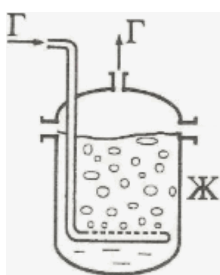


1. Барботаж и азотирование vs деградация топлива

При длительном хранении авиационного топлива оно насыщается кислородом и водяными парами из воздуха. Молекулы этих газов диффундируют с поверхности границы раздела керосин/воздух внутрь топлива, занимая промежутки между его молекулами. Это негативно влияет на его эксплуатационные характеристики. Для предотвращения деградации топлива производят азотирование, принудительно заполняя молекулами азота промежутки между молекулами топлива. Чтобы быстрее насытить топливо азотом, применяют метод барботажа (рис. 1). От баллона со сжатым азотом через редуктор по трубе газ попадает



в цистерну с топливом. Азот продавливается через множество небольших круглых отверстий вблизи дна. От этих отверстий периодически отрываются пузырьки азота, которые всплывают, проходя через всю толщу топлива.

Рис. 1. Метод барботажа

Пусть в цилиндрической цистерне диаметром $d = 8$ м (ось цилиндра вертикальна), в которой при нормальных условиях хранится $M = 20$ т авиационного топлива плотностью $\rho = 800$ кг/м³, вблизи дна равномерно распределены $N = 10^6$ одинаковых барботажных отверстий, радиусы которых $r = 0,1$ мм. От них отрываются и всплывают пузырьки азота с характерным радиусом $R = 1$ мм. Постоянное избыточное давление в подводящей трубе обеспечивает средний массовый расход азота через каждое отверстие $q = 0,1$ мг/с. Коэффициент поверхностного натяжения границы раздела азот/керосин $\sigma = 0,03$ Н/м. Цистерна открыта сверху.

- 1) Считая рост пузырька изотермическим процессом в нормальных условиях, определить частоту, с которой образуются пузырьки на одном отверстии.
- 2) Для оценки времени азотирования τ предложена следующая модель. Каждый всплывающий пузырек добавляет в топливо одинаковую порцию азота, которая сразу равномерно распределяется по всей цистерне. Азотирование завершается, когда концентрация азота в топливе составит $\alpha = 0,017$ от концентрации азота в пузырьках в момент их отрыва. Оценить время азотирования τ . Это оценка сверху или снизу?

Указание: среднеквадратичное расстояние x , на которое диффундируют молекулы газа за время t , можно оценить по формуле $x \approx \sqrt{Dt}$, где $D = 2 \cdot 10^{-9}$ м²/с — коэффициент диффузии азота в авиационном топливе.

- 3) Можно ли считать всплывающие в керосине пузыри, которые при отрыве имели характерный радиус $R = 1$ мм, сферическими после отрыва? Учесть, что установившаяся скорость всплытия сферического пузырька радиуса $R_1 = 0,1$ мм в керосине составляет $V_1 = 10$ см/с. Обтекание пузыря считать турбулентным.

А) Нарисовать или описать качественно последовательные фазы (через равные промежутки времени) движения пузырька после отрыва от отверстия. Почему пузырек может двигаться не по прямой? Траектории каких пузырьков — больших или маленьких — более прямые, и почему?

Б) Назвать причины, по которым для барботажа выгодны как можно более мелкие пузырьки.

В) Предположить, для чего еще, кроме борьбы с растворенным кислородом, применяют барботаж жидкого топлива сжатым азотом?

2. Обледенение

Коптер удалялся от оператора, и при расстоянии между ними $R = 10$ км поперек курса ему встретила полоса тумана (рис. 2) с глубиной фронта $L = 4$ км, в которой, при прохождении ее насквозь, поглотилось или рассеялось на капельках воды 95% мощности электромагнитной (ЭМ) волны сигнала оператора. В тумане на антенне приемника намерзла тонкая пленка льда. Коэффициент отражения по энергии при нормальном падении ЭМ-волн на гладкую поверхность из воздуха на антенну на заданной частоте составляет 1%, из воздуха на лед — 8%, а изо льда на антенну — 3,5%. Основная антенна оператора, излучая равномерно в верхнее полупространство, обеспечивала управление на дальности 15 км в отсутствие тумана. Поглощение ЭМ-волн во льду, отражение/преломление от границы тумана и отражение от подстилающей поверхности пренебрежимо малы. Интерференцию радиоволн в тонкой пленке льда не учитывать.

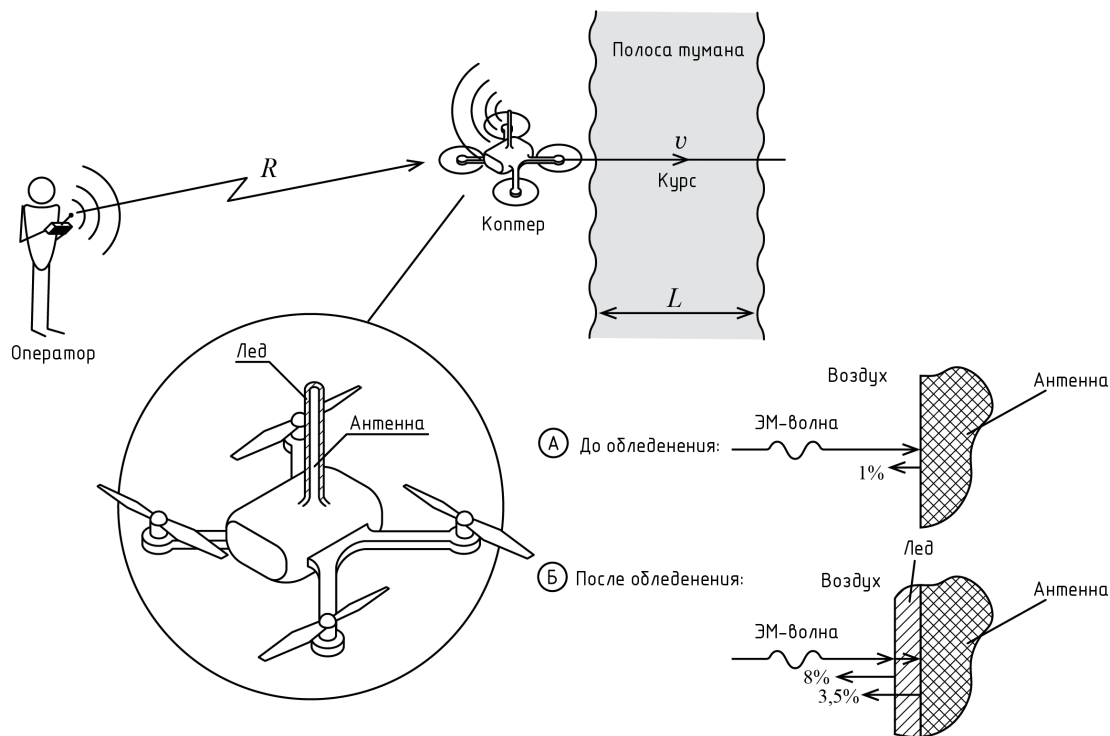


Рис. 2. Обледенение коптера в тумане

1) Во сколько раз снизится амплитуда напряженности электрического поля E ЭМ-волны на приемнике коптера от момента входа в туман к моменту выхода из него?

2) Чтобы в описанной выше ситуации (туман) дальность управления оставалась неизменной, оператор ограничивает направление излучения конусом при той же мощности. Найти необходимый полураствор конуса излучения при прочих равных условиях.

А) Назвать известные пассивные средства борьбы с обледенением (средства предотвращения образования наледи). Назвать как минимум один способ, делая акцент на физических явлениях, положенных в основу способа.

3. Шарик на ниточке

Фазированную антенную решетку (ФАР) используют в качестве радара на самолетах, но ее также можно поднять в небо на привязном аэростате. ФАР — это двумерная дифракционная решетка, в которой вместо отверстий в экране используют компактные когерентные излучатели/приемники ЭМ-волн, за счет задержки фазы излучения на которых можно вычислять отклонения главных максимумов дифракционной решетки относительно нормали к ней (можно осуществлять электронное сканирование пространства). Пусть по вертикальному кабель-тросу с погонной массой $\mu = 50$ г/м на аэростат подают электропитание для ФАР и производят обмен данными по проводам внутри троса. Пусть аэростат радиуса $R = 10$ м заполнен гелием на Земле (его макропараметры внутри оболочки соответствуют нормальным условиям), оболочка герметична, нерастяжима. Гелий в оболочке на всех высотах термостатирован на уровне Земли. Масса аэростата с ФАР, но без учета массы кабель-троса, $M = 2,2$ т. Плотность атмосферы у поверхности Земли $\rho_0 = 1,25$ кг/м³, температура $T = 300$ К, ускорение свободного падения $g = 9,81$ м/с². Плотность и температура атмосферы меняются с высотой согласно таблице 1. Считать, что молярная масса воздуха на всех высотах 29 г/моль.

Таблица 1. Зависимость плотности и температуры атмосферы от высоты

H , км	ρ/ρ_0	T/T_0
0	1	1
1	0,91	0,9783
2	0,82	0,9567
3	0,74	0,9350
4	0,67	0,9130
5	0,60	0,8917
6	0,54	0,8700
7	0,48	0,8483
8	0,43	0,8267

1) На какую высоту можно было бы поднять такой аэростат (с точностью до 100 м)? Для расчета высоты учесть, что плотность атмосферы падает с высотой (см. таблицу 1).

2) Какое избыточное давление (без запаса прочности) должна при этом выдерживать нерастяжимая оболочка?

А) Указать технические достоинства и недостатки размещения ФАР на привязном аэростате по сравнению с размещением ФАР на самолете.

Б) Во сколько раз тепловая мощность нагревателя, необходимая для термостатирования гелия в оболочке, отличается на высотах 1 км и 2 км?

4. Миражи в слоистых средах

Беспилотник завис на высоте $h = 5$ км над землей. С земли за его полетом наблюдает РЛС. Луч от антенны направлен под углом 30° к вертикали, таким образом РЛС «видит» беспилотник на расстоянии L_0 от себя по горизонтали. В действительности беспилотник смещен на некоторое расстояние ΔL по горизонтали от кажущейся точки нахождения объекта.

1) Определить это смещение ΔL .

Указание: можно представить атмосферу слоистой (количество слоев равной толщины $N = 5$), см. таблицу 2.

Таблица 2. Показатели преломления для каждого слоя по высоте

Слой	Показатель преломления
n_1	1,001
n_2	1,002
n_3	1,003
n_4	1,004
n_5	1,005

А) Меняется ли кажущееся положение беспилотника в зависимости от нагрева подстилающей поверхности (например, песок в пустыне ночью и днем)?

Б) Где угол кажущегося положения беспилотника (относительно нормали, проведенной из точки наблюдения) будет больше, на Земле или на Венере? Почему?

5. Кручу, верчу, сориентироваться хочу!

Изначально коптер висит неподвижно над объектом наблюдения и не вращается. При этом каждый мотор создает относительно вертикальной оси момент силы реакции $M = 1$ Н·м, передающийся на корпус (рис. 3).

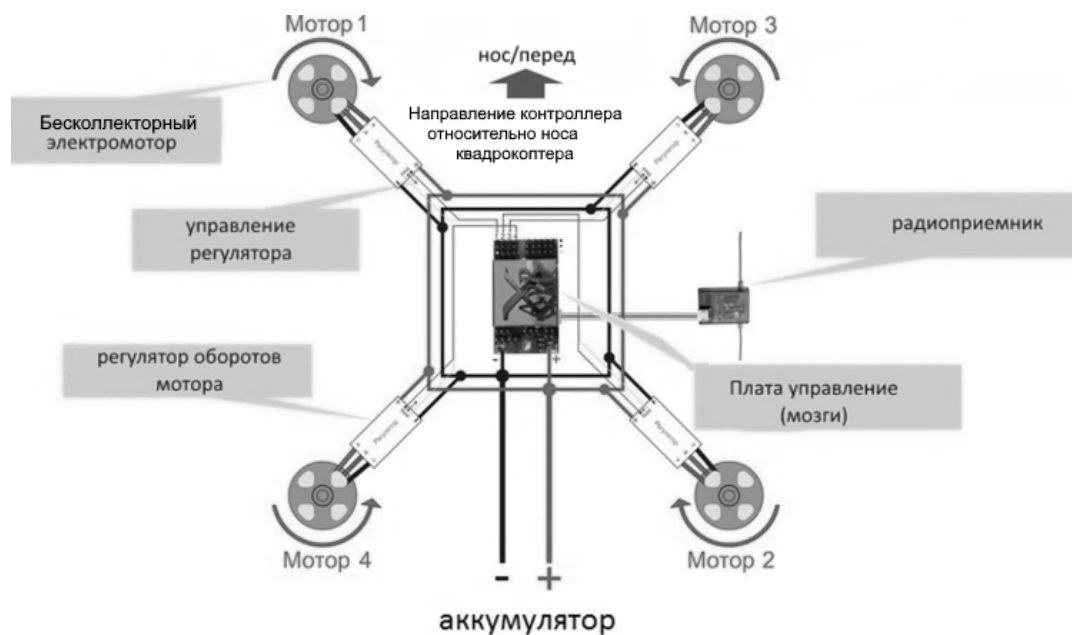


Рис. 3. Квадрокоптер, вид сверху

А) Как надо изменить частоты вращения электромоторов, чтобы развернуть квадрокоптер на месте строго в горизонтальной плоскости (рысканье)? Выбрать и пояснить правильный ответ.

1. Увеличить частоту мотора 1
2. Одновременно увеличить частоту моторов 1 и 2 на одинаковое число оборотов, уменьшить частоту мотора 3 на вдвое большее число оборотов.
3. Одновременно увеличить частоту мотора 1, уменьшить частоту мотора 3 на одинаковое число оборотов.
4. Одновременно увеличить частоту моторов 1 и 2, уменьшить частоту моторов 3 и 4 на одинаковое число оборотов.
5. Одновременно увеличить частоту моторов 1 и 3, уменьшить частоту моторов 2 и 4 на одинаковое число оборотов.

Б) Почему после внезапного изменения числа оборотов винтов и при поддержании в дальнейшем их новых значений на одном и том же уровне угловое ускорение корпуса, появившееся в начальный момент времени, при разворачивании в горизонтальной плоскости постепенно будет уменьшаться вплоть до полного исчезновения?

Указание: допустимо в качестве грубой модели квадрокоптера рассматривать тонкостенный массивный обод, на котором через равные расстояния установлены четыре точечных мотора с винтами.

1) Пусть в ранее выбранном варианте ответа на вопрос А) произошло изменение числа оборотов мотора 1 на 10%, причем за первую секунду после изменения числа оборотов винтов корпус коптера набрал кинетическую энергию вращения $W = 1$ Дж (эта энергия не учитывает кинетическую энергию вращения моторов с винтами). Считая процесс изменения числа оборотов мгновенным, найти начальное угловое ускорение вращения корпуса коптера ε . (Угловое ускорение — это приращение угловой скорости, отнесенное к бесконечно малому приращению времени: $\varepsilon = \Delta\omega/\Delta t$.)

1. Барботаж и азотирование vs деградация топлива

При длительном хранении авиационного топлива оно насыщается кислородом и водяными парами из воздуха. Молекулы этих газов диффундируют с поверхности границы раздела керосин/воздух внутрь топлива, занимая промежутки между его молекулами. Это негативно влияет на его эксплуатационные характеристики. Для предотвращения деградации топлива производят азотирование, принудительно заполняя молекулами азота промежутки между молекулами топлива. Чтобы быстрее насытить топливо азотом, применяют метод барботажа (рис. 1). От баллона со сжатым азотом через редуктор по трубе газ попадает в цистерну с топливом. Азот продавливается через множество небольших круглых отверстий вблизи дна. От этих отверстий периодически отрываются пузырьки азота, которые всплывают, проходя через всю толщу топлива.

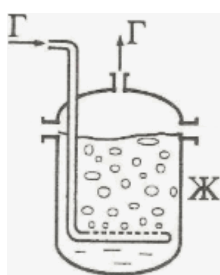


Рис. 1. Метод барботажа

Пусть в цилиндрической цистерне диаметром $d = 8$ м (ось цилиндра вертикальна), в которой при нормальных условиях хранится $M = 20$ т авиационного топлива плотностью $\rho = 800$ кг/м³, вблизи дна равномерно распределены $N = 10^6$ одинаковых барботажных отверстий, радиусы которых $r = 0,1$ мм. От них отрываются и всплывают пузырьки азота с характерным радиусом $R = 1$ мм со средней вертикальной скоростью $u = 10$ см/с. Постоянное избыточное давление в подводящей трубе обеспечивает средний массовый расход азота через каждое отверстие $q = 0,1$ мг/с. Коэффициент поверхностного натяжения границы раздела азот/керосин $\sigma = 0,03$ Н/м. Цистерна открыта сверху.

- 1) Найти пороговое значение избыточного давления газообразного азота (с точностью до 500 Па) в подводящей трубке, при котором начнется барботаж на отверстиях заданного размера.
- 2) Для оценки времени азотирования τ предложена следующая модель. Можно считать, что неподвижные пузырьки в условиях, близких к нормальным, равномерно заполняют область, занимаемую топливом. Газ из пузырьков постепенно диффундирует в жидкость. Найти τ , считая, что жидкость полностью насытится газом, когда среднеквадратичное смещение молекул азота x станет равным половине среднего расстояния между пузырьками. Это оценка сверху или снизу?

Указание: среднеквадратичное расстояние x , на которое диффундируют молекулы газа за время t , можно оценить по формуле $x \approx \sqrt{Dt}$, где $D = 2 \cdot 10^{-9}$ м²/с — коэффициент диффузии азота в авиационном топливе.

- 3) Изредка пузырьки при отрыве дробятся на более мелкие. Найти время всплытия фрагмента пузырька радиуса $R_1 = 0,1$ мм, если известно, что установившаяся скорость всплытия

фрагмента пузырька меньшего радиуса $R_2 = 0,05$ мм составляет $V_2 = 4$ мм/с. Фрагменты пузырьков считать сферическими, их обтекание — ламинарным.

А) Нарисовать качественно последовательные фазы нарастания и отрыва пузырька от отверстия. Какие силы удерживают пузырек? Чем определяется минимальное избыточное давление азота, при котором пузырьки начнут отрываться?

Б) Какой скоростью определяется максимальная (при очень больших давлениях) скорость u стенки растущего пузырька азота? Ответ пояснить.

В) Предположить, для чего еще, кроме насыщения топлива азотом, применяют барботаж.

2. Обледенение

Коптер удалялся от оператора, и при расстоянии между ними $R = 10$ км поперек курса ему встретила полоса тумана (рис. 2) с глубиной фронта $L = 4$ км, в которой, при прохождении ее насквозь, поглотилось или рассеялось на капельках воды 5% мощности электромагнитной (ЭМ) волны сигнала оператора. В тумане на антенне приемника намерзла тонкая пленка льда. Коэффициент отражения по энергии при нормальном падении ЭМ-волн на гладкую поверхность из воздуха на антенну составляет 1%, из воздуха на лед — 8%, а изо льда на антенну — 3,5%. Основная антенна оператора, излучая равномерно в верхнее полупространство, обеспечивала управление на дальности 15 км в отсутствие тумана. Поглощение ЭМ-волн во льду, отражение/преломление от границы тумана и отражение от подстилающей поверхности пренебрежимо малы. Интерференцию радиоволн в тонкой пленке льда не учитывать.

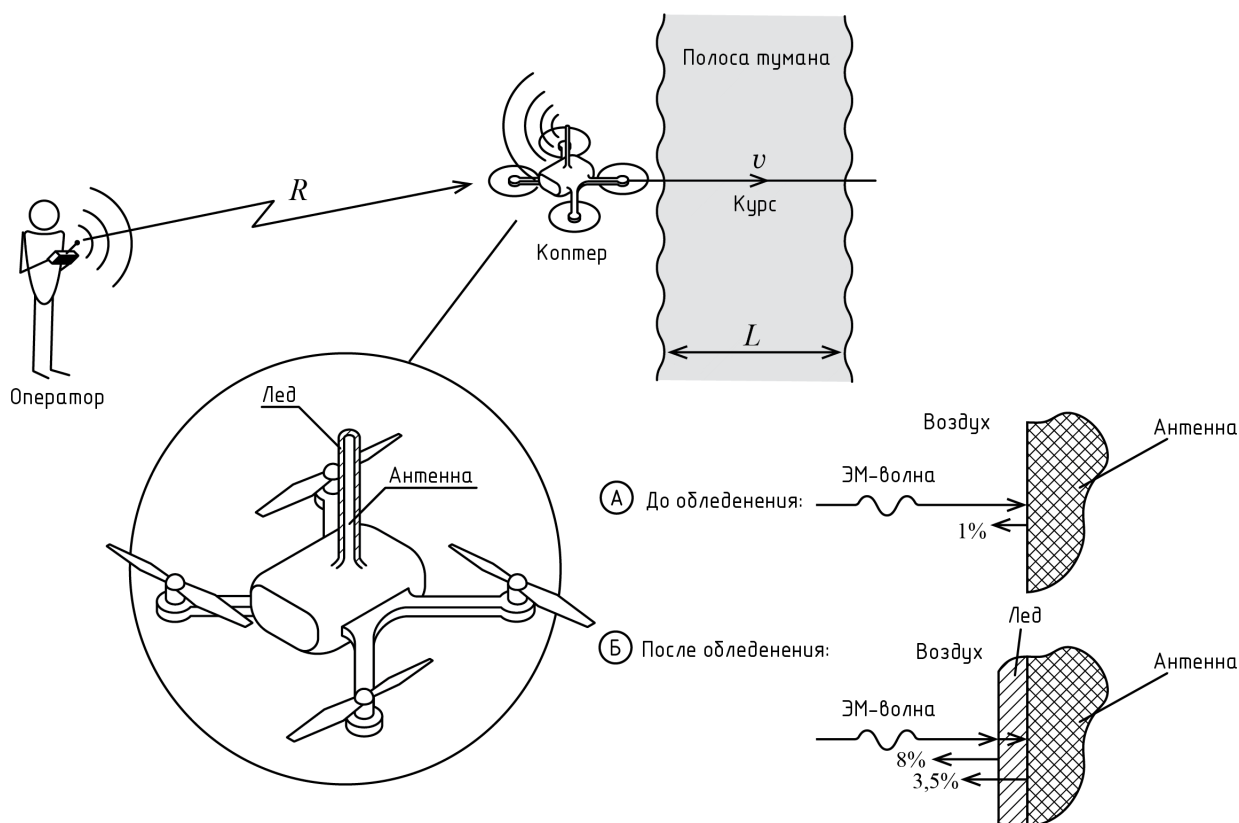


Рис. 2. Обледенение коптера в тумане

1) Во сколько раз необходимо увеличить амплитуду напряженности электрического поля E ЭМ-волны на излучателе оператора к моменту выхода коптера из тумана, чтобы энергия сигнала, принятого коптером, осталась на том же уровне, что и в момент входа в туман?

2) Чтобы в описанной выше ситуации (туман) дальность управления оставалась неизменной, оператор снижает длительность радиоимпульсов при их неизменной энергии. Найти, во сколько раз надо снизить длительность импульса при прочих равных условиях.

А) Назвать известные активные средства борьбы с обледенением (средства удаления уже образовавшейся наледи). Назвать как минимум два способа, делая акцент на физических явлениях, положенных в основу способа.

3. Шарик на ниточке

Фазированную антенную решетку (ФАР) используют в качестве радара на самолетах, но также ее можно поднять в небо на привязном аэростате. ФАР — это двумерная дифракционная решетка, в которой вместо отверстий в экране используют компактные когерентные излучатели/приемники ЭМ-волн, за счет задержки фазы излучения на которых можно вычислять отклонения главных максимумов дифракционной решетки относительно нормали к ней (можно осуществлять электронное сканирование пространства). Пусть по вертикальному кабель-тросу с погонной массой $\mu = 50$ г/м на аэростат подают электропитание для ФАР и производят обмен данными по проводам внутри троса. Пусть аэростат радиуса $R = 10$ м заполнен гелием на Земле (его макропараметры внутри оболочки соответствуют нормальным условиям), оболочка герметична, нерастяжима. Гелий в оболочке на всех высотах термостатирован на уровне Земли. Масса аэростата с ФАР, но без учета массы кабель-троса, $M = 2,2$ т. Плотность атмосферы у поверхности Земли $\rho_0 = 1,25$ кг/м³, температура $T = 300$ К, ускорение свободного падения $g = 9,81$ м/с². Плотность и температура атмосферы меняются с высотой согласно таблице 1. Считать, что молярная масса воздуха на всех высотах равна 29 г/моль.

Таблица 1. Зависимость плотности и температуры атмосферы от высоты

H , км	ρ/ρ_0	T/T_0
0	1	1
1	0,91	0,9783
2	0,82	0,9567
3	0,74	0,9350
4	0,67	0,9130
5	0,60	0,8917
6	0,54	0,8700
7	0,48	0,8483
8	0,43	0,8267

1) На какую силу натяжения (без запаса прочности) должен быть рассчитан кабель-трос при квазистатичном подъеме аэростата на максимальную высоту?

2) Какой приблизительно максимальный радиус зоны прямой видимости у данной ФАР в рамках геометрической оптики? При расчете радиуса зоны прямой видимости изменение коэффициента преломления атмосферы не учитывать.

А) Проанализировать качественно достоинства и недостатки, сравнив две схемы электропитания ФАР: по кабель-тросу с земли и от солнечных батарей, расположенных на аэростате.

Б) Указать факторы, отклоняющие радиосигналы от прямолинейного распространения, при их приеме ФАР.

4. Миражи в слоистых средах

Беспилотник завис на высоте h над землей. С земли за его полетом наблюдает РЛС. Луч непосредственно около антенны направлен под углом 30° к вертикали. Датчик электромагнитного излучения на беспилотнике регистрирует узкий луч от РЛС. В действительности беспилотник смещен на некоторое расстояние по горизонтали от кажущейся точки нахождения объекта.

1) Определить реальное направление на антенну РЛС (угол между вертикалью и прямой, проходящей через РЛС и беспилотник).

Указание: можно представить атмосферу слоистой (количество слоев равной толщины $N = 5$), см. таблицу 2.

Таблица 2. Показатели преломления для каждого слоя по высоте

Слой	Показатель преломления
n_1	1,001
n_2	1,002
n_3	1,003
n_4	1,004
n_5	1,005

А) На какой высоте коэффициент преломления больше, а на какой — меньше? С чем это связано?

Б) Где реальное угловое направление на беспилотник (относительно вертикали) будет больше, на Земле или на Марсе? Почему?

5. Кручу, верчу, сориентироваться хочу!

Изначально коптер висит неподвижно над объектом наблюдения и не вращается. При этом каждый мотор создает момент силы реакции $M = 1 \text{ Н} \cdot \text{м}$, передающийся на корпус (рис. 3).

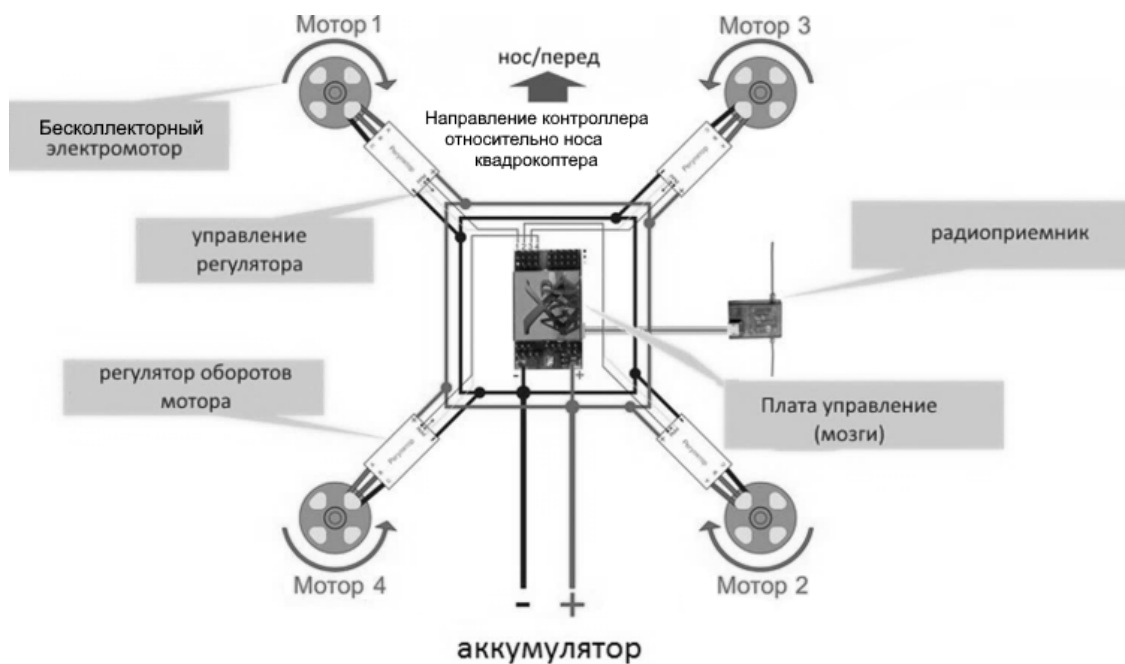


Рис. 3. Квадрокоптер, вид сверху

А) Как надо изменить частоты вращения электромоторов, чтобы развернуть квадрокоптер на месте строго в горизонтальной плоскости (рысканье)? Выбрать и пояснить правильный ответ.

1. Увеличить частоту мотора 1.
2. Одновременно увеличить частоту моторов 1 и 2, уменьшить частоту моторов 3 и 4 (на одинаковое число оборотов).
3. Одновременно увеличить частоту мотора 1, уменьшить частоту мотора 3 на одинаковое число оборотов.
4. Одновременно увеличить частоту моторов 1 и 2 на одинаковое число оборотов, уменьшить частоту мотора 3 на вдвое большее число оборотов.
5. Одновременно увеличить частоту моторов 1 и 3, уменьшить частоту моторов 2 и 4 (на одинаковое число оборотов).

Б) Почему после внезапного изменения числа оборотов винтов и при поддержании в дальнейшем их новых значений на одном и том же уровне ($n_1 = \text{const}$) угловая скорость вращения корпуса в горизонтальной плоскости постепенно достигнет постоянной величины $\Omega_1 \ll \omega_1$ ($\omega_1 = 2\pi n_1$) и перестанет расти?

Указание: допустимо в качестве грубой модели квадрокоптера рассматривать тонкостенный массивный обод, на котором через равные расстояния установлены четыре точечных мотора с винтами.

1) Пусть в ранее выбранном варианте ответа на вопрос А) произошло изменение числа оборотов мотора 1 на 5%, причем за первую секунду корпус коптера набрал кинетическую энергию вращения $W = 1$ Дж (эта энергия не учитывает кинетическую энергию вращения моторов с винтами с угловой скоростью $\omega \gg \Omega$). Считая процесс изменения числа оборотов мгновенным, найти угловую скорость вращения корпуса коптера Ω через секунду после начала маневра.