

О молниестойкости ракет космического назначения

СЕНЦОВ Ю.И., ХМЕЛЬЩИКОВ М.В.

Вопросы молниезащиты и молниестойкости ракет космического назначения в последнее время становятся актуальными в связи со строительством космодромов в грозоактивных районах [1–3]. Полностью защитить ракету от воздействия молнии с помощью только системы молниезащиты стартового комплекса сложно. Повысить безопасность ракеты можно только за счет придания ракете собственной молниестойкости. В статье обсуждаются вопросы выбора уровней молниезащиты и молниестойкости ракеты с целью повышения ее безопасности. Для контроля возможного попадания молнии в ракету предлагается установить на ракете аппаратуру измерения силы разряда молнии в ракету.

К л ю ч е в ы е с л о в а: *ракета космического назначения, молниезащита, молниестойкость, сила разряда молнии, аппаратура измерения*

Гарантированно защитить ракету на старте от прямого попадания молнии технически сложно и дорого. Для этого стартовая площадка должна быть окружена надежной системой молниезащиты, которая перехватывает опасные грозовые облака и при этом не индуцирует в зоне ракеты сильного электромагнитного поля.

Молниезащита считается надежной, если она с вероятностью примерно 0,99 перехватывает все молнии, имеющие силу тока разряда, превышающую минимальное значение. Это минимальное значение тока характеризуется тем, что молния с данной интенсивностью при прямом ударе в ракету не генерирует магнитное поле, превышающее допустимое.

В космической практике из условия сохранения работоспособности аппаратуры принято допустимое значение напряженности магнитного поля в районе старта примерно $H_{пр} = 200$ А/м, что соответствует прямому удару молнии в ракету тяжелого класса с силой тока примерно 5 кА.

На примере двухмачтовой схемы рассмотрим особенности функционирования системы молниезащиты. Используя для описания взаимодействия грозового облака с ракетой модель «катящихся сфер», найдем расстояние между ракетой и каждой из мачт (см. [4, 5] и стандарт ИЕС-62 305):

$$R = 10I^{0,65}; \quad (1)$$

здесь и далее I – сила тока молнии при разряде облака в ракету, измеряемая в килоамперах, остальные физические величины приведены в системе СИ.

Физический смысл выражения (1) следующий: все грозовые облака с силой тока разряда больше I будут перехватываться системой молниезащиты, а молнии с меньшей силой тока могут попадать в ракету.

Напряженность магнитного поля в зоне ракеты, индуцируемая током растекания молнии по молниеприемнику, можно оценить по закону Био-Савара применительно для переменного электромагнитного поля молнии в ближней зоне:

$$H = \frac{10^3 I}{2\pi R}. \quad (2)$$

Подставляя (1) в (2), получаем выражение для напряженности магнитного поля:

$$H = 50I^{0,35} / \pi. \quad (3)$$

Здесь и в (2) значение H – в А/м.

На рис. 1 изображены графики зависимости расстояния R и напряженности магнитного поля H от силы тока молнии.

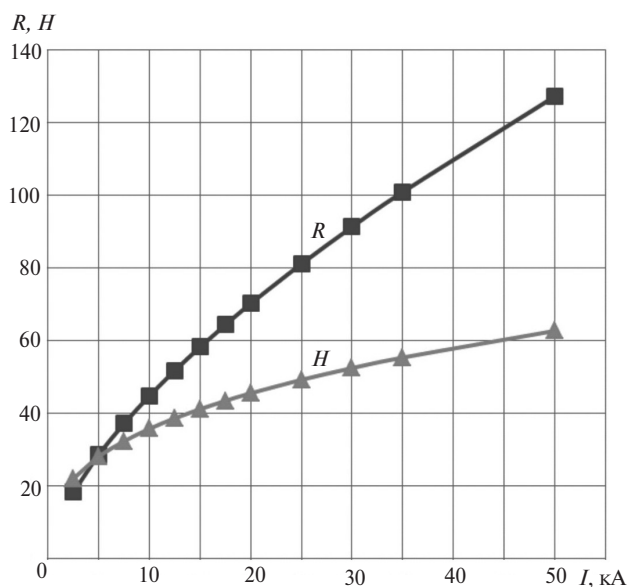


Рис. 1. Зависимость расстояния между ракетой и мачтой молниеприемника ($R, м$) и напряженности магнитного поля в зоне ракеты от ($H, А/м$) силы тока молнии

Если требуется защитить ракету от молний с током больше 5 кА, то расстояние от ракеты до мачты в соответствии с графиком на рис.1 не должно превышать 30 м. Однако, если в эту систему молниезащиты ударит молния с током больше 35 кА, то окажется, что напряженность поля будет выше предельно допустимой. А при ударе самой мощной наблюдаемой в природе молнии с током 200 кА напряженность поля будет равна 1060 А/м, которая в пять раз превышает предельно допустимое значение.

Для того чтобы напряженность магнитного поля не превышала предельно допустимого при ударе молнии значения 200 кА, а это является безусловным требованием к любой системе молниезащиты, необходимо в соответствии с (2) располагать мачту не ближе 159 м от ракеты. Однако при этом расстоянии система молниезащиты надежно перехватывает молнии, у которых интенсивность выше 55 кА (см. рис. 1).

Полученные результаты носят оценочный характер, тем не менее можно предположить, что двухмачтовая система молниезащиты не может одновременно выполнить двух требований: перехватывать молнии с интенсивностью тока разряда, большей 5 кА, и не создавать при этом напряженность магнитного поля 200 А/м.

Для иллюстрации надежных систем молниезащиты приведем два примера.

Первая система, обладающая высокой степенью надежности, создана в США в Космическом центре им. Дж. Кеннеди (рис. 2). Она состоит из трех

мачт, расположенных в вершинах треугольника со сторонами около 250 м. Высота мачт (диверторов) равна 180 м. Вершины мачт соединены между собой и с землей токопроводящими тросами. Верхние токоприемники дополнительно «опутаны» кабелями, которые в момент старта сбрасываются [5].

Очевидно, такая система молниезащиты помимо высокой стоимости создает трудности при организации коммуникаций на космодроме и при его эксплуатации. Вторая система молниезащиты ракеты «Ариан-5» построена на космодроме Куру во французской Гвиане (рис. 3). Она состоит из четырех мачт, расположенных в вершинах квадрата со стороной 60 м. Высота мачт 90 м. Вершины стоек соединены между собой тросами молниеприемника. При этом каждая вершина мачты соединена с землей наклонным тросом токоотвода. Такая система защиты обеспечивает надежный перехват молний с силой тока в диапазоне от 5 до 200 кА.

Максимальная амплитуда напряженности индуцированного магнитного поля в районе ракеты не превышает 200 А/м [6]. Удивительным в этой системе является то, что при достаточно близком расстоянии мачт от ракеты (60 м) удалось не превысить напряженность магнитного поля в 200 А/м. Это достигнуто за счет применения молниеприемников, состоящих из нескольких параллельных тросов, взаимно гасящих электромагнитные поля друг друга, и большого угла наклона токоотвода к земле.

Таким образом, если на космодроме используется молниезащита, допускающая попадание мол-

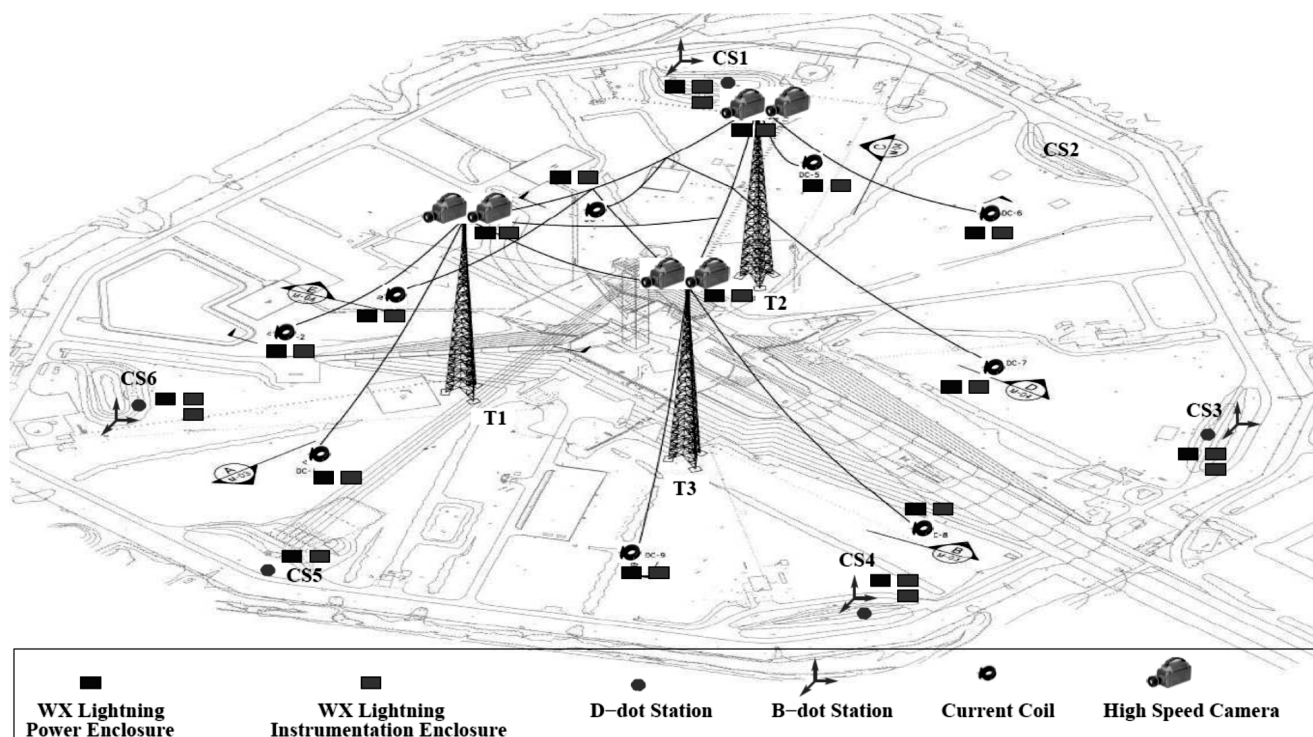


Рис. 2. Стартовый комплекс в Космическом центре им. Кеннеди, США



Рис. 3. Стартовый комплекс РН «Ариан–5» во французской Гвиане

нии в ракету, то для безопасности ракеты необходимо предъявлять к ней требование молниестойкости.

Молниестойкость ракеты задается максимальным значением допустимого тока молнии, при котором ракета сохраняет свои эксплуатационные качества. Так как основными поражающими факторами являются термическое и электрическое воздействия, следовательно, и уровень молниестойкости ракеты будет определяться ее термической и электрической стойкостью.

Требование термической стойкости предъявляется в основном к диэлектрическим материалам внешней конструкции ракеты. Электрическая стойкость определяется восприимчивостью радиоэлектронной аппаратуры к кондуктивным и индуктивным помехам, создаваемым током растекания молнии по ракете.

Необходимые мероприятия, направленные на повышение молниестойкости ракеты:

- экранирование аппаратуры и кабельной сети;
- экранирование зазоров в конструкции корпуса ракеты, препятствующее проникновению внутрь токов растекания и электромагнитного поля;

- металлизация ракеты для выравнивания потенциала по объему ракеты и препятствующая возникновению разряда;

- применение защитных электропроводных покрытий диэлектрических элементов конструкции с использованием молниестойких композиционных материалов, исключающее их разрушение;

- установка защитных фильтров в электрические схемы аппаратуры;

- дублирование критичных блоков радиоэлектронной аппаратуры.

Молниестойкость ракеты задается при ее проектировании и определяется условиями эксплуатации и уровнем защищенности стартового комплекса. Если ракета должна иметь возможность стартовать в грозовой обстановке, то значение ее молниестойкости должно соответствовать максимально возможному току молнии 200 кА.

Если на космодроме в грозовую погоду старты не проводятся, молниестойкость ракеты должна соответствовать нижней границе защиты стартового комплекса. При этом граница, начиная с которой система молниезащиты перестает быть эффективной, должна назначаться согласованным решением заинтересованных сторон. Если молниестойкость ракеты ниже границы защищенности, то вероятность выведения ракеты из строя ударом молнии весьма высока.

В заключение остановимся еще на одном обстоятельстве, связанном с молниестойкостью ракеты и ее безопасностью, — с необходимостью установки на ракете аппаратуры регистрации и измерения силы тока при прямом попадании в нее молнии. Если удар молнии в ракету выводит ее из строя, то данное событие обязательно должно быть зарегистрировано.

На рис. 4 приведена схема, которая позволяет измерить силу удара молнии и определять электромагнитную обстановку как снаружи ракеты, так и

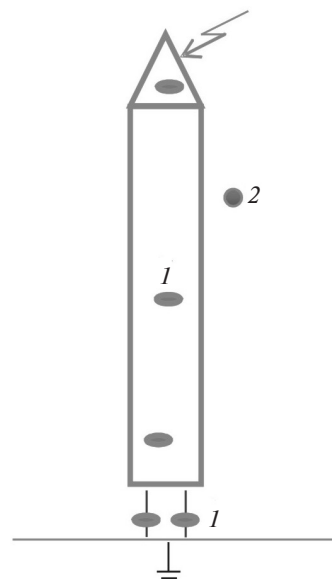


Рис. 4. Схема расположения датчиков: 1 — датчик тока; 2 — датчик магнитного поля

внутри нее. По измерениям тока в шинах заземления ракеты можно с учетом тока утечки по технологическим магистралям оценить силу удара молнии. В различных зонах внутри ракеты на нескольких блоках аппаратуры измеряются токи обтекания. По ним можно судить о степени растекания тока молнии по ракете и его воздействию на радиоэлектронную аппаратуру. Датчик магнитного поля устанавливается снаружи ракеты и измеряет напряженность магнитного поля, индуцируемого попаданием молнии как в ракету, так и в систему молниезащиты.

Полученные таким образом данные позволяют рассчитать электромагнитную обстановку в любой зоне ракеты и оценить нанесенный ей ущерб.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузечкин И.П., Сысоев В.С., Гончар А.Г., Приз В.В., Козлов Д.А. Защита от молнии и обеспечение электромагнитной совместимости на стартовых комплексах космического назначения. — Вестник МЭИ, 2009, № 5, с. 36–41.
2. Доронин А.Н., Сенцов Ю.И., Тимофеев Ю.Т., Хмельщиков М.В. Молниезащита ракет космического назначения. — Труды

Elektrichestvo, 2019, No. 8, pp. 30–33

XLI академических чтений по космонавтике. Москва, 2017, с.142–150.

3. Сенцов Ю.И. Оценка электромагнитной помехи в электросети ракеты при прямом попадании в нее молнии. — Электричество, 2017, № 11, с. 36–39.

4. Rakov V.A. and Uman M.A. Lighting Physics and Effects. Cambridge University, 2003.

5. Issac F., Bachelier E., Prost D., Enjalfert V., Mohedano L. Space Launching Site Protection against Lightning Hazards. E-mail: francois.issac@onera.fr.

6. Mata C.T., Mata A.G. Summary of 2011 Direct and Nearby Lightning Strikes to Launch Complex 39B, Kennedy Space Center, Florida. E-mail: Carlos.T.Mata@nasa.gov.

[21.01.2019]

А в т о р ы: Сенцов Юрий Иоганесович — кандидат физ.-мат. наук, ведущий конструктор Государственного космического научно-производственного центра им. М.В. Хруничева, диссертацию защитил в 1988 г.

Хмельщиков Михаил Владимирович — кандидат техн. наук, начальник отдела Государственного космического научно-производственного центра им. М.В. Хруничева, диссертацию защитил в 2007 г.

DOI:10.24160/0013-5380-2019-8-30-33

On the Lightning Resistance of Space Rockets

SENTSOV Yury I. (State Cosmos Scientific-Production Center (SCSPC) named M.V. Khrunichev, Moscow, Russia) — Leading designer, Cand. Sci. (Phys.-Math.)

KHMELSHCHIKOV Mikhail V. (SCSPC named M.V. Khrunichev, Moscow, Russia) — Head of the Department, Cand. Sci. (Eng.)

Recently, matters concerned with lightning protection and lightning resistance of space rockets are becoming of issue in connection with the fact that space launch facilities are constructed in areas of high lightning activity [1–3]. It is rather difficult to completely protect a rocket from the lightning impact using only the launcher lightning protection system. The rocket safety can be further enhanced only by imparting self-lightning resistance to the rocket. The article discusses matters concerned with selecting the rocket lightning protection and lightning resistance levels for enhancement of its safety. For monitoring possible lightning strike at the rocket, it is proposed to fit the rocket with equipment for measuring the lightning strike intensity at the rocket.

Key words: space rocket, lightning protection, lightning resistance, lightning strike intensity, measurement equipment

REFERENCES

1. Kuzhekin I.P., Sysoev V.S., Gonchar A.G., Priz V.V., Kozlov D.A. *Vestnik MEI — in Russ. (Bulletin of the Moscow Power Engineering Institute)*, 2009, No. 5, pp. 36–41.
2. Doronin A.N., Sentsov Yu.I., Timofeyev Yu.T., Khmel'shchikov M.V. *Trudy XLI akademicheskikh chteniy po kosmonavtike — in Russ. (Works of the XLI Academic Cosmonautics Readings)*. Moscow, 2017, pp. 142–150.
3. Sentsov Yu.I. *Elektrichestvo — in Russ. (Electricity)*, 2017, No. 11, pp. 36–39.

4. Rakov V.A. and Uman M.A. Lighting Physics and Effects. Cambridge University, 2003.

5. Issac F., Bachelier E., Prost D., Enjalfert V., Mohedano L. Space Launching Site Protection against Lightning Hazards. E-mail: francois.issac@onera.fr.

6. Mata C.T., Mata A.G. Summary of 2011 Direct and Nearby Lightning Strikes to Launch Complex 39B, Kennedy Space Center, Florida. E-mail: Carlos.T.Mata@nasa.gov.

[21.01.2019]