

УДК 629.7.05

ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ МУЛЬТИРОТОРНОГО ТИПА В ЗИМНИЙ ПЕРИОД

М. И. КРИЧЕВЦОВ, ст. преподаватель

Е. Р. АРЕФЬЕВ, преподаватель

Белорусский государственный университет
Минск, Беларусь

Аннотация. Рассматриваются особенности эксплуатации беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) мультироторного типа в условиях отрицательных температур. Основное внимание уделяется влиянию низких температур на аккумуляторные батареи, электронику и конструкционные элементы летательного аппарата. Проведен анализ зависимости времени полета БПЛА от температуры окружающей среды и рассмотрены практические методы подготовки оборудования к эксплуатации в зимний период. Представлены рекомендации по хранению, транспортировке и использованию аккумуляторных батарей, а также меры по повышению эффективности полета при отрицательных температурах.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, комплекс беспилотных летательных аппаратов, квадрокоптер, аккумуляторные батареи, LiPo, эксплуатация в зимний период, температура, время полета, обледенение.

В последние годы беспилотные летательные аппараты мультироторного типа получили широкое распространение в различных сферах деятельности: картографировании, мониторинге местности, поисково-спасательных операциях, а также в военных конфликтах. Одним из факторов, существенно влияющих на эффективность применения БПЛА, являются метеорологические условия, в частности температура окружающей среды.

Эксплуатация БПЛА в зимний период сопровождается рядом проблем, связанных с воздействием низких температур на аккумуляторные батареи, электронные компоненты и механические элементы летательного аппарата. Наиболее уязвимым элементом являются системы энергоснабжения БПЛА – аккумуляторные батареи.

Оптимальная температура эксплуатации наиболее применяемых LiPo-аккумуляторов составляет 15 °С...25 °С, при которой обеспечивается максимальная энергетическая эффективность и стабильность напряжения. При снижении температуры ниже 0 °С наблюдается значительное снижение емкости аккумулятора и увеличение внутреннего сопротивления батареи, что приводит к сокращению времени полета и увеличению вероятности аварийных ситуаций при эксплуатации БПЛА. Для мультироторных БПЛА основными являются литий-полимерные аккумуляторы. Их работа основана на электрохимических реакциях, скорость которых зависит от температуры окружающей среды.

При снижении температуры происходят следующие процессы:

- замедление электрохимических реакций;
- увеличение внутреннего сопротивления аккумулятора;
- снижение отдаваемой мощности;
- падение напряжения под нагрузкой.

Исследования показывают, что при температуре ниже 0 °С фактическая емкость LiPo-аккумуляторов может снижаться до 40 %...70 % от номинальной. При экстремальных температурах (от минус 25 °С до минус 30 °С) возможна потеря до 90 % доступной энергии, что практически исключает нормальную эксплуатацию БПЛА.

Кроме того, снижение температуры приводит к сокращению времени полета. В нормальных условиях большинство квадрокоптеров способно находиться в воздухе 20...25 мин, однако при отрицательных температурах продолжительность полета может снижаться до 10...15 мин. В связи с этим можно рассчитать теоретическую модель влияния температуры на время полета, которая будет определять время полета БПЛА от емкости аккумулятора, потребляемой мощности двигателей и внешних условий.

Базовую зависимость можно представить следующим выражением:

$$T = \frac{C \cdot U \cdot \eta}{P},$$

где T – время полета; C – емкость аккумулятора; U – напряжение батареи; η – коэффициент эффективности; P – средняя потребляемая мощность двигателей.

При этом коэффициент эффективности зависит от температуры окружающей среды и может быть представлен следующим выражением в виде эмпирической (аппроксимирующей) функции:

$$\eta = e^{-((T-20)/27)^2},$$

где T – температура окружающей среды, °С; 20 – температура, при которой эффективность максимальна, °С; 27 – параметр, определяющий ширину кривой (насколько быстро падает эффективность при отклонении температуры).

Таким образом, при снижении температуры происходит экспоненциальное снижение эффективности работы аккумулятора, что можно представить в виде приблизительной зависимости времени полета от температуры окружающей среды (табл. 1).

Табл. 1. Зависимость времени полета от температуры окружающей среды

Температура, °С	Емкость аккумулятора, %	Среднее время полета, мин
+20	100	25
+10	85...90	20...22
0	70...80	15...18
-10	50...60	10...12
-20	40...50	7...10

Дополнительно на время полета влияют:

– скорость и направление ветра;

- масса полезной нагрузки;
- режим полета;
- высота полета.

Например, при температуре 0 °С время полета может сокращаться на 30 %...50 %, особенно при сильном ветре или наличии дополнительной нагрузки.

В табл. 1 демонстрируется нелинейное снижение эффективности аккумуляторов при понижении температуры.

Отдельно стоит рассмотреть подготовку аккумуляторов БПЛА к эксплуатации в зимний период в условиях отрицательных температур, т. к. для обеспечения эффективной эксплуатации БПЛА их необходимо хранить при положительной температуре. В случае отсутствия теплого помещения рекомендуется использовать герметичные контейнеры или кейсы с дополнительным утеплением (на практике широко применяются противоударные транспортировочные кейсы, термоизоляционные контейнеры, одноразовые химические грелки). Использование таких средств позволяет поддерживать рабочую температуру аккумуляторов и предотвращает преждевременную потерю емкости.

Немаловажным фактором является образование конденсата, т. к. при переносе БПЛА из теплого помещения на холодную улицу на поверхности корпуса образуется конденсат. В дальнейшем он может привести к образованию льда и повреждению электронных компонентов.

В связи с этим рекомендуется:

- хранить коптер в контейнере при температуре окружающей среды;
- избегать резких перепадов температуры;
- выдерживать аппарат в транспортировочном кейсе перед запуском.

Также при выходе на позицию запуска необходимо соблюдать температурные условия хранения оборудования.

Рекомендуется использовать:

- один контейнер для транспортировки БПЛА;
- второй контейнер для аккумуляторов.

При этом аккумуляторы следует хранить в тепле, например:

- в карманах одежды;
- в рюкзаке;
- в утепленных подсумках.

Методы увеличения времени полета в зимний период.

Одним из наиболее простых способов увеличения времени полета является предварительный подогрев аккумуляторной батареи. Практика эксплуатации показывает, что эффективным методом является использование химических грелок, закрепленных на корпусе аккумулятора. Некоторые современные модели БПЛА оснащаются встроенной системой подогрева аккумуляторов. Например, ряд профессиональных аппаратов имеет автоматический режим нагрева батареи перед полетом. Однако следует учитывать, что процесс нагрева также потребляет часть энергии аккумулятора.

Важным фактором безопасной эксплуатации БПЛА является контроль ресурса аккумуляторов. Практический опыт показывает, что оптимально исполь-

зовать аккумуляторы, имеющие до 100...120 циклов зарядки, поскольку после этого наблюдается заметное снижение емкости батареи.

Для повышения эффективности эксплуатации БПЛА рекомендуется:

- хранить аккумуляторы в тепле;
- использовать термоизоляционные контейнеры;
- избегать образования конденсата;
- контролировать ресурс батарей;
- применять методы предварительного подогрева аккумуляторов.

Влияние обледенения на работу мультироторных БПЛА.

Одной из основных проблем эксплуатации беспилотных летательных аппаратов мультироторного типа в условиях отрицательных температур является образование льда на элементах конструкции. Обледенение возникает при полетах в условиях отрицательных температур, высокой влажности воздуха, снегопада или тумана. Особенно интенсивно данный процесс проявляется при температурах от 0 °С до минус 10 °С, когда в атмосфере присутствует значительное количество переохлажденных водяных частиц.

Низкие температуры и влажность также могут вызывать:

- запотевание линз камер;
- образование инея;
- ухудшение качества видеосигнала.

Для предотвращения этих явлений рекомендуется использовать:

- защитные фильтры;
- антиконденсатные покрытия;
- постепенную адаптацию оборудования к температуре окружающей среды.

В свою очередь, образование ледяной корки на конструктивных элементах БПЛА может приводить к ряду негативных явлений:

- увеличению массы летательного аппарата;
- нарушению аэродинамических характеристик воздушных винтов;
- снижению эффективности тяги двигателей;
- увеличению энергопотребления и сокращению времени полета;
- возникновению вибраций и дисбаланса пропеллеров;
- повышению риска потери устойчивости и управляемости аппарата.

При этом наиболее уязвимыми элементами конструкции являются:

- лопасти воздушных винтов;
- лучи рамы;
- датчики системы стабилизации;
- камеры и оптические системы;
- элементы антенн и навигационного оборудования.

Даже незначительный слой льда на лопастях пропеллеров может существенно изменить профиль лопасти и ухудшить ее аэродинамические характеристики. В результате снижается создаваемая тяга и увеличивается нагрузка на электродвигатели. При значительном обледенении возможно появление сильной вибрации, которая негативно влияет на работу гироскопов и акселерометров системы стабилизации.

Рекомендации по предотвращению обледенения БПЛА.

Для снижения риска обледенения при эксплуатации БПЛА в зимних условиях рекомендуется соблюдать ряд практических мер.

Перед выполнением полета необходимо:

- тщательно осмотреть пропеллеры и корпус аппарата на наличие снега и льда;
- убедиться в чистоте камер, датчиков и вентиляционных отверстий;
- проверить балансировку пропеллеров;
- при необходимости очистить поверхность аппарата мягкой щеткой или сухой тканью.

Особое внимание следует уделять состоянию воздушных винтов, т. к. именно они наиболее чувствительны к образованию наледи.

Следует избегать выполнения полетов при следующих условиях:

- мокрый снег;
- туман при отрицательной температуре;
- высокая влажность воздуха при температуре около 0 °С;
- переохлажденный дождь.

В подобных условиях риск обледенения значительно возрастает.

При эксплуатации БПЛА в зимний период рекомендуется уменьшать продолжительность полетных заданий. Кратковременные полеты позволяют снизить вероятность накопления льда на элементах конструкции и уменьшают нагрузку на аккумуляторные батареи.

В ряде случаев применяется нанесение на элементы конструкции специальных гидрофобных покрытий, уменьшающих адгезию влаги и образование наледи. Хотя подобные средства не исключают полностью образование льда, они способны существенно снизить интенсивность его накопления.

После завершения полета рекомендуется:

- осмотреть пропеллеры и корпус на наличие льда;
- удалить образовавшуюся наледь и поместить аппарат в герметичный контейнер;
- дать температуре постепенно выровняться;
- извлечь и просушить аппарат при комнатной температуре;
- проверить состояние аккумуляторов и контактов.

Особое внимание следует уделять предотвращению образования конденсата при перемещении БПЛА из холодной среды в теплое помещение.

Таким образом, эксплуатация мультироторных беспилотных летательных аппаратов в зимний период требует учета не только влияния низких температур на аккумуляторные батареи, но и риска образования льда на конструктивных элементах аппарата. Соблюдение рекомендаций по подготовке оборудования, контролю метеоусловий и ограничению времени полета позволяет значительно повысить безопасность эксплуатации БПЛА и снизить вероятность возникновения отказов оборудования.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Остославский, И. В.** Основы эксплуатации беспилотных летательных аппаратов / И. В. Остославский. – М. : Машиностроение, 2020.
2. **Красильщиков, М. Н.** Беспилотные летательные аппараты: теория и практика / М. Н. Красильщиков, Г. Г. Себряков. – М. : ИНФРА-М, 2019.
3. **Austin, R.** Unmanned Aircraft Systems : UAV Design, Development and Deployment / R. Austin. – Wiley, 2018.
4. **Valavanis, K.** Handbook of Unmanned Aerial Vehicles / K. Valavanis, G. Vachtsevanos. – Springer, 2016.

Контакты:

mixas770@ya.ru (Кричевцов Михаил Игоревич);

bsu.mf@bk.ru (Арефьев Евгений Романович).