенном варианте укладки. В качестве управляющего воздействия рассматривать только пропускание тока.