

03

## Двигательная электризация летательных аппаратов как источник радиопомех

© А.А. Варфоломеев<sup>2</sup>, М.Е. Гуцин<sup>1</sup>, С.В. Коробков<sup>1</sup>,  
А.В. Костров<sup>1</sup>, Ю.П. Палочкин<sup>3</sup>, С.Э. Привер<sup>1</sup>,  
Д.А. Одзерихо<sup>1</sup>, А.В. Стриковский<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт прикладной физики РАН (ИПФ РАН), Нижний Новгород

<sup>2</sup> ОАО „Роствертол“, Ростов-на-Дону

<sup>3</sup> Научно-производственное предприятие „ПРИМА“ (ООО НПП „ПРИМА“),  
Нижний Новгород

Поступило в Редакцию 15 августа 2014 г.

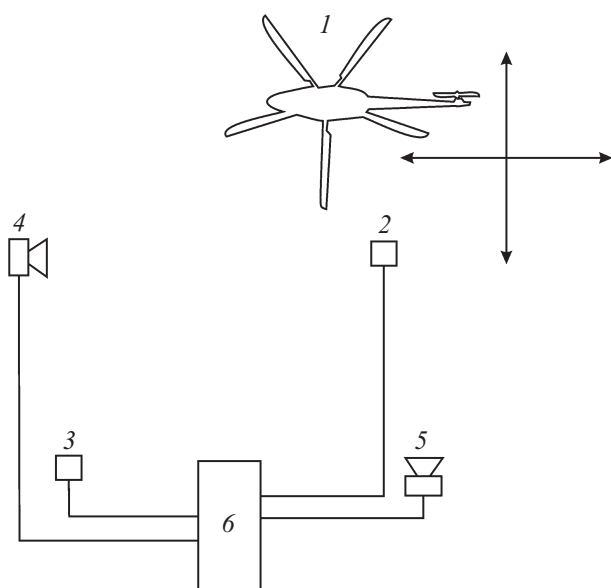
Впервые выполнены полевые измерения квазистатических электрических полей, возникающих вследствие электризации низкоскоростных маловысотных летательных аппаратов (вертолетов) в полете. Установлено, что электризация вертолетов с газотурбинными силовыми установками носит двигательный характер: накопление статического положительного заряда на корпусе обусловлено униполярной, отрицательно заряженной, струей выхлопных газов. Оценен статический положительный потенциал фюзеляжа, который у отдельных моделей достигает  $+30 - +35$  kV относительно земли. При использовании в конструкции вертолетов диэлектрических и композитных материалов, сопровождаемом электрической изоляцией отдельных частей аппарата от фюзеляжа, происходит дифференциальная электризация, которая, с учетом высокого абсолютного значения потенциала фюзеляжа, приводит к высоковольтным разрядам, являющимся источником интенсивных радиопомех в полосе частот от единиц до нескольких сотен МГц.

Исследование явлений электризации авиационной и космической техники в полете крайне важно для решения широкого спектра фундаментальных и прикладных задач. К фундаментальным проблемам относятся, например, физические механизмы разделения и накопления некомпенсированных статических зарядов на борту атмосферного летательного аппарата (ЛА) или космического аппарата (КА) [1–5]. Важнейшими прикладными задачами являются прогноз и устранение негативных последствий электризации аппаратов в полете, включая возникновение квазистатических электрических полей высокой напря-

женности и генерацию интенсивных электромагнитных шумов, обусловленных разрядными процессами, развивающихся вблизи ЛА и КА вследствие их электризации [6,7]. Подобные разрядные процессы, с одной стороны, могут приводить к механическим повреждениям КА или ЛА, с другой стороны, за счет возбуждения широкополосных электромагнитных шумов, к снижению качества радиосвязи с КА или ЛА, вплоть до ее полного исчезновения. Последняя проблема — одна из наиболее актуальных, поскольку сохранение надежности радиосвязи с современными КА и ЛА необходимо для нормального функционирования бортовых систем, включая системы навигации, обеспечения жизнеспособности беспилотных аппаратов и т. д.

В последнее время особую актуальность исследования эффектов электризации ЛА в полете приобрели в связи с повсеместным использованием в авиастроении легких и технологичных диэлектрических и композитных материалов. При несомненных достоинствах таких материалов их высокое электрическое сопротивление может способствовать дифференциальной электризации различных частей ЛА в полете, результатом которой являются высоковольтные пробой, которые, в свою очередь, являются источником интенсивных ради шумов. Исследования, которым посвящена данная работа, были стимулированы обнаружением интенсивных электромагнитных помех в антенных трактах низкоскоростных винтовых ЛА с газотурбинными силовыми установками (вертолетов) после их доработки с использованием диэлектрических и композитных материалов. С помощью разработанных коллективом авторов электрических датчиков были проведены полевые измерения квазистатических электрических полей ЛА (вертолетов), обусловленных электризацией в полете, оценены значения статического потенциала ЛА. Также были установлены характеристики широкополосных электромагнитных помех, обусловленных разрядными процессами на борту, и локализованы их основные источники.

Исследования процессов генерации радиопомех и электризации ЛА производились в летний сезон, в ясную погоду, при температуре воздуха  $+25 - +35^{\circ}\text{C}$  и относительной влажности 70–80%. Спектральные измерения электромагнитных шумов, возникающих в результате разрядных процессов на борту ЛА, производились с помощью цифрового анализатора спектра „Rohde & Schwarz“, FSH-4, подключаемого к штатному бортовому антенному устройству диапазона МВ (полоса 30–400 МГц). Наличие или отсутствие помехи,

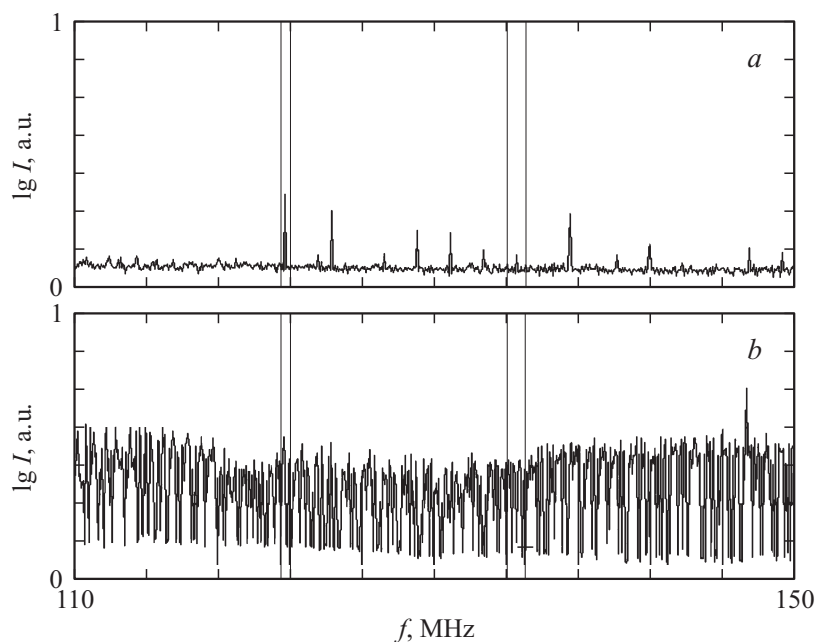


**Рис. 1.** Схема полевых измерений вертикальной компоненты электрического поля, создаваемого ЛА в результате электризации: 1 — ЛА, 2 — датчик постоянного электрического поля, 3 — датчик постоянного фонового электрического поля, 4, 5 — фотокамеры, 6 — пункт синхронизации и сбора данных.

обусловленной электрическими разрядами, также контролировалось по шумам в речевом канале в телефонах экипажа ЛА. Для измерения электрических полей, обусловленных электризацией корпуса ЛА, использовалась схема, приведенная на рис. 1. Датчики электрического поля 2 и 3 жестко фиксировались на поле. Датчик 2 использовался для измерений постоянной составляющей электрического поля в полосе  $0 \dots 50$  Hz, формируемого ЛА, датчик 3 устанавливался на расстоянии около 100 м от зоны измерений, с его помощью регистрировалось невозмущенное (фоновое) электрическое поле, и показания этого датчика использовались в качестве опорного сигнала. Оба датчика запитывались от аккумуляторов напряжением 12 V, сигналы с датчиков по экранированным коаксиальным кабелям РК50 передавались на входы модуля АЦП-ЦАП USB-3000, установленного в кунге на базе

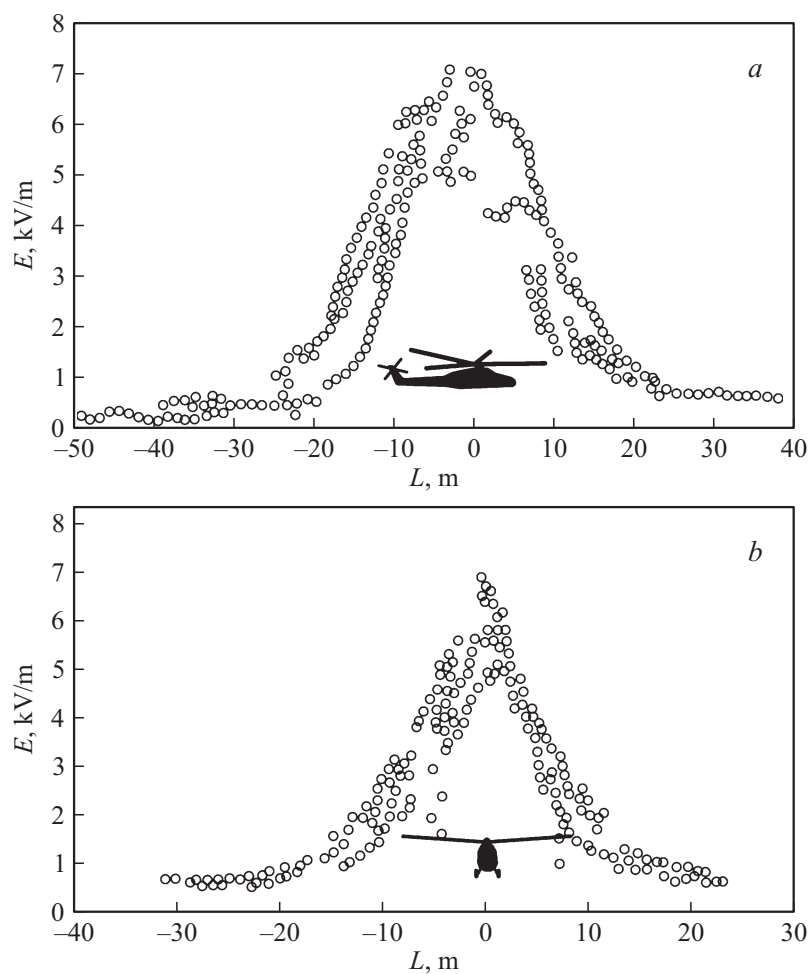
автомобиля ГАЗ-66 б, и после обработки записывались на жесткий диск ПК. Период опроса датчиков составлял 8 s, из которых в течение первых 5 s производилась запись сигналов с датчиков модулем АЦП с частотой выборки 5 kHz (1.66 kHz на 3 канала сбора), а в течение оставшихся 3 s производились считывание, запись и предварительная обработка сигналов с целью оперативной визуализации показаний. Для измерения поперечной структуры электрического поля ЛА 1 перемещался с малой скоростью (около 1 m/s) на высоте 4–8 m. По полетному заданию ЛА на малой высоте подходил к позиции датчика 2, центрировал фюзеляж над датчиком, последовательно выполнял 3 продольных смещения („вперед“–„назад“–„вперед“), 3 поперечных смещения („влево“–„вправо“–„влево“), затем, зафиксировав центр фюзеляжа над датчиком, со скоростью порядка 0.5 m/s поднимался на высоту 100 m и уходил из зоны измерений. Для контроля перемещения ЛА синхронно с опросом датчиков производилась двухпозиционная фотосъемка с помощью пары цифровых фотоаппаратов „Canon“ 4, 5, на синхронизационные входы которых в начале интервала опроса подавались прямоугольные импульсы напряжения амплитудой 5 V и длительностью 0.5 s, сформированные с помощью модуля ЦАП. Для точного определения положения ЛА относительно датчиков использовались средства автоматизированной графической обработки растровых фотоизображений.

Эксперименты показывают, что в условиях генерации радиопомех ЛА создает постоянное электрическое поле, направление которого соответствует накоплению на фюзеляже зарядов положительного знака, а абсолютное значение на уровне земли — порядка нескольких kV/m. Типичный спектр помех в приемном тракте радиостанции ЛА диапазона МВ представлен на рис. 2, максимальная интенсивность шумов отмечена в полосе от 30 до 150 МГц. Помехи отсутствуют, когда ЛА с включенной силовой установкой находится на земле, и появляются через несколько десятков секунд после взлета ЛА, что указывает на связь генерации шумов с накоплением статических зарядов на корпусе ЛА в полете. Для проверки этой связи проводились контрольные эксперименты, в которых с борта ЛА на землю сбрасывался удлинитель заземления (металлическая цепь). Синхронные измерения уровня радишумов и постоянного электрического поля, создаваемого зарядами на корпусе ЛА, показали, что в момент касания цепью поверхности летного поля уровень помех скачкообразно снижался до



**Рис. 2.** Типичные спектры электромагнитных помех, регистрируемых в приемном тракте штатного бортового антенного устройства диапазона ДМВ, которые обусловлены пробоями в результате дифференциальной электризации фюзеляжа и деталей винтов: *a* — вертолет на земле с включенными двигателями, помехи нет; *b* — вертолет в полете, помеха есть.

нуля и одновременно исчезало поле статических зарядов на фюзеляже; таким образом, связь помех с электризацией ЛА однозначно доказана. Пример пространственной структуры электрического поля, формируемого ЛА, показан на рис. 3. По данным измерений можно оценить значение статического потенциала фюзеляжа ЛА относительно земли, которое для разных моделей ЛА изменяется от нескольких единиц до 30–35 kV (рис. 3). Датчик электрического поля измерял полное поле, складывающееся из фонового поля и собственно поля зарядов ЛА. Основной вклад в электрическое поле ЛА дают заряды положительного знака, скапливающиеся на фюзеляже, пространственное распределение



**Рис. 3.** Распределение вертикальной компоненты напряженности электрического поля, создаваемого статическими зарядами на корпусе ЛА, при висении на высоте 5 м: *a* — вдоль фюзеляжа ЛА, *b* — поперек фюзеляжа ЛА. Приводятся результаты по 3 последовательным пролетам ЛА над стационарным датчиком, установленным на поверхности земли.

поля имеет колоколообразный характер с максимумом по центру фюзеляжа. В то же время позади ЛА, в направлении выхлопа двигателей, электрическое поле оказывается ниже фонового значения (рис. 3, а), что обусловлено отрицательным объемным пространственным зарядом, выносимым струей выхлопных газов.

Очевидно, накопление статических зарядов на фюзеляже ЛА обусловлено механизмом двигательной электризации, а именно выносом некомпенсированного заряда потоком выхлопных газов двигателя или униполярной струей [2]. Контрольные эксперименты, в которых датчик постоянного электрического поля устанавливался в 50 см от выхлопного насадка ЛА с включенной силовой установкой на земле, указывают на то, что выхлопные газы ЛА выносят некомпенсированный отрицательный заряд. По нашему мнению, ключевую роль в формировании униполярной струи и электризации фюзеляжа КА играют субмикронные частицы сажи — несгоревшие остатки углеводородного топлива, заряжающиеся в камере сгорания газотурбинного двигателя, что подтверждается в ряде публикаций [3,4]. Использование в конструкции ЛА диэлектрических и композитных материалов приводит к изоляции отдельных металлических деталей (в первую очередь — деталей несущего и рулевого винтов ЛА) от фюзеляжа и соответственно их дифференциальной электризации. Абсолютное значение потенциала на фюзеляже достаточно высоко (десятки кВ), в результате между изолированными металлическими деталями ЛА и другими деталями, гальванически связанными с фюзеляжем, заряженными до различных потенциалов, легко развиваются пробой, которые являются источником радиопомех. У цельнометаллических ЛА все детали эквипотенциальны фюзеляжу и при том же значении статического потенциала фюзеляжа пробой не развивается. Уточненная модель двигательной электризации ЛА и сценарий развития электрических разрядов будут рассмотрены в последующих публикациях.

Таким образом, впервые в РФ исследовано явление двигательной электризации низкоскоростных ЛА (вертолетов) с газотурбинными силовыми установками; по результатам полевых измерений оценены статические потенциалы фюзеляжа, достигающие нескольких десятков киловольт. Установлено, что при использовании в конструкции ЛА диэлектрических и композитных материалов дифференциальная электризация отдельных частей ЛА приводит к высоковольтным пробоям

на корпусе, являющимся источником радиопомех в полосе частот от нескольких десятков до нескольких сотен МГц.

Авторы выражают благодарность коллективу ОАО „Роствертол“ за помощь в организации и проведении полевых измерений.

Данная работа выполнена при поддержке гранта правительства Российской Федерации (договор № 14.В25.31.0023).

## Список литературы

- [1] Пинчук В.А. // ЖТФ. 1997. Т. 67. В. 8. С. 21–26.
- [2] Нагель Ю.А. // ЖТФ. 1999. Т. 69. В. 8. С. 55–59.
- [3] Ватажин А.Б., Старик А.М., Холицевникова Е.К. // Изв. РАН. МЖГ. 2004. Т. 3. С. 34–43.
- [4] Sorokin A., Arnold F. // Atmospheric Environment. 2004. V. 38. N 17. P. 2611–2618.
- [5] Haverkamp H., Wilhelm S., Sorokin S., Arnold F. // Atmospheric Environment. 2004. V. 38. N 18. P. 2879–2884.
- [6] Ватажин А.Б., Голенцов Д.А., Лихтер В.А. // Изв. РАН. МЖГ. 2006. Т. 5. С. 152–159.
- [7] Темников А.Г., Гилязов М.З., Матвеев Д.А., Воронкова А.Ю., Черненко Л.Л., Орлов А.В. // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37. В. 18. С. 7–16.