

1. Вредная вибрация

Для управления положением коптера в полете используют датчики его ускорения. Известно, что датчик акселерометра квадрокоптера, расположенный вблизи его центра масс, имеет чувствительность в плоскости винта $a = 0,01 \text{ м/с}^2$ в единичном измерении, а длительность измерения $t = 0,001 \text{ с}$. Отрыв одной лопасти четырехлопастного винта 1 (рис. 1) еще позволяет зависнуть квадрокоптеру в аварийном режиме, но вызывает вредную вибрацию конструкции. Стабилизация по высоте при этом достигается за счет автоматической регулировки оборотов неповрежденных винтов. В этом режиме, как и до аварии, поврежденный винт совершает 3000 оборотов в минуту. Длина лопасти $L = 10 \text{ см}$ (распределение масс симметрично по длине лопасти), масса лопасти $m = 1 \text{ г}$. Вес коптера со всеми винтами $M = 1 \text{ кг}$.

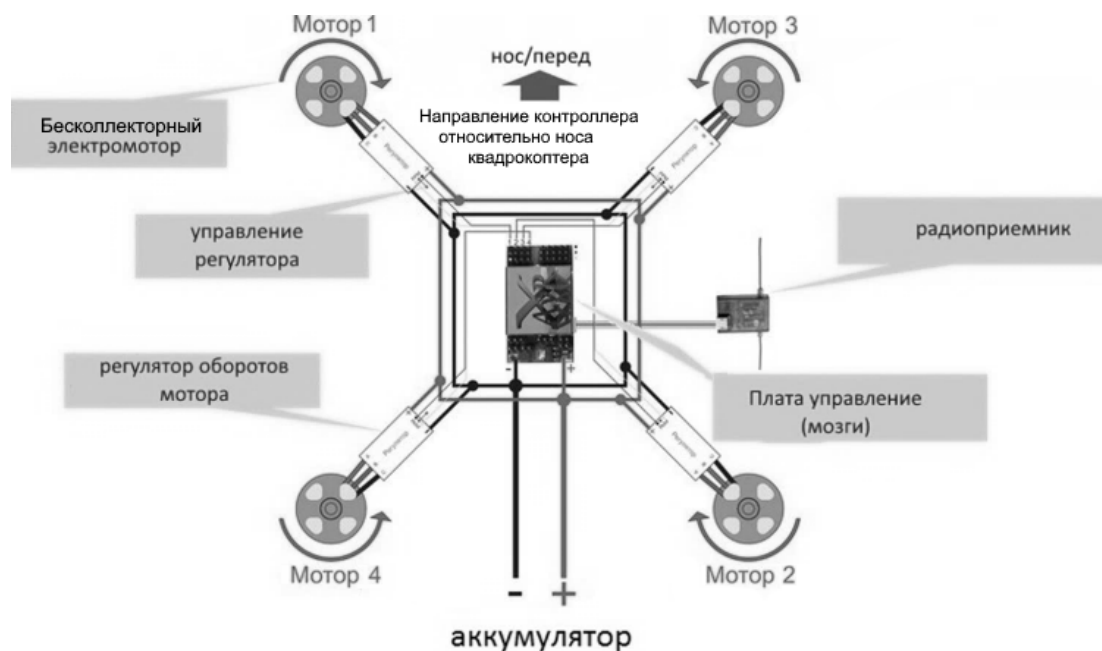


Рис. 1. Квадрокоптер, вид сверху

- 1) Оценить грубо, на сколько процентов должна измениться сила тяги поврежденного винта. Считать, что каждая лопасть винта при вращении захватывает воздух независимо от остальных лопастей; воздух затем отклоняется вниз, плотность воздуха при этом не меняется. Однако снизу под винтом независимых потоков от отдельных лопастей уже нет, а формируется один общий вертикальный поток воздуха. Считать, что сила тяги пропорциональна квадрату числа оборотов.
 - 2) Найти амплитуду колебаний корпуса в плоскости винтов после аварии при вертикальной автостабилизации.
 - 3) Во сколько раз снизится точность определения датчиком ускорения коптера в плоскости винтов после отрыва лопасти и вертикальной автостабилизации?
- А) Описать качественно, как нужно изменить обороты каждого из неповрежденных винтов 2, 3, 4 в режиме автостабилизации, чтобы после аварии коптер продолжал зависать над объектом наблюдения.

Б) Описать возможный принцип действия датчика ускорения (акселерометра).

2. Князь Довмонт Псковский

Существуют квадрокоптеры, управляемые по оптоволокну. Назовем такой коптер, например, «Князь Довмонт Псковский» (рис. 2). Пусть оптоволоконная нить массой $m = 2$ кг, компактно намотанная на цилиндрическую катушку, дает возможность коптеру улететь на расстояние $L = 10$ км. Для описания свойств оптоволокну принять упрощенную модель: это цилиндрическая однородная нить, выполнена из полимерного волокна с плотностью $\rho = 950$ кг/м³ и коэффициентом преломления $n_1 = 1,46$, покрыта тонкой (по сравнению с толщиной самой нити) оболочкой из кварца, легированного примесями, с коэффициентом преломления $n_2 = 1,41$.



Рис. 2. Квадрокоптер, управляемый по оптоволокну

- 1) Оценить минимальный радиус намотки оптоволокну на катушку, при котором по нему все еще можно передавать сигналы управления. Считать, что на торец конца оптоволокну излучение лазерного светодиода падает нормально.
 - 2) Под каким максимальным углом относительно нормали (апертурный угол) должен падать свет на плоский торец оптоволокну для эффективного ввода в него излучения от полупроводникового лазерного светодиода через иммерсионную жидкость с коэффициентом преломления $n = 1,45$? (Иммерсионная жидкость — это прозрачная техническая жидкость со стабильным значением коэффициента преломления, которая полностью заполняет пространство между двумя оптическими объектами.)
- А) В чем достоинства управления коптером по оптоволокну с точки зрения военного применения?
- Б) Для чего используют иммерсионную жидкость, которой заполняют пространство между излучающим светодиодом и торцом оптоволокну при вводе излучения в последнее?
- В) Какие можно дать рекомендации по способам борьбы с дронами противника, управляемыми по оптоволокну? Предложить несколько способов, реализуемых с технической точки зрения.

3. Отклонение вектора тяги

Для повышения маневренности военных самолетов на некоторых турбореактивных двухконтурных двигателях (ТРДД) используют регулируемые сопла с управляемым/отклоняемым

вектором тяги (УВТ/ОВТ) — на рис. 3 показан вид сбоку. Они позволяют отклонять поток продуктов сгорания относительно оси двигателя. Сопло набрано из внутренних до/сверхзвуковых створок 8, 10 и наружных створок 9, которые могут раздвигаться/сдвигаться и отклоняться за счет работы пневмо- или гидроцилиндров 6, 11, 13.

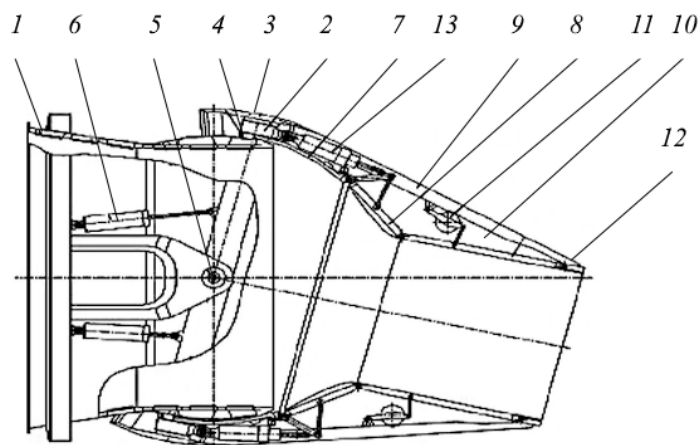


Рис. 3. Осесимметричное сопло с поворотным узлом:

неподвижный корпус (1); подвижный корпус (2); сферическое кольцо (3); уплотнение (4); оси (5); гидроцилиндры управления вектором тяги (6); корпус сопла (7); дозвуковые створки (8); наружные створки (9); сверхзвуковые створки (10); пневмоцилиндры управления срезом (11); направляющие сверхзвуковых створок (12); гидроцилиндры управления критикой (13)

1) Оценить для одного из ТРДД НПО «Сатурн» с тягой на форсаже $F = 122,6$ кН боковую силу, возникающую при угле отклонения потока продуктов сгорания $\alpha = 15^\circ$ от оси двигателя и действующую на створки сопла. Потерями тяги при развороте потока пренебречь.

2) Оценить минимально необходимое давление в верхнем гидроцилиндре 6 с внутренним диаметром $D = 4$ см в момент динамического маневра самолета с максимальной перегрузкой $9g$, направленной вертикально вверх, в условиях п. 1 согласно рис. 3. Учесть, что при развороте потока продуктов горения точка приложения боковой силы на внутренние створки сдвинута относительно оси качания 5 вниз по потоку на $L = 0,2$ м. Масса отклоняемой части сопла $m = 200$ кг, ее центр масс находится на удалении от оси качания $H = 300$ мм на оси симметрии этой части. Считать, что применяются парные гидроцилиндры одностороннего действия — они работают только на расширение. Усилие для обратного перемещения штока цилиндра пренебрежимо мало по сравнению с прямым. Оси гидроцилиндров (по две пары с каждой боковой стороны сопла) примерно параллельны и смещены относительно горизонтальной оси симметрии двигателя вниз/вверх на $h = 200$ мм (на рис. 3 оси немного расходятся, не учитывать это).

Примечание: в действительности боковая сила, возникающая при развороте потока, является распределенной нагрузкой, и ее замена сосредоточенной силой допустима лишь в рамках грубой модели. Перегрузка измеряется в единицах, кратных ускорению свободного падения вблизи поверхности Земли, и равна отношению веса тела в данный момент к весу тела в состоянии покоя на поверхности Земли, а направление перегрузки совпадает с направлением вектора веса тела в данный момент.

А) Помимо преимуществ у таких сопел есть и недостатки. Перечислить несколько, раскрывая их физическую/инженерную сущность.

Б) Назвать другие возможности по достижению сверхманевренности истребителей. Перечислить, раскрывая их физическую/техническую сущность.

4. Аттракцион невиданной щедрости — отопление окружающей среды электросиловой установкой коптера!

В мультикоптерах (коптерах с числом винтов более одного) винт приводится в движение с помощью электрических двигателей. Скорость потока воздуха v_n зависит от частоты вращения винта ω линейно, а тяга винта F_m зависит квадратично, то есть $v_n = \alpha\omega$, $F_m = \beta\omega^2$, где α и β — постоянные величины. Потребляемая мощность винта пропорциональна кубу частоты вращения: $P_v = \gamma\omega^3$, при этом мощность, выдаваемая электрическим двигателем, пропорциональна квадрату тока, текущего по обмотке: $P_v = \theta I^2$, где γ и θ — постоянные величины. Мощность теплоотвода от двигателей пропорциональна скорости потока воздуха и разности температур, то есть $P_{то} = kv_n(T - T_{oc})$, где k — постоянная величина, а T , T_{oc} — температуры двигателя и окружающей среды. Мультикоптер массой M с грузом массой m_0 находится в режиме зависания достаточно продолжительное время, и температура двигателя установилась на $\Delta T_0 = 10$ °С выше окружающей среды. В некоторый момент времени груз сбрасывается, и контролер двигателя уменьшает частоту вращения двигателя, чтобы мультикоптер остался в режиме зависания.

1) Определить, насколько температура двигателя будет превышать температуру окружающей среды через продолжительное время после сброса груза.

2) До сброса груза мощность тепловыделения в двигателе $P_0 = 30$ Вт, а теплоемкость двигателей $C_{дв} = 80$ Дж/°С. Определить скорость падения температуры $\Delta T/\Delta t$ сразу после сброса груза.

А) Безколлекторные электромоторы для коптера (то есть моторы, у которых отсутствуют скользящие контакты — щетки) могут отличаться по конструкции — иметь внешний или внутренний ротор (ротор — вращающаяся часть с постоянными магнитами). В чем преимущества/недостатки тех и других с точки зрения защиты от нагрева обмоток статора, КПД и крутящего момента при прочих равных условиях?

5. Квадрокоптер на парашюте

Квадрокоптер небольших размеров с известной массой $m = 2$ кг оснащен парашютом для экстренной посадки в случае отказа двигателей. Известно, что если коптер приземляется со скоростью не выше, чем $v = 5$ м/с, то он не получает значительных повреждений при падении. Парашют выполнен из плотной ткани (поверхностная плотность ткани $\sigma = 200$ г/м²) и при падении в раскрытом состоянии при наполнении воздухом имеет вид полусферы с радиусом R . Плотность воздуха можно считать равной $\rho = 1,29$ кг/м³. Массой крепежа, а также силой Архимеда, действующей на коптер с парашютом, пренебречь. Считать, что коптер падает с достаточно большой высоты.

1) Оценить минимальный радиус парашюта, необходимого для безопасного приземления коптера с выходом на постоянную скорость в воздухе. Считать движение купола поступательным.

2) Во сколько раз возрастет скорость посадки, если в верхней части парашюта сделать круглое отверстие радиусом $0,05R$?

А) Найти скорость потока воздуха в отверстии парашюта, считая воздух несжимаемым. Прокомментировать получившийся ответ.

1. Вредная вибрация

Для управления положением коптера в полете используют датчики его скорости. Известно, что датчик скорости квадрокоптера, расположенный вблизи его центра масс, имеет чувствительность в плоскости винтов $v = 0,1$ м/с в единичном измерении, а длительность измерения $t = 0,1$ с. Отрыв одной лопасти шестилопастного винта 1 квадрокоптера (рис. 1) еще позволяет зависнуть последнему в аварийном режиме, но вызывает вредную вибрацию конструкции. Стабилизация по высоте при этом достигается за счет автоматического регулирования оборотов неповрежденных винтов (см. рис. 1). В этом режиме, как и до аварии, поврежденный винт совершает 3000 оборотов в минуту. Длина лопасти $L = 10$ см (распределение масс симметрично по длине лопасти), масса лопасти $m = 1$ г. Вес коптера со всеми винтами $M = 1$ кг.

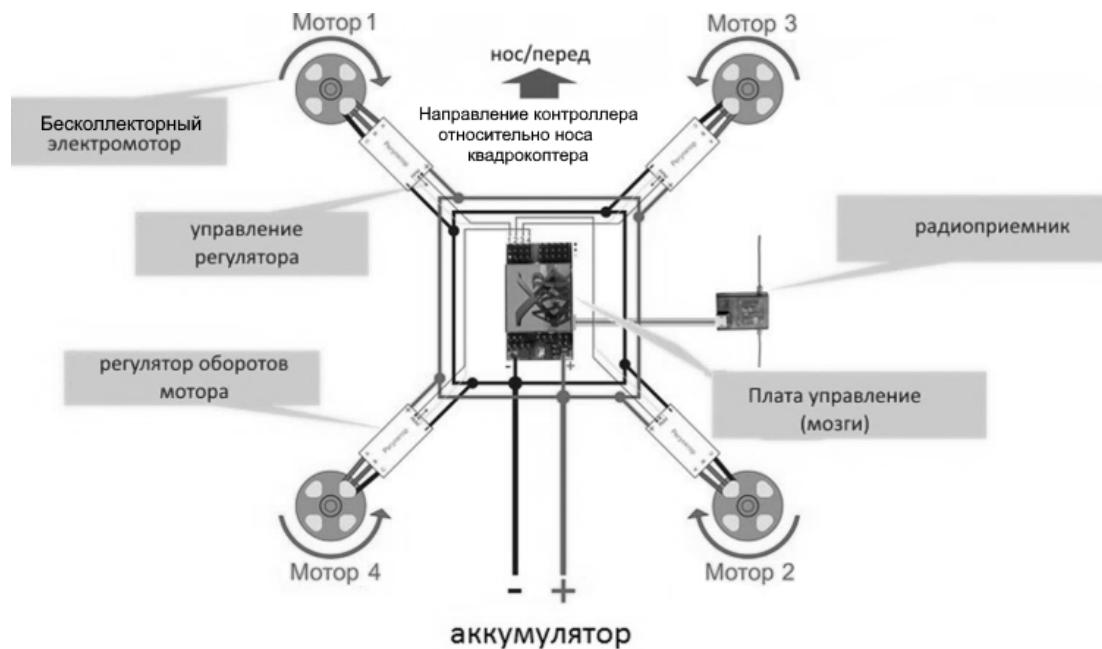


Рис. 1. Квадрокоптер, вид сверху

В п.п. 1, 2 считать, что каждая лопасть винта при вращении захватывает воздух независимо от остальных лопастей; воздух затем отклоняется вниз, плотность воздуха при этом не меняется. Однако снизу под винтом независимых потоков от отдельных лопастей уже нет, а формируется один общий вертикальный поток воздуха.

1) Оценить грубо, на сколько процентов изменилась бы сила тяги каждого из неповрежденных винтов 2, 3, 4 (также указать знак изменения), чтобы после аварии коптер продолжал висеть над объектом наблюдения в режиме автостабилизации по высоте. Считать, что сила тяги пропорциональна квадрату числа оборотов.

2) Оценить грубо, на сколько процентов изменится тяговая мощность поврежденного винта. Считать, что скорость воздуха, проходящего через винт, пропорциональна частоте его оборотов.

3) Во сколько раз снизится точность определения скорости коптера в плоскости винта после отрыва лопасти при вертикальной автостабилизации?

А) В какую сторону (по часовой стрелке или против нее, если смотреть сверху) начнет вращаться после аварии коптер, находясь по-прежнему в режиме зависания?

Б) Описать возможный принцип действия датчика скорости.

2. Князь Довмонт Псковский

Существуют квадрокоптеры, управляемые по оптоволокну, например, «Князь Довмонт Псковский» (рис. 2). Пусть оптоволоконная нить массой $m = 2$ кг, компактно намотанная на цилиндрическую катушку, дает возможность коптеру улететь на расстояние $L = 10$ км. Для описания свойств оптоволокну принять упрощенную модель: это цилиндрическая однородная нить, выполнена из полимерного волокна с плотностью 950 кг/м^3 и коэффициентом преломления $n_1 = 1,46$, покрыта тонкой (по сравнению с толщиной самой нити) оболочкой из кварца, легированного примесями, с коэффициентом преломления $n_2 = 1,41$.



Рис. 2. Квадрокоптер, управляемый по оптоволокну

1) Оценить, какой длины должна быть катушка с плотной многослойной намоткой оптоволокну, если ее внешний диаметр $D = 10$ см, и существует ограничение снизу на радиус ее намотки, при котором по оптоволокну все еще можно передавать сигналы управления. Считать, что при вводе излучения в оптоволокну излучение лазерного светодиода на плоский торец оптоволоконной нити падает нормально. Толщина каждого слоя намотки равна диаметру оптоволокну.

2) Под каким максимальным углом по отношению к нормали (апертурный угол) должен падать свет на плоский торец оптоволокну для эффективного ввода в него излучения от полупроводникового лазерного светодиода через воздушную среду?

А) Указать, какими особенностями оптоволоконной нити пренебрегают в ее упрощенной модели, описанной в условии.

Б) Каковы недостатки управления дроном по оптоволокну по сравнению с обычным беспроводным способом управления с помощью электромагнитных волн?

В) Какой режим полета предпочтителен для дронов на оптоволокну? Дать рекомендации и пояснить.

3. Отклонение вектора тяги

Для повышения маневренности военных самолетов на некоторых турбореактивных двухконтурных двигателях (ТРДД) используют регулируемые сопла с управляемым/отклоняемым вектором тяги (УВТ/ОВТ) — на рис. 3 показан вид сбоку. Они позволяют отклонять поток продуктов сгорания относительно оси двигателя. Сопло набрано из внутренних до/сверхзвуковых створок 8, 10 и

наружных створок 9, которые могут раздвигаться/сдвигаться и отклоняться за счет работы пневмо- или гидроцилиндров 6, 11, 13.

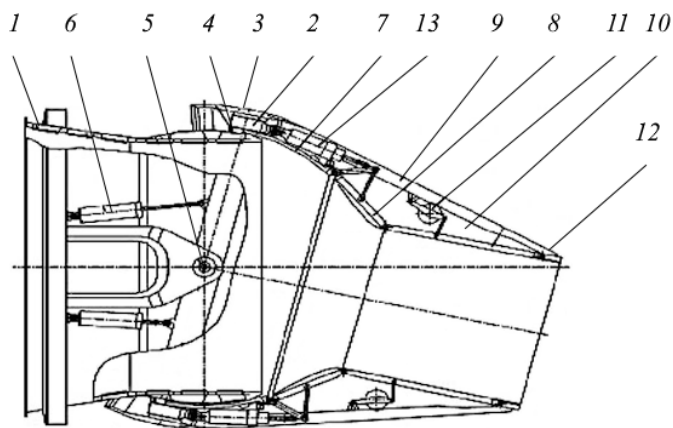


Рис. 3. Осесимметричное сопло с поворотным узлом:

неподвижный корпус (1); подвижный корпус (2); сферическое кольцо (3); уплотнение (4); оси (5); гидроцилиндры управления вектором тяги (6); корпус сопла (7); дозвуковые створки (8); наружные створки (9); сверхзвуковые створки (10); пневмоцилиндры управления срезом (11); направляющие сверхзвуковых створок (12); гидроцилиндры управления критикой (13)

1) Оценить для одного из ТРДД НПО «Сатурн» с тягой на форсаже $F = 122,6$ кН боковую силу, возникающую при угле отклонения потока продуктов сгорания $\alpha = 15^\circ$ от оси двигателя и действующую на створки сопла. Учесть потери 10% тяги при развороте потока.

2) Оценить, какой момент силы должна создавать каждая пара гидроцилиндров 6 (всего по две пары с каждой стороны) в момент динамического маневра самолета с максимальной перегрузкой $7g$, направленной вертикально вверх, в условиях п. 1 согласно рис. 3, если при развороте потока продуктов горения точка приложения боковой силы на внутренние створки сдвинута относительно оси качания 5 вниз по потоку на $L = 0,2$ м. Ось симметрии двигателя горизонтальна. Масса отклоняемой части сопла $m = 200$ кг, ее центр масс находится на удалении от оси качания 5 $H = 300$ мм на оси симметрии этой части.

Примечание: в действительности боковая сила, возникающая при развороте потока, является распределенной нагрузкой, и ее замена сосредоточенной силой допустима лишь в рамках грубой модели. Перегрузка измеряется в единицах, кратных ускорению свободного падения вблизи поверхности Земли, и равна отношению веса тела в данный момент к весу тела в состоянии покоя на поверхности Земли, а направление перегрузки совпадает с направлением вектора веса тела в данный момент.

А) Какие преимущества дает отклоняемый вектор тяги по сравнению с другими возможностями по достижению сверхманевренности? Перечислить их, раскрывая физическую/техническую сущность.

Б) Обычно для простоты конструкции ОВТ одновдвигательного самолета используют отклонение сопла только в одном направлении (по тангажу, то есть вверх/вниз). Однако у двухдвигательных самолетов отклонение каждого сопла только в одном направлении позволяет отклонять суммарный вектор тяги по всем направлениям в плоскости, перпендикулярной оси двигателя. Как это достигается?

4. Аттракцион невиданной щедрости — отопление окружающей среды электросиловой установкой коптера!

В мультикоптерах (коптерах с числом винтов более одного) винт приводится в движение с помощью электрических двигателей. Скорость потока воздуха v_n зависит от частоты вращения винта ω линейно, а тяга винта F_m зависит квадратично, то есть $v_n = \alpha\omega$, $F_m = \beta\omega^2$, где α и β — постоянные величины. Потребляемая мощность винта пропорциональна кубу частоты вращения: $P_v = \gamma\omega^3$, при этом мощность, выдаваемая электрическим двигателем, пропорциональна квадрату тока, текущего по обмотке: $P_d = \theta I^2$, где γ и θ — постоянные величины. Мощность теплоотвода от двигателей пропорциональна скорости потока воздуха и разности температур, то есть $P_{то} = kv_n(T - T_{oc})$, где k — постоянная величина, а T , T_{oc} — температуры двигателя и окружающей среды. Мультикоптер находится в режиме зависания достаточно продолжительное время, и температура двигателя установилась на $\Delta T_0 = 10^\circ\text{C}$ выше окружающей среды. В некоторый момент времени мультикоптер переводят в режим горизонтального полета, при котором мультикоптер наклоняется, но тяга вырастает на 21%. Скорость коптера по сравнению со скоростью потока воздуха через винт пренебрежимо мала.

1) Определить, насколько температура двигателя будет превышать температуру окружающей среды через продолжительное время после перехода в режим горизонтального полета.

2) До сброса груза мощность тепловыделения в двигателе $P_0 = 30$ Вт, а теплоемкость двигателей $C_{дв} = 80$ Дж/°C. Определить скорость падения температуры $\Delta T/\Delta t$ сразу после перехода в режим горизонтального полета.

А) Аккумулятор quadrocoptera расположен в центре масс конструкции. При работе он также нагревается и нуждается в охлаждении. Какие различия есть между преобладающими факторами эффективности охлаждения аккумулятора и электромотора среди разных режимов полета и особенностей конструкции охлаждаемых элементов?

5. Квадрокоптер на парашюте

Квадрокоптер небольших размеров с известной массой $m = 2$ кг оснащен парашютом для экстренной посадки в случае отказа двигателей. Парашют выполнен из плотной ткани (поверхностная плотность ткани $\sigma = 200$ г/м²) и при падении в раскрытом состоянии при наполнении воздухом имеет вид полусферы с радиусом $R = 75$ см. В верхней части парашюта проделано круглое отверстие радиуса $r = 5$ см. Известно, что при данной конструкции парашюта коптер приземляется со скоростью v и не получает значительных повреждений при падении. Плотность воздуха можно считать равной $\rho = 1,29$ кг/м³. Массой крепежа, а также силой Архимеда, действующей на коптер с парашютом, пренебречь. Считать, что коптер падает с достаточно большой высоты.

1) Оценить скорость v безопасного приземления коптера, считая ее постоянной при установившемся режиме спуска.

2) Во сколько раз снизится скорость посадки, если зашить отверстие в верхней части парашюта той же тканью? Считать движение купола поступательным.

А) Как будет отличаться спуск беспилотника на парашюте без отверстия по сравнению с таким же спуском на парашюте с отверстием? Найти несколько отличий, пояснить их возникновение с точки зрения физики.