

УДК 620.179.18; 621.383.8; 535.15

## **Инфракрасный оптоэлектронный преобразователь деформационного состояния несущего винта вертолѐта**

**Жуков С.В.\***, **Данилин А.И.\*\***

*Самарский национальный исследовательский университет*

*имени академика С.П. Королѐва, Московское шоссе, 34, Самара, 443086, Россия*

\*e-mail: [svzhukov@ssau.ru](mailto:svzhukov@ssau.ru)

\*\*e-mail: [aidan@ssau.ru](mailto:aidan@ssau.ru)

*Статья поступила в редакцию 16.02.2019*

### **Аннотация**

Статья посвящена разработке метода и устройства контроля деформационного состояния несущего винта вертолѐта. Предложен дополнительный инфракрасный канал контроля несущего винта. Рассмотрены основы и условия работы предложенного метода и устройства. Приведены естественные и техногенные источники излучения помех и полосы пропускания атмосферы. На основе рассмотренных данных, для последующей разработки датчиков и систем, предложена к использованию часть диапазона спектра инфракрасного диапазона. Представлено описание экспериментального стенда для отработки положений метода и отдельных узлов устройства. Выполнен эксперимент с моделями лопастей изготовленных из различных материалов. Сделаны выводы о применимости и дальнейшем развитии предложенного метода.

**Ключевые слова:** вертолёт, несущий винт, экспериментальный стенд, СВЧ-преобразователь, инфракрасное излучение.

### Введение

Выявление и оперативное устранение конструктивно-технологических недостатков или неисправностей несущего винта вертолётa на ранней стадии их возникновения возможно при точной оценке и знании рабочих деформационных характеристик лопастей несущего винта вертолётa (НВВ). При этом следует отметить, что штатно используемые системы контроля не дают точной и всесторонней оценки состояния несущего винта.

Анализ научно-технической литературы показывает, что для решения этой задачи наиболее перспективным является радиолокационный дискретно-фазовый метод (ДФМ). Сущность ДФМ основана на преобразовании дискретных значений перемещений контролируемых элементов (лопастей), определяемых в пределах периода каждого оборота несущего винта, в пропорциональные временные интервалы, длительности которых подвергаются статистической обработке на интервале от 10 до 100 периодов оборота НВВ, в результате чего определяются максимальное, минимальное и среднее значения контролируемого перемещения за время накопления. Сигналы, на основании которых определяются информационные временные интервалы, формируются в результате приема отраженного от объекта исследования зондирующего излучения в радиоволновом диапазоне [1, 2, 3].

Главная особенность данного способа заключается в облучении зондирующим сигналом только одной лопасти, и исключении возможности нахождения в зоне

облучения одновременно двух и более лопастей. Антенно-фидерная система (АФС) устройства контроля устанавливается на хвостовой балке вертолѐта, как показано на рисунке 1.

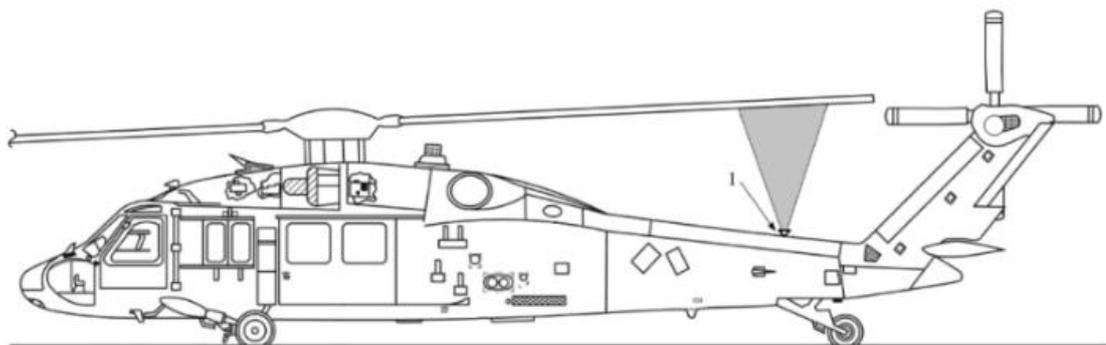


Рисунок 1. Схема расположения АФС устройства на хвостовой балке вертолѐта

Устройство позволяет получать информацию о частоте вращения винта, целостности крепления лопасти и её силового элемента - лонжерона, амплитуде махового колебания, угле скручивания лопасти, а также анализ информационного сигнала позволяет выявлять и контролировать низкочастотные изгибно-крутильные колебания лопастей. Кроме этого измерительная система, реализованная на базе предлагаемого метода, может выявлять несоконусность установки лопастей, сближение лопастей несущих соосных винтов вертолѐта для предотвращения их схлестывания и распознавать такие явления как земной резонанс и флаттер.

Однако, в результате проведенных научно-исследовательских работ было выявлено, что необходим дополнительный канал измерения параметров лопастей в совершенно другом диапазоне электромагнитных колебаний. Цель введения дополнительного канала измерений вызвана необходимостью повышения надежности всей измерительной системы, а также для реализации режима малозаметности (например – режим радиомолчания).

В дублирующем канале, предлагается использовать инфракрасное (ИК) излучение [4], занимающее спектральную область между нижней “красной” границей диапазона видимого излучения ( $\lambda \approx 0,74$  мкм) и микроволновым излучением ( $\lambda \sim 1 \dots 2$  мм).

В отличие от известных устройств, работающих в видимом диапазоне электромагнитного спектра, ИК-система не требует наличия дополнительной или солнечной подсветки объекта контроля, высокой контрастности контролируемого объекта с окружающим фоном и сложной оптической системы [5]. Однако при этом, инфракрасные датчики имеют приемлемую точность и надежность, при сочетании электромагнитной совместимости с радиоэлектронными средствами вертолѐта, работают в широком температурном диапазоне и могут быть исполнены в малогабаритном корпусе.

Для проверки работоспособности предложенного инфракрасного информационного канала использовался экспериментальный стенд [6], позволяющий имитировать условия взаимодействия зондирующего сигнала и вращающейся лопасти и получать информационный сигнал, аналогичный отраженному сигналу от реальной движущейся лопасти. В качестве формирователей излучения на экспериментальном стенде были установлены ИК-преобразователи перемещения фирмы SHARP, в основу работы которых заложен принцип триангуляции.

Эксперимент проводился для различных углов установки моделей лопасти. В результате при помощи механизма регулировки угла установки, были проведены

исследования влияния угла установки моделей лопасти на формирование отраженного потока.

Для изучения влияния естественных помех оптического диапазона на работу ИК датчиков, был проведен эксперимент с детектором инфракрасного излучения входящий в состав многофункционального прибора ST031P и было теоретически рассмотрено влияние естественных источников ИК излучения и оптических свойств атмосферы на работу датчиков.

### Экспериментальная установка

Для проведения эксперимента использовался стенд, в конструкции, которого предусмотрена возможность установки двух бесконтактных преобразователей с возможностью регулировки расстояния до объекта контроля. Фотография экспериментального стенда представлена на рис. 2.

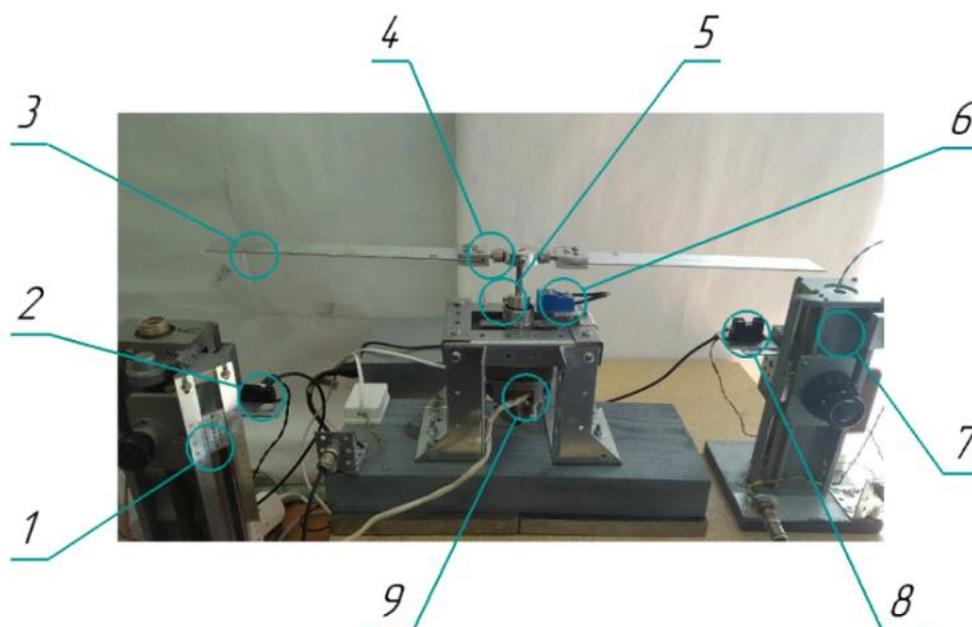


Рисунок 2. Экспериментальный стенд для бесконтактного контроля целостности лопастей вертолёта: 1 – первый установочный механизм бесконтактного датчика, 2 –

первый бесконтактный датчик, 3 – модель лопасти, 4 – механизм регулировки угла установки модели лопасти, 5 – метка оборотного датчика, 6 – оборотный датчик, 7 – второй установочный механизм бесконтактного датчика, 8 – второй бесконтактный датчик, 9 – электродвигатель

Поскольку в настоящее время для изготовления лопастей применяются различные материалы [7, 8], то для проверки работоспособности предлагаемого способа были изготовлены образцы - имитаторы лопастей из углепластика, алюминия, стеклопластика и базальтового волокна, как наиболее распространенных на практике материалов для изготовления лопастей воздушных винтов. Фотография образцов представлена на рис. 3.



Рисунок 3. Экспериментальные образцы модели лопасти, выполненные из углепластика (11), алюминия (12), стеклопластика (21) и базальтового волокна (22)

Инфракрасные преобразователи, использованные в эксперименте, имеют ИК-объектив, который проецирует отражённый ИК-поток излучения на специальную ПЗС-матрицу. На основе данных ПЗС-матрицы определяется угол отражения, который затем используется для расчёта дальности. Различные варианты

отражающей поверхности объекта, температура окружающей среды и времени непрерывной эксплуатации, не оказывают существенного влияния на точность определения дальности до контролируемого объекта вследствие использования метода триангуляции. Для увеличения помехоустойчивости датчиков формируют модулированный по частоте зондирующий ИК-сигнал [9].

Для проведения эксперимента были использованы датчики измерения перемещений GP2Y0A02YK0F и GP2Y0A21YK0F фирмы SHARP. На рис.4 представлен внешний вид задействованных в эксперименте датчиков, а технические характеристики датчиков систематизированы и представлены в табл. 1. Выход каждого из датчиков подключен к цифровому осциллографу для визуального наблюдения и последующего анализа параметров выходного сигнала. В результате проведенного эксперимента были получены амплитудные зависимости выходного сигнала от расстояния между приемо-передающим ИК элементом и объектом контроля – моделью лопасти.

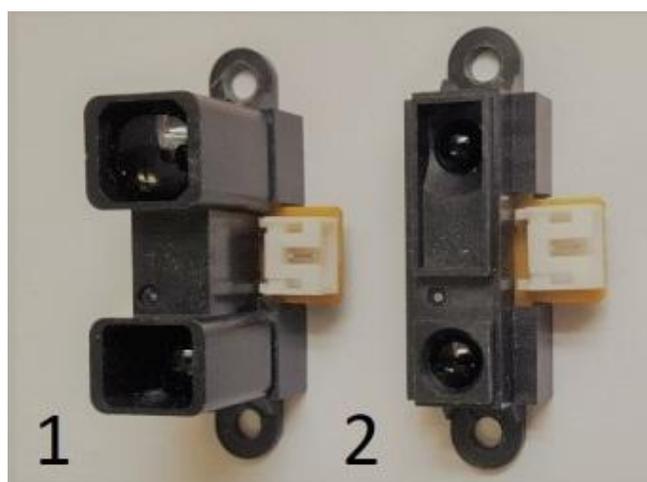


Рисунок 4. ИК датчики измерения расстояния: 1 - датчик измерения расстояния GP2Y0A02YK0F, 2 - датчик измерения расстояния GP2Y0A21YK0F

Таблица 1. Технические характеристики датчиков измерения расстояния

№ п/п	Тип датчика	Диапазон измерений расстояния, см	Тип выходного сигнала	Напряжение питания, В	Значение тока потребления, мА	Длина волны, мкм
1	GP2Y0A02YK0F	20÷150	аналоговый	4.5÷5.5	33	8,5±0,7
2	GP2Y0A21YK0F	10÷80	аналоговый	4.5÷5.5	30	8,7±0,7

### Результаты экспериментов

Эксперимент проводился на дистанциях от 14 до 44 см. Полученные зависимости для всех исследуемых экспериментальных образцов практически одинаковы, и показаны на рис. 5 и 6.

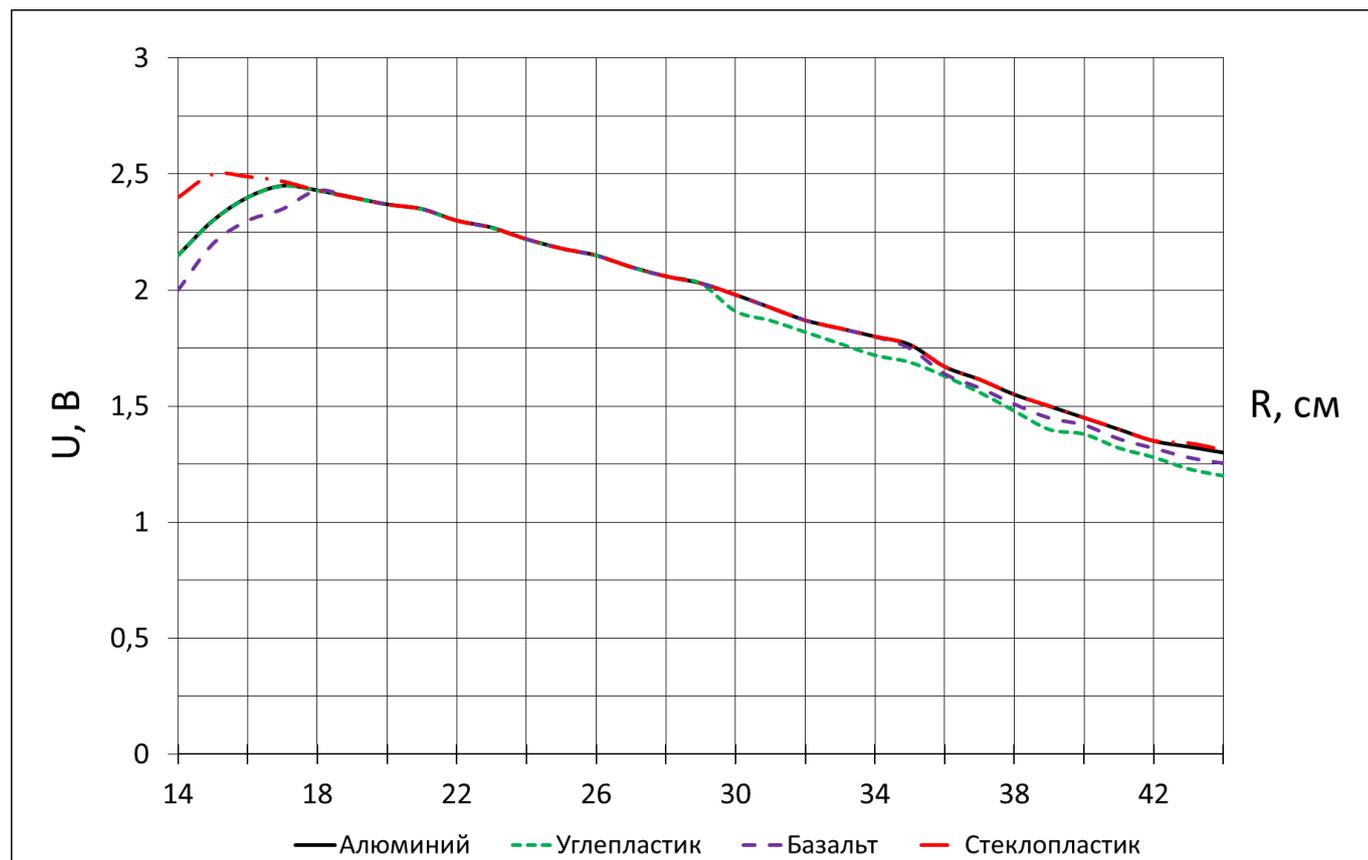


Рисунок 5. Амплитудные характеристики экспериментальных образцов моделей лопасти для GP2Y0A21YK0F

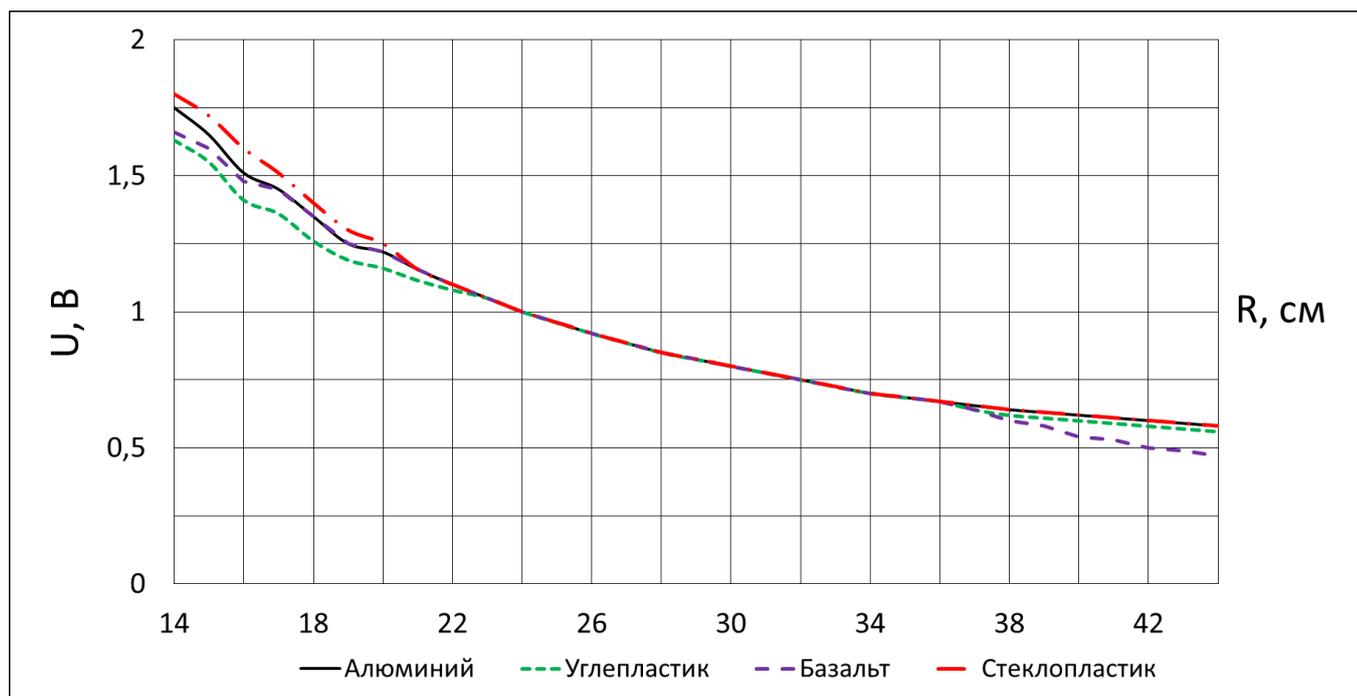


Рисунок 6. Амплитудные характеристики экспериментальных образцов моделей лопасти для GP2Y0A02YK0F

Результаты эксперимента, графически представленные на рис. 5 и 6, показывают, что ИК датчики позволяют взаимодействовать со всеми представленными материалами лопастей, вне зависимости от их цветовой контрастности и различных характеристик отражающей поверхности.

В результате эксперимента, проведенного для исследования влияния угла установки моделей лопасти на формирование отраженного потока, были получены амплитудные характеристики, показывающие зависимость амплитуды сигнала от угла установки модели лопасти. Для датчика GP2Y0A21YK0F испытаний приводились на расстоянии 10 см, а для датчика GP2Y0A02YK0F на расстоянии 20 см. Результаты показаны на рис. 7.

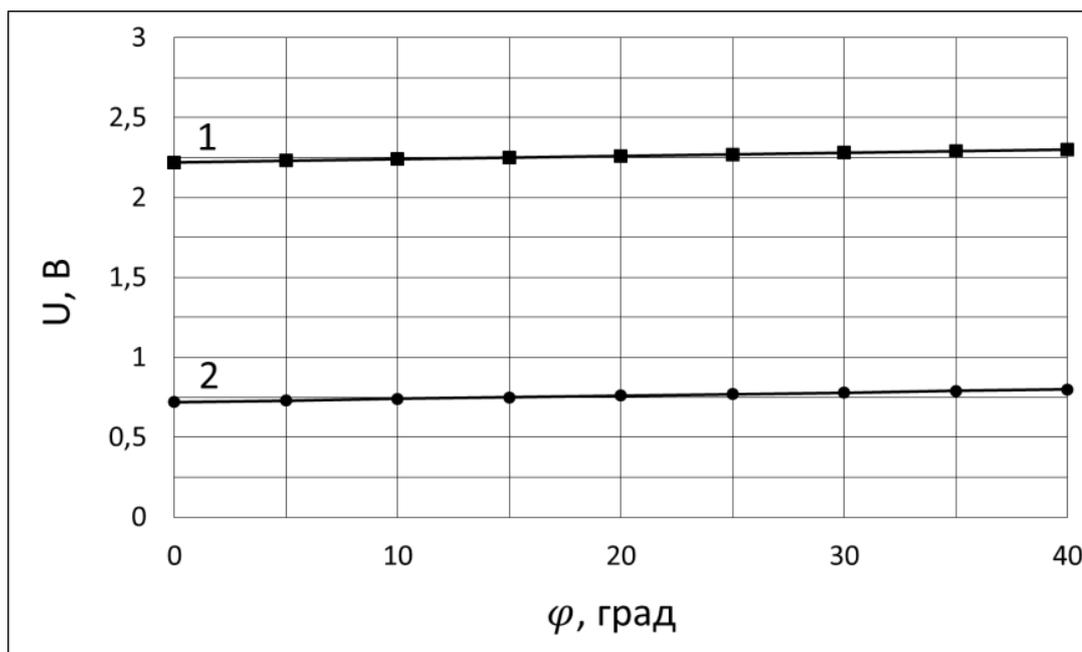


Рисунок 7. Зависимость амплитуды от угла установки образца модели лопасти для GP2Y0A21YK0F (1) и GP2Y0A02YK0F (2)

Полученные экспериментальные результаты, представленные на рис. 7 показывают, что при изменении угла установки модели лопасти уровень сигнала изменяется линейно. Это происходит по той причине, что датчик измеряет минимальное расстояние до цели, в данном случае это задняя кромка модели лопасти, самая приближенная к датчику.

Эксперимент по определению влияния естественных ИК-помех проводился на открытом воздухе, при ясной погоде, в дневное время суток. Замер спектральных характеристик произведён при помощи многофункционального прибора ST031P. Технические характеристики детектора инфракрасного излучения прибора ST031P представлены в табл. 2.

Таблица 2. Технические характеристики детектора инфракрасного излучения прибора ST031 P

Спектральный диапазон, нм	770÷1000
Пороговая чувствительность, Вт/Гц <sup>1/2</sup>	10 <sup>-13</sup>
Угол зрения, град	30
Полоса детектирования, МГц	3

Спектр естественного фона представлен на рис. 8. Спектр излучения широкополосный и занимает всю полосу частот. При проведении эксперимента было обнаружено уменьшение диапазона обнаружения цели, достигающее до 4 см у датчика GP2Y0A21YK0F и до 6 см у датчика GP2Y0A02YK0F. Других изменений в работе датчиков зафиксировано не было.

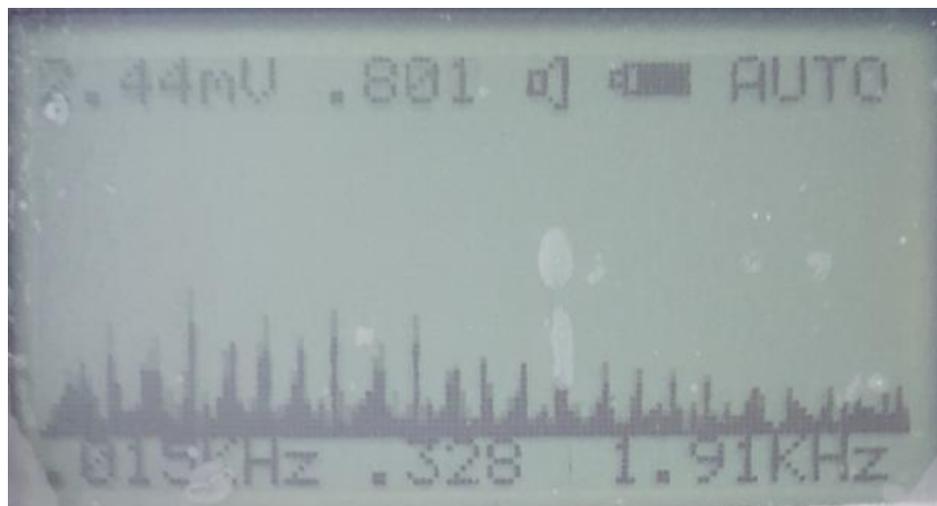


Рисунок 8. Спектр естественного фона

### **Естественные и техногенные источники помех. Влияние оптических свойств атмосферы на прохождение ИК сигнала через неё**

Для разработки приборов и систем, работающих в диапазоне длин волн отличном от рабочего частотного диапазона датчиков рассмотренных выше,

требуются подробные данные об оптических свойствах атмосферы, естественных и техногенных источниках помех.

Летательные аппараты, в частности вертолёт, являются источниками ИК излучения [10]. Основными источниками излучения вертолёта с турбореактивными двигателями (ТРД) являются в основном детали двигателей, нагретые до высокой температуры и струя выхлопных газов [11]. Например, сопло турбины у таких распространенных вертолётов как УН-60А, Ми-8 (Ми-17, Ми-171, Ми-172) и Ми-24 (Ми-35) расположены в 3-х, 4-х метрах от предполагаемого места установки бесконтактного ИК преобразователя, поэтому излучение от ТРД может непосредственно влиять на работу датчика [12,13,14].

Спектр излучения продуктов горения в факеле ТРД аналогичен спектру пламени Бунзеновской горелки (рис. 9). Сильная полоса излучения наблюдается на длине волны 4,3 мкм, а более слабая, но более широкая полоса — на 2,7 мкм. Эта полоса образуется в результате наложения нескольких полос излучения паров  $H_2O$  и  $CO_2$ . Большое число слабых полос имеется в далекой инфракрасной области ( $\lambda > 25$  мкм). При сгорании некоторых топлив образуется хлористый водород, дающий серию полос в районе  $\lambda = 3,5$  мкм.

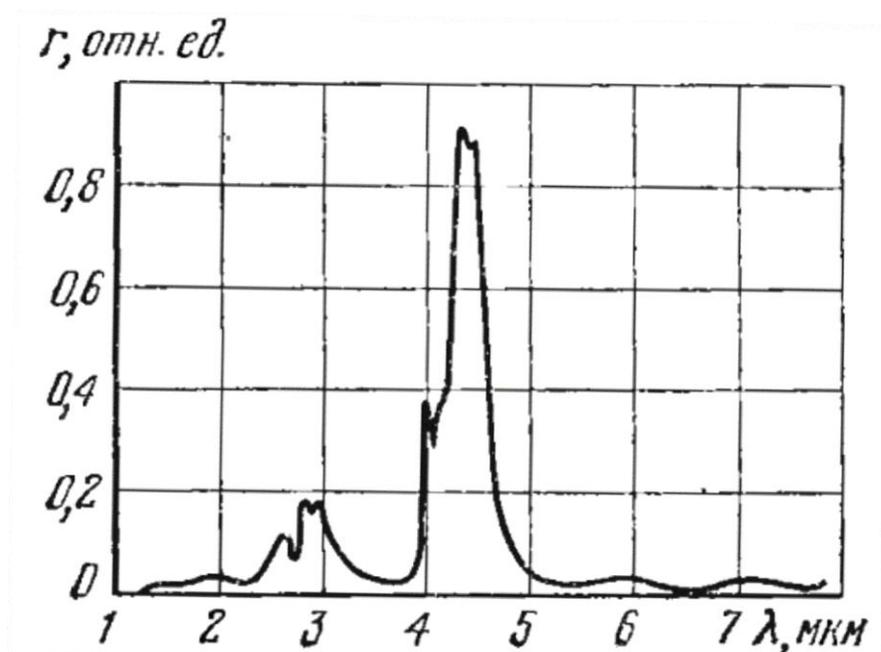


Рисунок 9. Спектр излучения пламени Бунзеновской горелки

В современных ТРД температура газов на выходе турбины двигателя может достигать 500...1000К. Спектральное распределение плотности излучения нагретых деталей двигателя будет приближено к спектру излучения абсолютно черного тела, спектр, которого, в диапазоне температур от 500К до 900К, показан на рис. 10. Приведенные графики показывают, что полный лучистый поток, излучаемый абсолютно черным телом, быстро возрастает с ростом температуры [15].

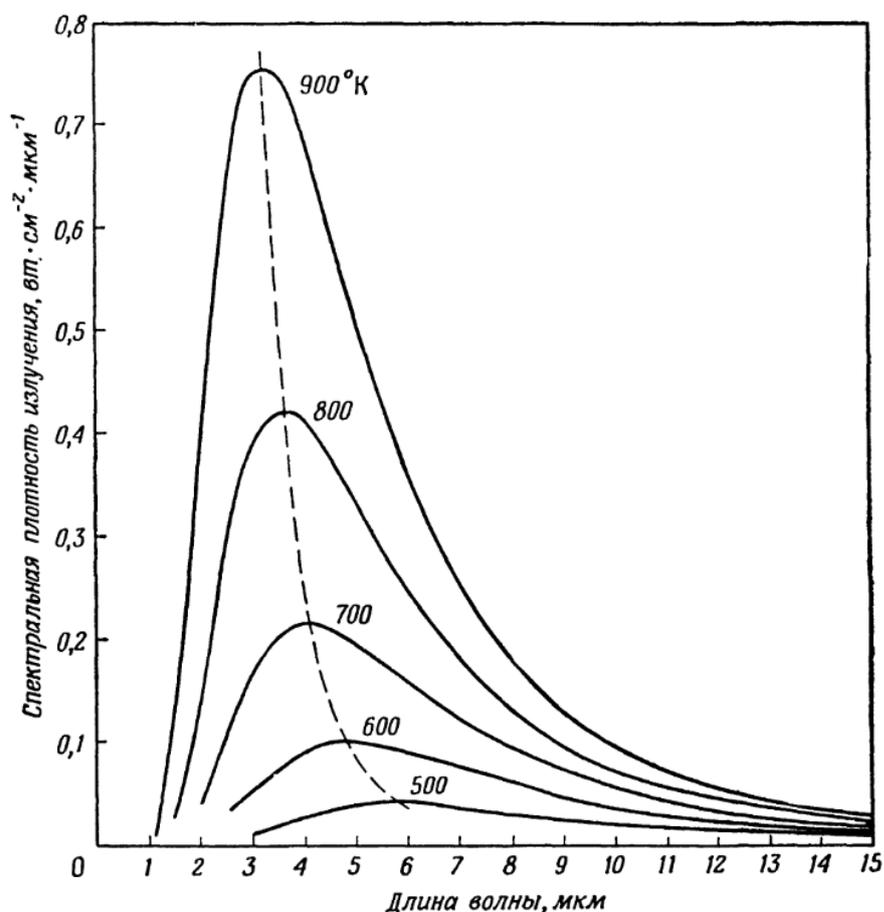


Рисунок 10. Спектральная плотность излучения абсолютно черного тела при некоторых температурах

Источниками естественного ИК излучения могут являться Солнце, Луна, планеты, звезды, облака, атмосфера и поверхность Земли. Наиболее активным из них является Солнце. Около 46% солнечной энергии излучается в инфракрасной области спектра, 47% - в видимой области и 7% - в ультрафиолетовой и рентгеновской областях спектра. Спектральное распределение плотности излучения Солнца за пределами атмосферы подобно спектру излучения абсолютно черного тела с температурой 6000К (рис.11).

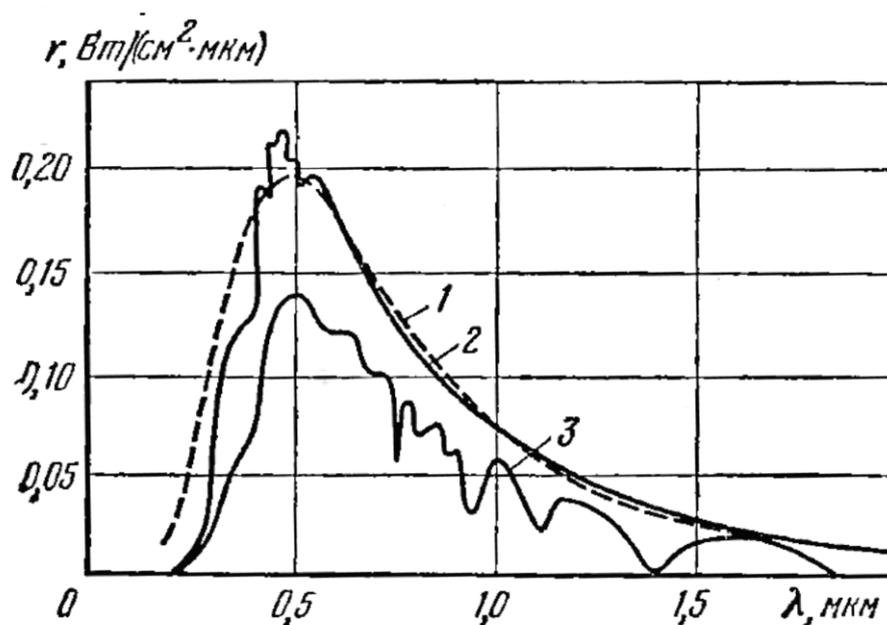


Рисунок 11. Спектральное распределение плотности излучения абсолютно черного тела при температуре 6000К (1) и Солнца за пределами атмосферы (2) и на уровне моря (3)

При прохождении солнечного излучения через атмосферу оно поглощается и рассеивается компонентами атмосферы, в результате чего до поверхности Земли доходит излучение с длинами волн 0,3...3 мкм [16,17].

Атмосфера представляет собой смесь газов, содержащую твердые частицы, находящиеся во взвешенном состоянии. Химический состав и размеры этих частиц колеблются в широких пределах. Входящие в атмосферу газы поглощают ИК излучения, а частицы рассеивают его. В результате этого интенсивность излучения источника ослабляется, и контрастность между фоном и источником уменьшается [15].

Воздействие атмосферы на ИК-излучение может происходить следующими тремя способами:

1. Излучение источника поглощается газами на пути его распространения.
2. Излучение источника преломляется или рассеивается взвешенными частицами.
3. Газы и взвешенные частицы, находящиеся на пути распространения потока излучения, могут сами излучать. Это излучение и его флуктуации могут понижать контрастность изображения.

Экспериментально установлено, что в диапазоне 3...4 мкм практически в любых условиях энергетические яркости собственного и рассеянного излучения одинаковы. При длинах волн более 4 мкм доминирует собственное излучение, а поскольку температура атмосферы находится обычно в пределах 200...300К, максимум интенсивности собственного излучения атмосферы лежит в районе 10 мкм [11].

Собственное излучение облаков и отраженное солнечное и земное излучение, также может влиять на работу ИК датчиков. На рис. 12 показано спектральное распределение излучения, отраженного облаками, максимум которого лежит в области длин волн 0,5 мкм. Нижняя поверхность облака имеет характеристики излучения, приближенные к характеристикам абсолютно черного тела при 0° С, а верхняя поверхность имеет характеристики излучения, подобные характеристикам черного тела уже при температуре около 40° С. Несмотря на низкую светность поверхности облака общее количество энергии, излучаемой облаками, довольно значительно из-за больших размеров [18].

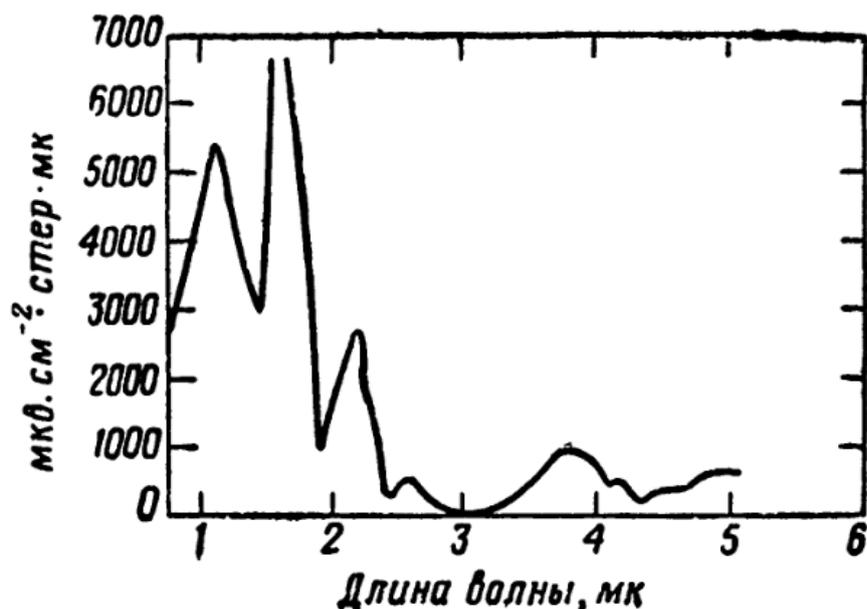


Рисунок 12. Спектральное распределение излучения, отраженного облаками

Для учета и минимизации действия естественных и техногенных помех на проектируемые устройства было оценено прохождение инфракрасного излучения через атмосферу.

При распространении инфракрасного излучения его поглощение в атмосфере осуществляется парами воды, углекислым газом, озоном, метаном. Рассеяние ИК излучения происходит за счет мельчайших частиц, находящихся во взвешенном состоянии в атмосфере. В диапазоне длин волн от 1 мкм и в диапазоне высот до 12 км наибольшее значение имеет селективное поглощение излучения молекулами водяных паров и углекислого газа. Участки, характеризующиеся высоким пропусканием, называют «атмосферными окнами». Наибольшие значения в современной инфракрасной технике имеют окна 0,95... 1,05; 1,15... 1,35; 1,5... 1,8; 2,1 ... 2,4; 3,3 ... 4,2; 4,5 ... 5,1 и 8 ... 13 мкм [12,15,18,19,20].

Учитывая рассмотренные источники излучения естественных и техногенных помех и полосы пропускания атмосферы, можно сделать вывод о том, что

наибольшая плотность ИК помех приходится на полосу с длинами волн от 0.5 мкм до 7 мкм. Поэтому при разработке ИК-устройств можно рекомендовать диапазон длин волн от 11 мкм до 13.5 мкм.

### **Заключение**

В результате проведенной работы показано, что инфракрасный канал может быть использован для контроля деформационного состояния несущего винта вертолѐта. Предложенный метод можно применять на всех типах вертолѐтов с наиболее распространенными материалами для изготовления лопастей.

Количественная оценка спектральных характеристик естественных и техногенных помех и полосы пропускания земной атмосферы позволяет формировать условия для оптимального проектирования контрольно-измерительных ИК-устройств вертолѐтного назначения.

### **Библиографический список**

1. Данилин А.И., Жуков С.В., Грецов А.А., Бояркина У.В. Способ контроля целостности лопастей несущего винта вертолѐта и устройства для его осуществления. Патент № 2593652 РФ. Бюлл. № 22, 14.07.2016.
2. Жуков С.В., Данилин А.И., Попов М.С. Математическое описание взаимодействия зондирующего СВЧ-сигнала с лопастью несущего винта вертолѐта // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2016. Т. 15. № 3. С. 178 - 188.

3. Zhukov S.V., Danilin A.I. A Noncontact System for Monitoring of in-service Condition of Helicopter Main Rotor Blades // IEEE Xplore. Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology 2018 (USBEREIT), 2018, pp. 260 - 262.
4. Брамсон М.А. Инфракрасное излучение нагретых тел. - М.: Наука, 1964. – 221 с.
5. Данилин А.И., Жуков С.В. Оптоэлектронные системы определения деформационного состояния несущего винта вертолѐта // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18. № 4 (6). С. 1307 - 1314.
6. Данилин А.И., Жуков С.В. Экспериментальный стенд бесконтактного контроля целостности лопастей вертолѐта // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18. № 4(6). С. 1303 - 1306.
7. Резниченко В.И. Изготовление лопастей вертолетов из неметаллических материалов. - М: МАИ, 1977. – 60 с.
8. Слюсарь Б.Н., Флек М.Б., Гольдберг Е.С. и др. Технология вертолетостроения. Технология производства лопастей вертолетов и авиационных конструкций из полимерных композиционных материалов – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦ РАИ, 2013. – 213 с.
9. Головки С.В., Кононенко С.В., Романенко Н.Г. Технологическая схема экспериментальной установки отслеживания положения судна на базе микропроцессорных устройств // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2014. № 4. С. 7 - 16.

10. Нестеров М.С., Попело В.Д. Дополнительная характеристика для нормирования инфракрасной заметности летательных аппаратов // Труды МАИ. 2017. № 93. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=80273>
11. Криксунов Л.З. Справочник по основам инфракрасной техники. - М.: Советское Радио, 1978. – 400 с.
12. Technical manual. Operator's manual for UH-60A, UH-60L and EH-60A helicopters. TM 1-1520-237-10, Washington, D.C.: Department of the Army. Headquarters, 30 September 2002, Chapter 2 - 97.
13. Данилов В.А. Вертолёт Ми-8: Устройство и техническое обслуживание. - М.: Транспорт, 1988. – 278 с.
14. Джонсон У. Теория вертолета. - М.: Мир, 1983. – 503 с.
15. Хадсон Р.Д. Инфракрасные системы. - М.: Мир, 1972. – 534 с.
16. Круз П., Макглоулин Л., Макквистан Р. Основы инфракрасной техники. - М.: Воениздат, 1964. – 461 с.
17. Vignola F., Michalsky J., Stoffel T. Solar and infrared radiation measurements, New York: CRC Press Taylor & Francis Group, 2012, 406 p.
18. Джемисон Дж.Э., Мак-Фи Р.Х., Пласс Дж. Н., Грубе Р.Г., Ричардс М. Р. Дж. Физика и техника инфракрасного излучения. - М.: Советское Радио, 1965. – 642 с.
19. Буй Ч.Т., Марин Д.В., Расторгуев В.В. Сравнение ослабления электромагнитных волн миллиметрового и инфракрасного диапазонов в гидрометеорах и пыли // Труды МАИ. 2015. № 84. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=63128>

20. Корнакова О.В. Помехоустойчивость фотоприёмного устройства на основе HgCdTe при воздействии лазерного излучения инфракрасного диапазона длин волн // Труды МАИ. 2011. № 45. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=25415>