

ВЛИЯНИЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ПРИМЕНЕНИЕ И БЕЗОПАСНОСТЬ ПОЛЁТА БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ С БОРТОВЫМ РЕТРАНСЛЯТОРОМ РАДИОСИГНАЛА

**А.А. Горбунов, кандидат военных наук, доцент.
Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России.**

А.Ф. Галимов.

Военная академия связи им. маршала Советского Союза С.М. Будённого

Рассматривается влияние ветра на маршруте полёта беспилотного летательного аппарата. Обсуждается влияние ветра на безопасность полёта. Также рассматривается влияние обледенения на применение беспилотного летательного аппарата.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, авиационная метеорология, ветер, обледенение, дальность полёта, безопасность полёта

THE INFLUENCE OF METEOROLOGICAL FACTORS ON THE USE AND FLIGHT SAFETY OF UNMANNED AERIAL VEHICLE WITH SIDE REPEATER RADIO

A.A. Gorbunov. Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia.

A.F. Galimov. The Marshall S.M. Budenny Military academy of telecommunications

The article considers the effect of wind on the flight path of the unmanned aerial vehicle. The effect of wind on flight safety is discussed. It is also examined the impact of icing on unmanned aerial vehicle.

Keywords: unmanned aerial vehicle, aviation meteorology, wind, icing, range of flight, safety of flight

Метеорологические факторы оказывают существенное влияние на взлет, посадку и полет по маршруту летательных аппаратов, не исключением из правил являются и беспилотные летательные аппараты (БПЛА): в одних случаях это влияние благоприятное, в других – крайне нежелательное. Однако в любом случае оператору БПЛА перед вылетом следует тщательно изучить фактические и ожидаемые значения метеорологических параметров.

Из теории авиационной метеорологии [1–3] и теории аэродинамики [4] известно, что параметры режима ветра на маршруте полета БПЛА воздействуют на следующие показатели:

- дальность полета (α) – расстояние, которое может пролететь БПЛА в одном направлении при заданном запасе топлива;
- радиус действия (R) – максимальное расстояние, на которое может удалиться БПЛА от места старта и вернуться назад, не пополняя запаса топлива (GT);
- продолжительность полета (T) – время, за которое БПЛА может функционировать при данном запасе топлива.

Дальность (α) и продолжительность полета (T) при известных значениях километрового (C_K) и часового (C_h) расходов топлива можно определить соотношениями:

$$\alpha = \frac{G_T}{C_K}, T = \frac{G_T}{C_h}. \quad (1)$$

В случае, когда параметры ветра по направлению, скорости и расходу топлива на маршруте полета БПЛА постоянны, его путевая скорость (W) равна:

$$W = \frac{\alpha}{T} = \frac{C_h}{C_K} \text{ или } C_K = \frac{C_h}{W}. \quad (2)$$

Таким образом, представленные формулы позволяют оценить расход топлива БПЛА в зависимости от скорости ветра.

Оценку дальности полета (α) БПЛА в летной практике, как правило, принято производить путем сравнения ее в реальных и стандартных (штиль) условиях. Для стандартных условий скорость БПЛА (V) из ранее приведенных формул (1) и (2) можно представить в виде:

$$V = \frac{C_h}{C_{K_0}} \text{ или } C_{K_0} = \frac{C_h}{V}.$$

Тогда дальность полета БПЛА можно вычислить как:

$$\alpha_0 = \frac{G_T}{C_{K_0}} = \frac{G_T}{C_{K_0}} \times V \times T.$$

Взяв отношение дальности полета при наличии ветра к дальности полета при штиле и учитывая, что

$$W = V \cos\varphi + U \cos\varepsilon,$$

где U – скорость ветра; V – путевая скорость БПЛА без ветра, получим следующее выражение:

$$\frac{\alpha}{\alpha_0} = \frac{G_T}{C_K}, \quad \frac{C_{K_0}}{G_T} = \frac{C_h}{V} \times \frac{W}{C_h} = \frac{W}{V} = \frac{V \cos\varphi + U \cos\varepsilon}{V}, \quad (3)$$

где ε – угол воздействия ветра в обычных условиях; φ – угол воздействия ветра в стандартных условиях.

В результате этого максимальная дальность полета БПЛА будет наблюдаться при попутном ветре ($\varepsilon = 0; \varphi = 0$) и минимальная – при встречном ветре ($\varepsilon = 180^\circ; \varphi = 0$). Для этих предельных случаев выражение (3) будет иметь следующий вид:

$$\left(\frac{\alpha}{\alpha_0}\right)_{\max} = 1 + \frac{U}{V}, \quad \left(\frac{\alpha}{\alpha_0}\right)_{\min} = 1 - \frac{U}{V}. \quad (4)$$

Для определения разницы в значениях дальности полета БПЛА из-за отсутствия учета направления ветра решим конкретный пример. В качестве исходных данных примем $\alpha_0 = 1200$ км; $V=150$ км/ч; $U=36$ км/ч (10 м/с).

Подставив исходные данные в формулы (4), получим:

$$\left(\frac{\alpha}{\alpha_0}\right)_{\max} = 1 + \frac{36}{150} = 1,24, \quad \alpha_{\max} = 1\,240 \text{ км};$$

$$\left(\frac{\alpha}{\alpha_0}\right)_{\min} = 1 - \frac{36}{150} = 0,76, \quad \alpha_{\min} = 760 \text{ км}.$$

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют, что разница в значениях дальности полета БПЛА из-за отсутствия учёта направления ветра довольно существенна и составляет 480 км.

Анализ авиационных происшествий и инцидентов показал, что на безопасность полетов воздушных судов малой размерности существенно влияет режим ветра на маршруте полета [2].

Основное количество лётных происшествий происходит в ходе взлёта и посадки ЛА [4]. При наборе высоты ЛА самолётного типа может попасть в зону более сильного встречного ветра. Это значит, что подъёмная сила самолёта с высотой увеличивается быстрее, чем это необходимо, траектория полёта самолёта оказывается выше расчётной, и при сильных сдвигах ветра самолёт может попасть на закритические углы атаки. В свою очередь, это приводит к срыву потока воздуха с плоскости, сваливанию самолёта на крыло и к возможному столкновению летательного аппарата с землей. В случае сильного бокового ветра существует вероятность бокового сваливания ЛА. Вариант попутного ветра не рассматривается, так как взлёт и посадка ЛА осуществляется только против ветра.

С ЛА вертолётного типа [4] ситуация складывается иначе. Благодаря маховому движению лопастей, значительная доля энергии ветровых возмущений демпфируется, и уровень перегрузки вертолета оказывается в целом сравнительно невысоким. Например, для одних и тех же условий ветра уровень перегрузки вертолета в 1,5–2 раза ниже, чем самолета.

Также в приземном слое в ходе процесса трения воздушных масс о подстилающую поверхность возникает большое количество турбулентностей и завихрений. Вследствие чего возникают кратковременные, локальные изменения движения воздушных масс. Изменение движения ветра обычно сопровождается кратковременным увеличением скорости ветра – «порывы ветра». Порывы ветра в большинстве случаев возникают в местах перепадов высот, границ леса, в местах с плотной застройкой зданий. Следовательно, место запуска и посадки БПЛА следует выбирать на открытых площадках без ветрозащитных полос. На открытых пространствах движение воздушных потоков равномерно как по скорости, так и по направлению.

На рис. 1 представлен обобщенный график зависимости вероятности лётного происшествия с БПЛА самолетного и вертолётного типа от скорости ветра. Исходя из этих графиков, следует, что при скорости ветра более 30 м/с потеря БПЛА гарантирована. При равных условиях скорости ветра БПЛА вертолётного типа более устойчив, чем БПЛА самолётного типа.

Анализируя тактико-технические характеристики перспективных беспилотных ЛА [5, 6] («Типчак», «Дозор-100», «Орлан-10») (табл. 1), видно, что применение БПЛА возможно при максимальной скорости ветра 15 м/с.

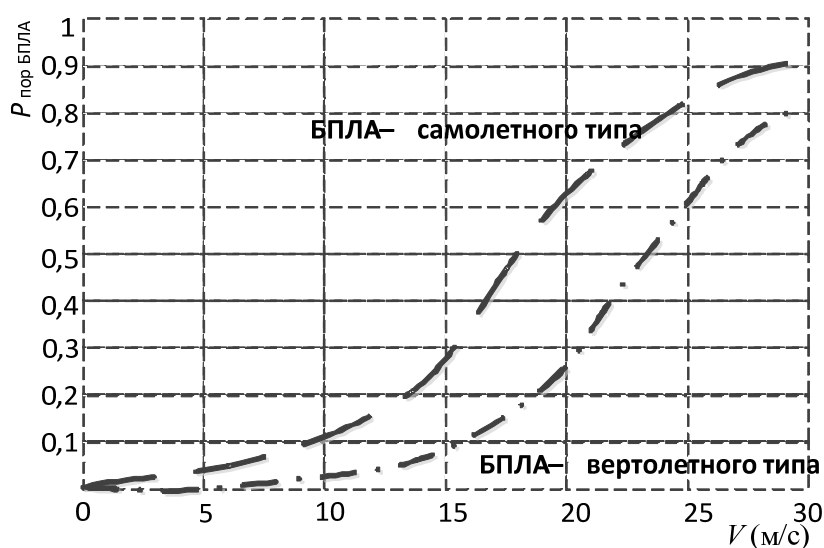


Рис. 1. Графики зависимости вероятности лётного происшествия БПЛА от скорости ветра

Данная скорость ветра позволяет автоматике БПЛА сохранить устойчивость аппарата в воздухе при резких порывах ветра в режиме автономного полёта или дать время на реакцию оператору БПЛА на выравнивание ЛА в режиме дистанционного пилотирования. Данное ограничение вводится с учётом того, что оператор контактирует с БПЛА только визуально, посредством аппаратуры дистанционного управления, что ведёт к увеличению времени реакции оператора на нештатные ситуации. Малый вес БПЛА не даёт ЛА достаточной устойчивости при сильных порывах ветра.

Все разработчики БПЛА устанавливают ограничение максимально допустимого встречного ветра на взлёте и посадке – 15 м/с (табл. 1). Производители легкомоторных самолётов и вертолётов заявляют разрешённую скорость бокового ветра при взлёте и посадке – 6 м/с.

Таблица 1. Ограничения применения лёгких БПЛА по ветру, согласно тактико-техническим характеристикам

Тип БПЛА	Типчак	Орлан-10	Дозор-100
Максимальная лобовая скорость ветра на взлёте/посадке, м/с	10/10	15/15	11/10
Максимальная скорость ветра на маршруте, м/с	15...20	15...20	15...20
Порыв ветра, м/с	до 25	до 25	до 25

Скорость ветра в приземном слое атмосферы неоднородна [7, 8]. Существует так называемый «пограничный слой», в котором происходит изменение скорости движения воздушных масс. Под пограничным слоем понимается приземной слой атмосферы, в котором поверхность земли оказывает тормозящее воздействие на движущую массу воздуха. Возрастание скорости ветра происходит в пределах пограничного слоя, выше пограничного слоя (в свободной атмосфере) скорость ветра постоянна. Толщина пограничного слоя в общем случае зависит от состояния атмосферы, типа местности, широты местности, силы ветра и температуры воздуха. Также приземному слою характерна высокая турбулентность воздушных потоков.

В методике [7] были выполнены расчеты ожидаемых скоростей ветра для трех типов местности – открытого пространства, пригорода и центра крупного города с плотной застройкой. Значения зафиксированных на высоте 10 м в ходе эксперимента скоростей ветра

для открытой местности были равны 1 м/с, 5 м/с и 10 м/с. Изменение по высоте температуры наружного воздуха и барометрического давления представлены в табл. 2.

Таблица 2. **Зависимость температуры и давления от высоты**

Высота, м	Температура, °С				Барометрическое давление, гПа
	холодный период		теплый период		
	параметр А	параметр Б	параметр А	параметр Б	
у земли	-15,0	-26,0	22,3	28,5	990,0
75	-15,5	-26,5	21,8	28,0	981,2
100	-15,7	-26,7	21,7	27,9	978,3
150	-16,0	-27,0	21,3	27,5	972,5
200	-16,3	-27,3	21,0	27,2	966,8
250	-16,6	-27,6	20,7	26,9	961,0
300	-17,0	-28,0	20,4	26,6	955,3
350	-17,3	-28,3	20,0	26,2	949,6
400	-17,6	-28,6	19,7	25,9	943,9
450	-17,9	-28,9	19,4	25,6	938,3
500	-18,3	-29,3	19,1	25,3	932,7
550	-18,6	-29,6	18,7	24,9	927,1
600	-18,9	-29,9	18,4	24,6	921,6

Результаты расчетов методики представлены на рис. 2, 3.

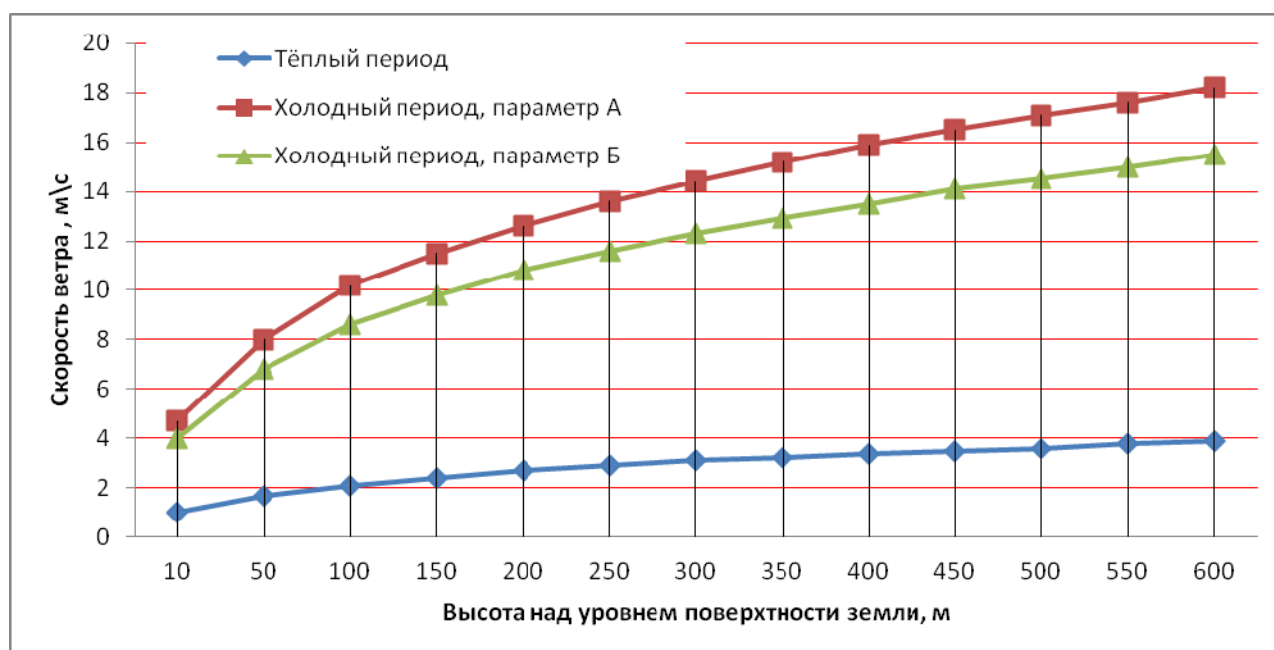


Рис. 2. **График зависимости скорости ветра от высоты над уровнем поверхности земли**

В работе [8] рекомендуется следующая толщина пограничного слоя для рассматриваемого типа местности: для центров крупных городов – 460 м; для условий пригорода и леса (в данном случае под пригородом понимается местность, в которой в радиусе 2 000 м расположена малоэтажная застройка или лесопарковые массивы) – 370 м; для открытой местности – 270 м.

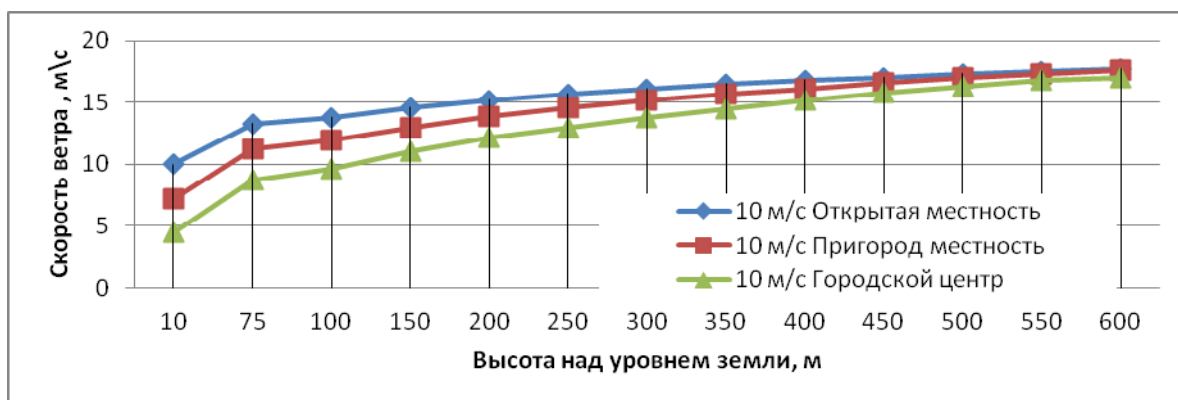


Рис. 3. График изменения скорости ветра по высоте в зависимости от типа местности

Приведем следующий пример. Исходя из статистических данных «Гидрометцентра РФ» и «Гидрометцентра РБ» [9], сила ветра в районе г. Выборг (Карельский перешеек) в 2012 г. имела следующие процентные соотношения, представленные в табл. 3.

Исходя из проведенного анализа ветровой обстановки можно сделать вывод что в 75,2 % времени года малые БПЛА можно применять без каких-либо ограничений, учитывая ветер как поправку для расчёта длины маршрута движения. В 17,3 % времени малые БПЛА можно применять, но вероятность лётного происшествя возрастает. И только в 7,5 % времени применение БПЛА возможно только в случае крайней необходимости или запрещено.

Из табл. 3 видно, что наиболее сложная ветровая обстановка наблюдается в январе и марте, сила ветра более 10 м/с, наблюдается в 29 % и 20 % времени соответственно. Наиболее комфортные условия для применения БПЛА наблюдались в июле месяце, когда скорость ветра не превышала 10 м/с.

Таблица. 3. Повторяемость среднесуточной скорости ветра в районе г. Выборг, Карельский перешеек

Баллы Бофорта	Градации скорости ветра, м/с	Янв.	Фев.	Март	Апр.	Май	Июнь	Июль	Авг.	Сен.	Окт.	Нояб.	Дек.	Среднее значение за год
0-4	0-7,4	38,7	64,3	50,0	90,1	64,6	80,0	100	93,6	86,6	83,9	66,7	83,9	75,2
5	7,5-9,8	32,3	17,6	30,0	3,3	29,0	20,0	0	6,5	13,3	12,9	30,0	12,9	17,3
6	9,9-12,4	29,0	10,7	20,0	6,7	3,2	0	0	0	0	3,2	3,3	3,2	6,6
7	12,5-15,2	0	7,1	0	0	3,2	0	0	0	0	0	0	0	0,9
8	15,3-≥29	За всё время наблюдения не фиксировалось												

Для оценки ветровых воздействий на БПЛА важно знать особенности режима сильных ветров как в свободной атмосфере, так и вблизи земной поверхности. Получение информации по сильным ветрам можно получить в результате многолетних наблюдений, используя сложное метеорологическое оборудование. Поэтому для облегчения работы метеорологических служб используют расчётные методы для определения вероятности возникновения сильных ветров.

Для описания ветровой нагрузки в вероятностном виде применяют метод с распределением Вейбула, при описании значений максимальных скоростей ветра и ветрового давления рекомендуется использовать метод с распределением Гумбеля. Для практического применения больше подходит метод Гандина-Анапольской [1]. В итоге их работы был предложен графический метод расчёта максимальной скорости ветра (рис. 4).

Методика графического расчета была апробирована Л.Е. Анапольской на материале большого числа станций Советского Союза. В подавляющем большинстве случаев точки хорошо ложились на прямую, уже начиная со скорости 6-8 м/с. Во многих случаях точки

хорошо ложилась на прямую во всем интервале наблюдаемых скоростей ветра. Это послужило основанием при выполнении расчетов больших скоростей ветра экстраполировать прямую на графике до значений искомых скоростей (или вероятностей).

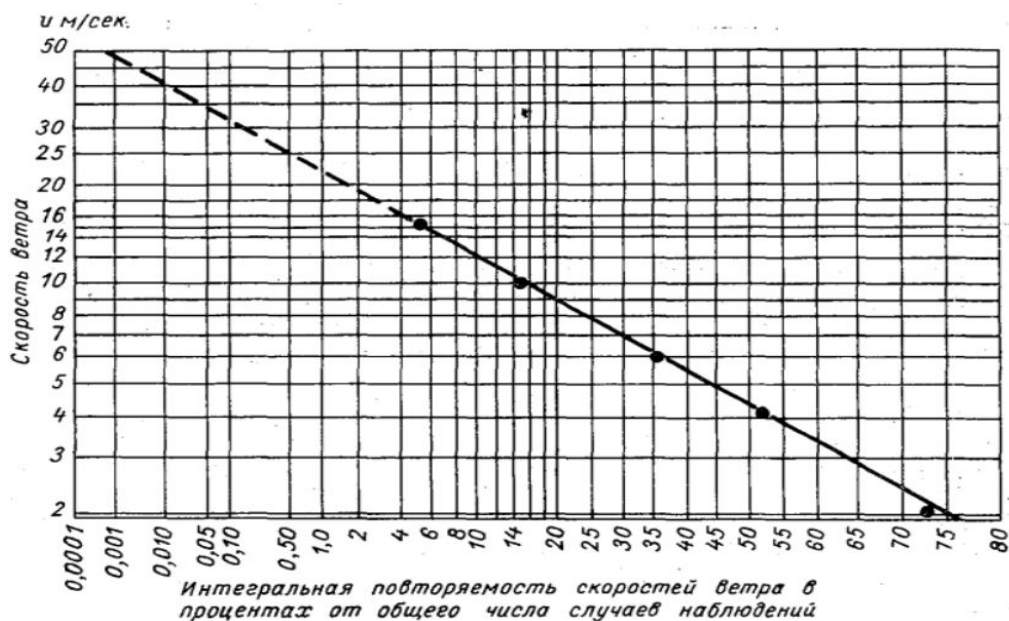


Рис. 4. График для расчета максимальной скорости ветра по методу Гандина-Анапольской

Следует отметить, что обледенение ЛА для малой авиации на сегодняшний день является одной из серьезных проблем [3]. Обледенение в большинстве случаев происходит в воздушной среде, содержащей капли переохлажденной воды, в основном в кучевых или слоистых облаках, в условиях тумана, мороси, дождя, мокрого снега при отрицательной или околонулевой температуре наружного воздуха. Наибольшая вероятность обледенения существует в условиях повышенной влажности воздуха на малых высотах $h < 3$ км в диапазоне температур от 0 до -20 °С и, в особенности, от -5 ° до -10 °С. Входные устройства авиационных двигателей могут подвергаться обледенению и при положительных температурах наружного воздуха (приблизительно до $+5$ °С), так как вследствие адиабатического расширения воздуха во входном устройстве влага конденсируется на его стенках и в последующем замерзает. Так как систем для борьбы с обледенением на малых ЛА не предусмотрено, то необходимо соблюдать следующие правила выполнения полётов:

- поддерживать высокую скорость полёта, так как трение об атмосферу вызывает нагрев плоскостей и препятствует образованию или заставляет наледь распределяться равномерно, не нарушая аэродинамических показателей;
- использовать химические реагенты-противообледенители перед запуском ЛА;
- по возможности исключить подъём ЛА на высоту сформировавшегося облачного фронта [1, 4].

В качестве заключения можно сказать, что метеорологические факторы оказывают существенное влияние на взлет, посадку и полет по маршруту ЛА, не исключением из правил являются и БПЛА.

В ходе применения БПЛА игнорирование метеорологических факторов может привести, в лучшем случае, к неэффективному применению ЛА, в худшем к его потере. Все производители указывают граничные параметры применения ЛА по ветровой нагрузке (табл. 1).

Проведя анализ основных метеорологических влияний для района г. Выборга Карельского перешейка, можно сделать следующие выводы:

- из результатов расчётов и анализа ветров (табл. 3.) видно, что скорость ветра в приземном слое меняется в зависимости от сезона и температуры воздуха;
- в тёплый сезон с апреля по октябрь воздушные массы достаточно стабильны (табл. 3), с увеличением высоты скорость ветра повышается незначительно (рис. 2);
- в холодный сезон с ноября по март воздушные массы воздуха претерпевают значительные трансформации, активно перемешиваются, и средняя скорость ветра составляет 9,8 м/с, с повышением скорости ветра до 13 м/с в 15 % случаев. В феврале месяце в 7 % случаев наблюдалась скорость ветра от 13 до 15 м/с в приземном слое. В холодный сезон значительно изменяется скорость ветра в зависимости от высоты и температуры (рис. 2);
- в диапазоне температур от $+5^{\circ}$ до -15° воздушные массы нестабильны. В ходе дальнейшего снижения температуры изменение скорости ветра стабилизируется.

Особое влияние на полёт БПЛА оказывает пограничный слой. Как видно из рис. 3, скорость ветра резко повышается на высотах до 100 м над всеми типами подстилающей поверхности. Приземный слой также характеризуется высокой турбулентностью. Поэтому пограничный атмосферный слой строго ограничен для полётов лёгкой авиации из-за высокой нестабильности атмосферы.

В ходе применения БПЛА в холодный период необходимо учитывать облачность на маршруте полёта.

При температуре от $+5^{\circ}$ до -10° попадание БПЛА в зону облачности или тумана приведёт к обледенению ЛА, нарушению его аэродинамических, весовых параметров и к потере.

Таким образом, проведя анализ всех данных, можно сделать вывод, что БПЛА строго ограничен в применении. На малых высотах – пограничным слоем, на больших высотах – силой ветра, температурой и влажностью. Данные ограничения уменьшают высоту применения БПЛА, задавая воздушный коридор по высоте (рис. 5).

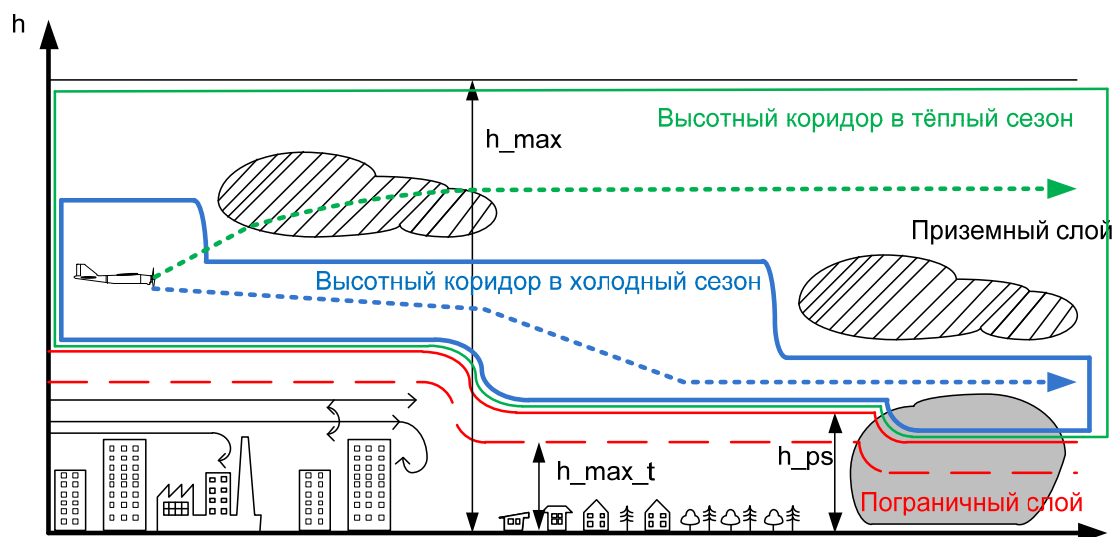


Рис. 5. Схема воздушного коридора БПЛА в зависимости от времени года

Литература

1. Наровлянский Г.Я. Авиационная климатология. Л.: Гидромет. изд-во, 1968. С. 110–112.
2. Карлин Л.Н., Акселевич В.И. Влияние ветра на боевое применение авиации // Авиационная метеорология. 2006. С. 5–10.
3. Позднякова В.А. Практическая авиационная метеорология. Екатеринбург: Уральский УТЦ ГА, 2010.

4. Ромасевич В.Ф. Аэродинамика и динамика полета вертолетов. Сызрань: Сызранское ВВАУЛ, 1982. Т. 1.
5. Ростопчин В.В. Современная классификация беспилотных авиационных систем военного назначения. URL: <http://bp-la.ru/> (дата обращения: 13.11.2015).
6. Беспилотные летательные аппараты bp-la, 2009. URL: <http://www.bp-la.ru> (дата обращения: 10.12.2015).
7. Абрамович А.А. Прогнозирование воздушных потоков: руководство по прогнозированию метеорологических условий. Л.: Лен. типография, 1985. С. 49–50.
8. Табунщиков Ю.А. Аэродинамика высотных зданий // АВОК. 2004. С. 14–23.
9. Гидрометцентр Республика Беларусь. URL: <http://www.pogoda.by/33446> (дата обращения: 19.01.2016).

References

1. Narovlyanskij G.Ya. Aviacionnaya klimatologiya [Aviation Climatology]. L.: Gidromet. izd-vo, 1968. S. 110–112. (In Russ.).
2. Karlin L.N., Akselevich V.I. Vliyanie vetra na boevoe primeneniye aviacii [The impact of wind on the combat use of aviation] // Aviacionnaya meteorologiya. 2006. S. 5–10.
3. Pozdnyakova V.A. Prakticheskaya Aviacionnaya Meteorologiya. [Practical aeronautical meteorology]. Ekaterinburg: Ural'skij UTC GA, 2010.
4. Romasevich V.F. Aehrodinamika i dinamika poleta vertoletov [Aerodynamics and flight dynamics of helicopters] Syzran': Syzranskoe VVAUL, 1982. T. 1.
5. Rostopchin V.V. Sovremennaya klassifikaciya bespilotnyh aviacionnyh sistem voennogo naznacheniya. [Modern classification of unmanned aircraft systems for military use]. URL: <http://bp-la.ru/> (data obrashcheniya: 13.11.2015).
6. Bepilotnye letatel'nye apparaty bp-la, 2009. URL: <http://www.bp-la.ru> (data obrashcheniya: 10.12.2015).
7. Abramovich A.A. Prognozirovanie vozдушnyh potokov Rukovodstvo po prognozirovaniyu meteorologicheskikh uslovij [Prediction of the air flow. Guidelines for predicting weather conditions]. L.: Len. tipografiya, 1985. S. 49–50.
8. Tabunschikov Yu.A. Aerodinamika vyisotnyih zdaniy [Aerodynamics of high-rise buildings] // AVOK. 2004. S. 14–23.
9. Gidromettsentr Respublika Belarus. [Weather Republic of Belarus]. URL: <http://www.pogoda.by/33446> (data obrascheniya: 19.01.2016).