

04.1

## Исследование влияния вида молниеотвода на спектр электромагнитных помех на антенне под моделью носового обтекателя самолета с использованием искусственной грозовой ячейки

© А.Г. Темников, Л.Л. Черненский, А.В. Орлов, Н.Ю. Лысов, О.С. Белова, Д.И. Ковалев, Т.К. Кившар

Национальный исследовательский университет „МЭИ“, Москва, Россия  
E-mail: TemnikovAG@mpei.ru

Поступило в Редакцию 14 мая 2021 г.

В окончательной редакции 13 июля 2021 г.

Принято к публикации 26 июля 2021 г.

Представлены результаты физического моделирования влияния полосовых и сегментных молниеотводов на спектр электромагнитных помех на антенне под моделью носового обтекателя самолета при воздействии искусственной грозовой ячейки. Показано, что использование сегментных молниеотводов приводит к появлению на антенне сигналов с частотами до единиц гигагерц в спектре. Установлена связь между спектром сигналов на антенне и спектральными характеристиками импульсов тока на молниеотводе. Выявлено влияние разрядов по поверхности обтекателя и между сегментами на спектр электромагнитных помех на антенне под обтекателем.

**Ключевые слова:** молния, полосовые и сегментные молниеотводы, модель носового обтекателя самолета, искусственная грозовая ячейка, вейвлетный спектр, разряд.

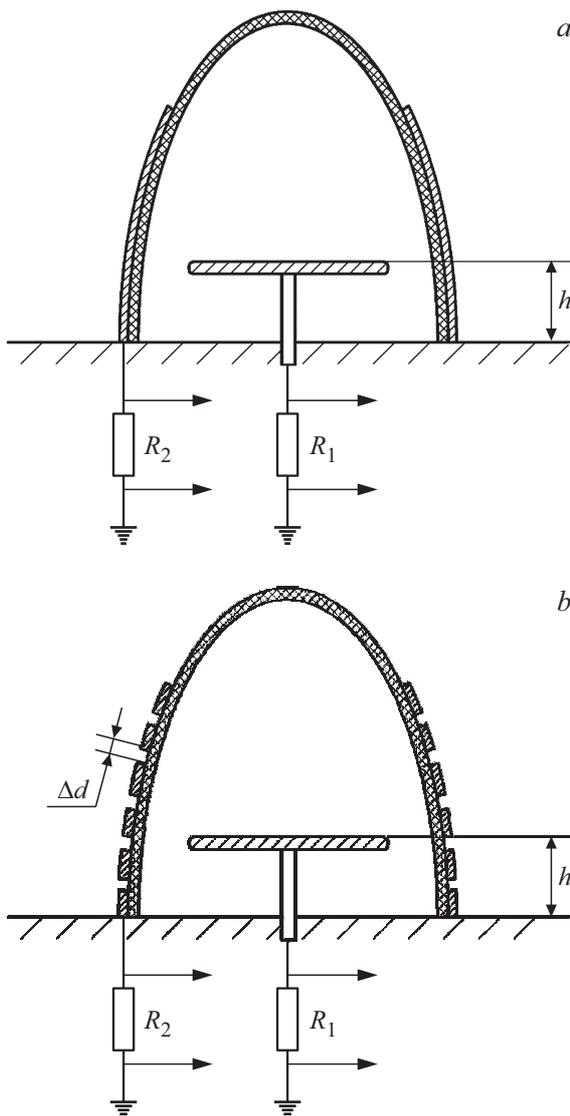
DOI: 10.21883/PJTF.2021.21.51631.18871

Более трети ударов молнии в самолет приходится в его носовую часть, в которой расположен носовой диэлектрический обтекатель, назначением которого является защита антенных устройств радионавигационного оборудования от воздействия окружающей среды в условиях полета [1–3]. Для молниезащиты носовых обтекателей применяются в основном сплошные полосовые молниеотводы (жесткие шины) и сегментные молниеотводы [1,3–5]. При воздействии грозовых облаков и молнии по поверхности обтекателя и с молниеотводов формируются разряды, которые могут наводить на антенне различные по спектру сигналы. Воздействие электромагнитного поля молнии на установленное под обтекателем оборудование происходит в широком частотном диапазоне [6]. Особенно опасными будут те наводки, которые в своем составе будут иметь частоты, близкие к рабочим частотам радара под обтекателем и связанного с ним вычислительного оборудования. Такие наводки могут приводить к нарушению нормального функционирования навигационного оборудования и возможным аварийным ситуациям [5,7,8].

Физическое моделирование с использованием искусственной грозовой ячейки позволяет выявить возможное специфическое влияние способа молниезащиты носового обтекателя самолета (сплошными полосовыми или сегментными молниеотводами) на спектр сигналов, регистрируемых на модели антенны при формировании разряда с моделей молниеотводов, по поверхностям обтекателя и внутри него. Это позволит определить ключевые механизмы такого влияния и предложить перспективные пути коррекции молниезащиты носового

обтекателя для снижения интенсивности наводимого на антенне сигнала в области частот, опасных для радионавигационного оборудования.

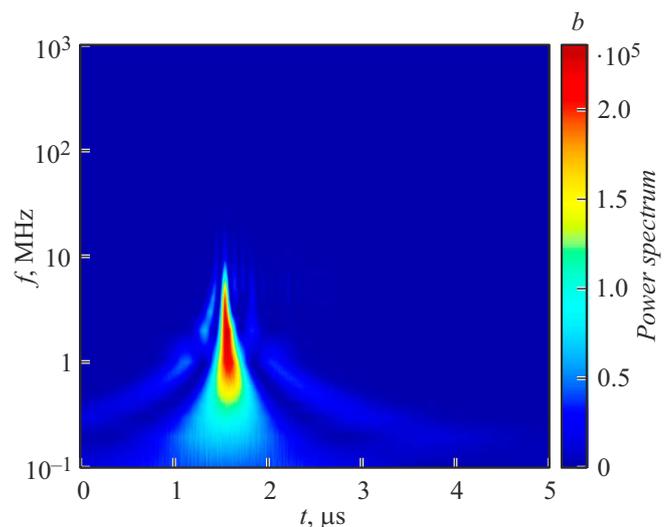
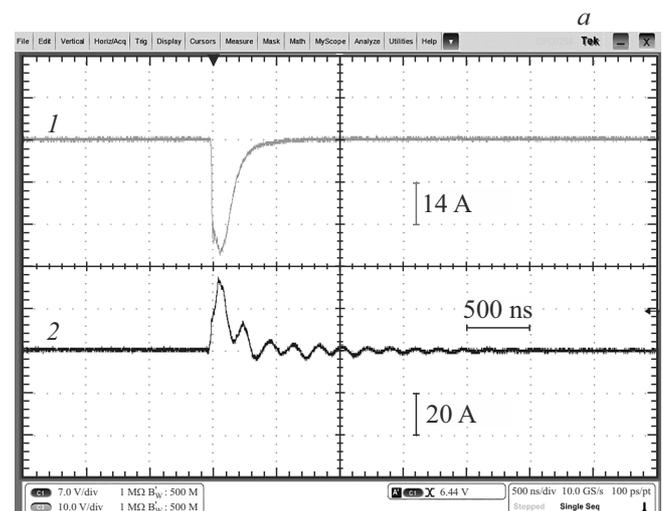
Исследование влияния вида молниеотводов на спектр электромагнитных помех на антенне под носовым обтекателем самолетов на моделях с использованием искусственной грозовой ячейки отрицательной полярности проводилось на экспериментальном комплексе, описанном в работе [9]. Модели носовых обтекателей в форме параболоида вращения были изготовлены из полиэтилентерефталата. На их внешней поверхности размещались четыре модельных полосовых (рис. 1, *a*) или сегментных (рис. 1, *b*) молниеотвода. Модели располагались на заземленном электростатическом экране в электрическом поле искусственной грозовой ячейки потенциалом более 1 MV. Были исследованы два варианта модельных сегментных молниеотводов с различной длиной промежутка  $\Delta d$  между соседними сегментами (рис. 1, *b*). Антенна радара под обтекателем моделировалась плоской круглой антенной диаметром 15 см. Для каждого вида модельных молниеотводов были выполнены серии экспериментов не менее чем из шестидесяти подходов, при которых цифровым запоминающим осциллографом (DPO 7254 с аналоговой полосой пропускания 2.5 GHz) с использованием малоиндуктивных коаксиальных шунтов (сопротивление 0.5  $\Omega$ , воспроизводимость прямоугольного наносекундного импульса от генератора Г5-56) регистрировались ток разряда с модели молниеотвода на внешней поверхности обтекателя и сигнал, который при этом наводился на модели антенны под обтекателем.



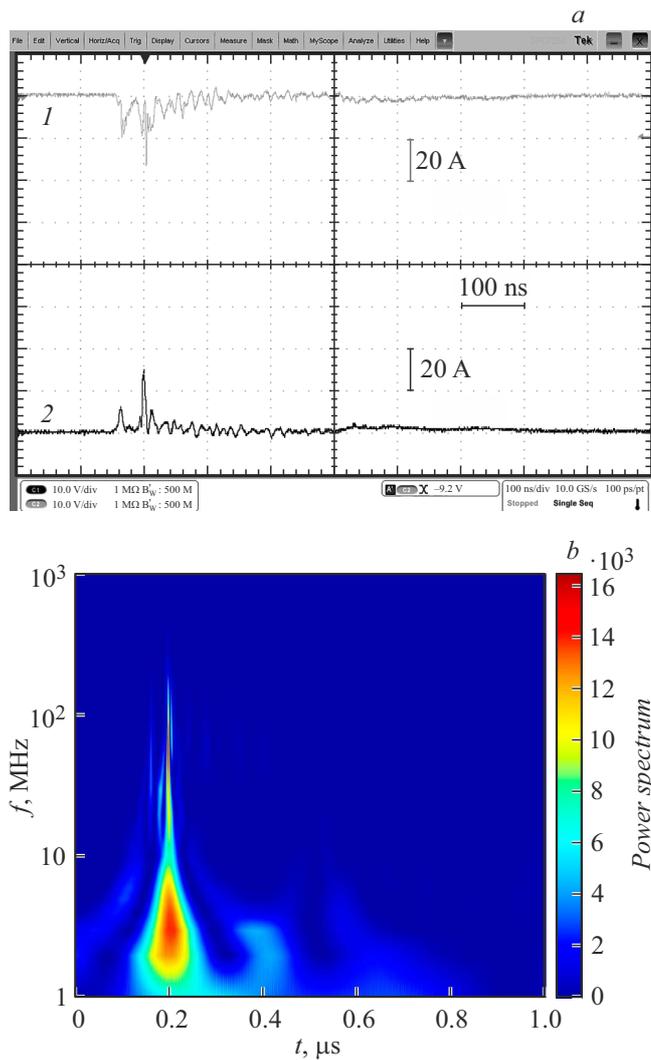
**Рис. 1.** Модель носового обтекателя самолета с полосовыми (а) и сегментными (б) электродами на внешней поверхности обтекателя.

Для определения спектральных характеристик импульсов тока разряда и создаваемого им электромагнитного излучения результаты экспериментов обрабатывались с помощью специального программного обеспечения на базе вейвлетного анализа. В качестве базисного вейвлета использовался вейвлет „Мексиканская шляпа“, который наиболее часто применяется при анализе быстроразвивающихся разрядных процессов [10]. Это позволяет связать на выбранном временном интервале спектральные характеристики сигналов на модели антенны с параметрами разряда, формирующегося с молниеотвода на внешней поверхности модели носового обтекателя самолета. При обработке и анализе полученных спектрограмм определялись максимальная частота  $f_{\max}$  в вейвлетном спектре и частота  $f(C_{\max})$ , соответствующая максимальной интенсивности в вейвлетном спектре.

Эксперименты показали, что разряд между искусственной грозовой ячейкой и полосовым молниеотводом одновременно сопровождается формированием разрядов по поверхности модели обтекателя. Между краем модели антенны и оболочкой обтекателя могли формироваться „реверсные“ разряды под действием зарядов, осевших на внутренней поверхности обтекателя [9]. Характерные осциллограммы импульсов тока разряда с модели полосового молниеотвода и сигнала, наводимого на модели антенны, вместе с характерным вейвлетным спектром сигнала приведены на рис. 2, а и б соответственно. При использовании сегментных молниеотводов приоритетной картиной является формирование искровых разрядов в промежутках между последовательными сегментами на внешней поверхности модели диэлектрического обтекателя. Эти разряды могли сопровождаться поверхностными разрядами в верхней части обтекателя,



**Рис. 2.** а — характерные осциллограммы импульсов тока разряда с модели полосового молниеотвода (шунт  $0.5 \Omega$ ) (1) и сигналов на антенне (шунт  $0.5 \Omega$ ) (2); б — вейвлетный спектр электромагнитных помех, регистрируемых плоской антенной под моделью обтекателя.



**Рис. 3.** *a* — характерные осциллограммы импульсов тока разряда с модели сегментного молниеотвода (шунт  $0.5 \Omega$ ) (1) и сигналов на антенне (шунт  $0.5 \Omega$ ) (2); *b* — вейвлетный спектр электромагнитных помех, регистрируемых плоской антенной под моделью обтекателя.

где сегментные электроды отсутствуют, восходящими разрядами в сторону искусственной грозовой ячейки и „реверсными“ разрядами между краем антенны и внутренней поверхностью обтекателя. Характерные осциллограммы импульсов тока разряда с модели сегментного молниеотвода и сигнала, наводимого на модели антенны под обтекателем, вместе с характерным вейвлетным спектром сигнала приведены на рис. 3, *a* и *b* соответственно.

Таким образом, оба вида молниеотводов не исключали формирования с модели антенны реверсного разряда амплитудой в десятки ампер. Присутствие колебательной составляющей в осциллограмме сигнала на антенне указывает на существенный вклад в сигнал токов смещения, наводимых разрядом между искусственной грозовой ячейкой и моделью молниеотвода и разрядами, фор-

мирующимися по обтекателю вследствие накопления на его поверхности существенного заряда. Основные параметры импульсов тока разрядов с моделей молниеотводов и сигналов, наводимых ими на модели антенны под обтекателем, находились в близких диапазонах, но средние значения в случае полосовых молниеотводов были на 10–60% выше.

Вейвлетные спектры сигналов, наводимых на антенне под моделью носового обтекателя самолета, показали существенно отличные частотные характеристики для вариантов защиты полосовыми и сегментными молниеотводами (табл. 1). Максимальные частоты  $f_{\max}$  в вейвлетном спектре сигнала на антенне в среднем были на порядок выше для сегментных молниеотводов, чем для полосовых. Аналогичный характер был найден и для частоты  $f(C_{\max})$ , соответствующей максимальной интенсивности в вейвлетном спектре. Предельные значения для  $f_{\max}$  и  $f(C_{\max})$  в вейвлетном спектре сигнала на антенне в случае использования сегментных молниеотводов достигали 1.89 GHz и 610 MHz соответственно.

Аналогичную тенденцию показал и вейвлетный анализ импульсов тока, регистрируемых на сегментных и полосовых молниеотводах (табл. 2). Максимальные частоты  $f_{\max}$  в вейвлетном спектре импульса тока в среднем были в 5 раз выше для сегментных молниеотводов, чем для полосовых. Частоты  $f(C_{\max})$ , соответствующие максимальной интенсивности в вейвлетном спектре импульса тока, для сегментных молниеотводов в среднем были более чем на порядок выше, чем для полосовых. Предельные значения для  $f_{\max}$  и  $f(C_{\max})$  импульсов тока при использовании сегментных молниеотводов достигали 1 GHz и 350 MHz соответственно.

При использовании сегментных молниеотводов установлено выраженное влияние расстояния между соседними сегментами  $\Delta d$  на спектральные характеристики сигналов, наводимых на модели антенны под обтекателем (табл. 1). При уменьшении  $\Delta d$  с 3.5 до 1 mm максимальные частоты  $f_{\max}$  в вейвлетном спектре сигнала на антенне в среднем выросли в 1.5 раза (с 208 до 356 MHz), а частоты  $f(C_{\max})$ , соответствующие максимальной интенсивности  $C_{\max}$  в вейвлетном спектре, в среднем возрастали в 3 раза (с 29 до 87 MHz). Аналогичная, хотя и менее выраженная тенденция проявлялась и для вейвлетных спектров импульсов тока, регистрируемых на сегментном молниеотводе (табл. 2).

Таким образом, впервые экспериментально показано кардинальное влияние вида молниеотвода на спектр электромагнитных помех на антенне под моделью носового обтекателя самолета. При применении сегментных молниеотводов на внешней поверхности носового обтекателя самолета в спектре сигналов, наводимых на антенне под обтекателем, появляются частоты в диапазоне от сотен MHz до единиц GHz, которые могут быть опасны для нормального функционирования радионавигационного оборудования [1,7]. Одним из ключевых факторов, влияющих на спектр электромагнитных помех на антенне под обтекателем, является

**Таблица 1.** Средние значения (диапазон) характерных частот вейвлетного спектра сигналов, регистрируемых на антенне под обтекателем

Параметр	Вид молниеотвода		
	Сегментный ( $\Delta d = 1$ mm)	Сегментный ( $\Delta d = 3.5$ mm)	Полосовой
$f_{max}$ , MHz	356 (7–1890)	208 (2–900)	20 (1.5–75)
$f(C_{max})$ , MHz	87 (1–610)	29 (0.1–600)	3.6 (0.3–45)

**Таблица 2.** Средние значения (диапазон) характерных частот вейвлетного спектра импульсов тока, регистрируемых на молниеотводе на поверхности обтекателя

Параметр	Вид молниеотвода		
	Сегментный ( $\Delta d = 1$ mm)	Сегментный ( $\Delta d = 3.5$ mm)	Полосовой
$f_{max}$ , MHz	271 (10–900)	207 (2–1000)	55 (1.4–260)
$f(C_{max})$ , MHz	47 (1.5–70)	27 (0.2–350)	2.1 (0.2–20)

формирование поверхностных разрядов на обтекателе и искровых разрядов между сегментами молниеотвода. Полученные результаты могут быть использованы при совершенствовании методов защиты от воздействия грозовых облаков и молнии носового обтекателя самолета и радионавигационного оборудования под ним.

#### Финансирование работы

Исследование проведено в Национальном исследовательском университете „МЭИ“ при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания (проект № FSWF-2020-0019).

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

#### Список литературы

- [1] A. Hall, in 2005 *Int. Conf. on lightning and static electricity* (Seattle, USA, 2005), p. 118.  
DOI: 10.13140/RG.2.2.21467.82727
- [2] N.I. Petrov, A. Haddad, G.N. Petrova, H. Griffiths, R.T. Waters, in *Recent advances in aircraft technology*, ed. by R.K. Agarwal (IntechOpen, 2012), p. 523.  
DOI: 10.5772/36634
- [3] C. Karch, C. Paul, F. Heidler, in 2019 *Int. Symp. on electromagnetic compatibility (EMC EUROPE)* (Barcelona, Spain, 2019), p. 650.  
DOI: 10.1109/EMCEurope.2019.8871944
- [4] D. Yan-chao, X. Xiu, H.U. Pingdao, in 2017 *Int. Symp. on electromagnetic compatibility (EMC EUROPE)* (Angers, France, 2017). DOI: 10.1109/EMCEUROPE.2017.8094806
- [5] A. Vukovic, P. Sewell, T. Benson, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, **68** (11), 7287 (2020).  
DOI: 10.1109/TAP.2020.2998169

- [6] J.-P. Parmantier, F. Issac, V. Gobin, *Aerospace Lab J.*, **5**, ALO5-10 (2012). <https://aerospacelab.onera.fr/al5/indirect-effects-of-lightning-on-aircraft-and-rotorcraft>
- [7] P.R.P. Hoole, M.R.M. Sharip, J. Fisher, K. Pirapaharan, A.K.H. Othman, N. Julai, S.A. Rufus, S. Sahrani, S.R.H. Hoole, *J. Telecommun. Electron. Comput. Eng.*, **9** (3-10), 1 (2017). <https://journal.utem.edu.my/index.php/jtec/article/view/3145>
- [8] P.R.P. Hoole, J. Fisher, K. Pirapaharan, A.K.H. Othman, N. Julai, Aravind CV, K.S. Senthilkumar, S.R.H. Hoole, *Int. J. Control Theory Appl.*, **10** (16), 221 (2017). [https://serialsjournals.com/abstract/39739\\_ch\\_22\\_f\\_-\\_ijcta\\_paper3.pdf](https://serialsjournals.com/abstract/39739_ch_22_f_-_ijcta_paper3.pdf)
- [9] А.Г. Темников, Л.Л. Черненский, А.В. Орлов, О.В. Полякова, Письма в ЖТФ, **36** (18), 40 (2010).
- [10] M.R.M. Esa, M.R. Ahmad, V. Cooray, *J. Atmospher. Res.*, **138**, 253 (2014). DOI: 10.1016/J.ATMOSRES.2013.11.019