

## Анализ воздействия разряда молнии на ракетоносители космического назначения

СЕНЦОВ Ю.И.

ГКНПЦ им. М.В. Хруничева, Москва, Россия

Проводится анализ воздействия прямого разряда молнии в ракету космического назначения. Рассмотрены механическое, термическое, электромагнитное воздействия во всем диапазоне возможных интенсивностей тока молнии. Отмечается, что главной характеристикой молнии, определяющей различные физические факторы ее воздействия на объекты, является зависимость интенсивности тока разряда молнии от времени. Термические факторы вызваны быстрым выделением теплоты при прямом контакте канала молнии с внешними элементами конструкции ракеты. Выделяемая в канале молнии энергия определяется переносимым зарядом, длительностью вспышки и амплитудой тока молнии. В большинстве случаев этой энергии достаточно, чтобы воспламенить топливные смеси и газы, образующиеся в процессе заправки. Показано, что при токе больше 100 кА существует опасность проплавления внешних элементов конструкции ракеты. Механическое воздействие, вызванное акустической ударной волной, не представляет опасности даже при токе 200 кА. Электродинамическое воздействие может быть причиной сплющивания полых металлических трубок. Электрические факторы связаны с воздействием электрического тока молнии и появлением перенапряжений в бортовой аппаратуре. Электромагнитное воздействие всегда является опасным при попадании молнии в ракету и требует для бортовой аппаратуры и кабельной сети организации защитных мер.

К л ю ч е в ы е с л о в а: ракета, молния, молниестойкость

Повышенная грозовая активность на строящемся космодроме «Восточный», по сравнению с космодромами «Байконур» и «Плесецк», предъявляет дополнительные требования к безопасности ракет космического назначения (РКН). Безопасность РКН обеспечивается двумя способами: на старте функцию защиты РКН выполняет система молниезащиты стартового комплекса; в полете безопасность РКН обеспечивается собственной молниестойкостью [1].

До настоящего времени в РФ требования молниестойкости к РКН не предъявлялись, и поэтому пуск ракеты осуществлялся только в гарантированно безгрозовую погоду.

В условиях космодрома «Восточный» перенос пуска из-за грозы сопряжен со значительными организационными и материальными издержками. Поэтому создание всепогодной РКН становится актуальной задачей.

В статье делается шаг в этом направлении – проводится анализ воздействия молниевых разрядов на РКН в различных условиях ее эксплуатации.

**Молния и ее воздействие на ракеты космического назначения.** Главной характеристикой молнии, определяющей различные физические факторы ее воздействия на РКН, является зависимость интенсивности тока обратного разряда молнии от времени (далее ток разряда молнии). На рисунке приведена типовая форма тока естественной молнии [2]. Буквами A–D обозначены

характерные временные интервалы разряда (фазы), которые отличаются амплитудой, длительностью, фронтами и перенесенным электрическим зарядом.

Фазы с крутыми фронтами ответственны за ЭДС электромагнитной индукции в электрических контурах ( $\text{ЭДС} = -\frac{d\Phi}{dt} \sim \frac{dI}{dt}$ , где  $\Phi$  – магнитный поток, создаваемый током  $I$ ), а длинные фазы – за омический нагрев элементов конструкции РКН ( $\Delta T \sim \int I^2 R dt$ ); длительность фронта фазы A – несколько микросекунд, а фронта фазы D на порядок меньше.

Статистические данные по амплитудным и временным характеристикам молний, экспериментально заре-

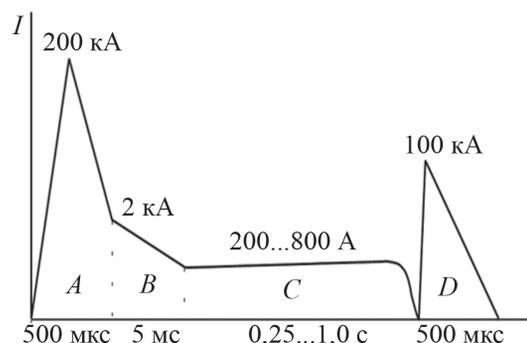


Рис. Временная зависимость тока разряда молнии  
Fig. Time dependence of a discharge current of a lightning

гистрированных различными авторами, приведены в [3–5]. Так вероятность появления в природе молний с амплитудой тока меньше 5 кА составляет 12%, а вероятность молний больше 200 кА – 10%. Наиболее вероятными являются молнии с током 25–30 кА.

Воздействия молнии подразделяют на две группы: первичные, вызванные прямым ударом молнии в объект, и вторичные, индуцированные близким ее разрядом.

Прямой удар молнии вызывает электрические, термические и механические факторы воздействия на РКН. Электрические факторы связаны с воздействием электрического тока молнии и появлением перенапряжений в бортовой аппаратуре. Перенапряжение  $U$  пропорционально амплитуде и крутизне фронта тока молнии  $I$ , индуктивности  $L$  элементов конструкции РКН и сопротивлению заземлителей  $R$  при нахождении РКН на стартовом комплексе ( $U = L \frac{dI}{dt} + RI$ ). Даже при выполнении заземления прямые удары молнии могут привести к перенапряжениям в несколько киловольт [6].

Термические факторы вызваны быстрым выделением теплоты при прямом контакте канала молнии с внешними элементами конструкции РКН. Выделяемая в канале молнии энергия  $W$  определяется переносимым зарядом, длительностью вспышки и амплитудой тока молнии ( $W \sim \int I^2 R dt$ ). В подавляющем числе случаев этой энергии достаточно, чтобы воспламенить топливные смеси и газы, образующиеся в процессе заправки. Поэтому в таких средах контакт с каналом молнии всегда создает опасность возгорания и взрыва. Такая же опасность существует при проплавлении каналом молнии топливных баков РКН. При протекании тока молнии по тонким проводникам создается опасность их расплавления и разрыва.

Механические факторы обусловлены ударной волной, распространяющейся от канала молнии, и электродинамическими силами, действующими на проводники с токами молнии. Электродинамическое воздействие может быть причиной сплюсывания полых металлических трубок. Контакт с каналом молнии может вызвать резкое газообразование в некоторых материалах с последующим механическим разрушением или образованием трещин.

Вторичные воздействия молнии связаны с действием на объект электромагнитного поля от близких разрядов. Электрическая составляющая электромагнитного поля обусловлена перемещением зарядов в канале молнии. Магнитная составляющая вызвана электромагнитной индукцией, связанной с изменением тока разряда молнии во времени.

Воздействие электрического поля (электростатическая индукция) проявляется в виде перенапряжения, возникающего на металлических конструкциях РКН и зависящего от тока молнии, расстояния до места удара и сопротивления заземления [6]. При отсутствии над-

лежащего заземления перенапряжение может достигать сотен киловольт и создавать опасность поражения аппаратуры ( $U \approx IR = 200 \text{ кА}; 1 \text{ Ом} = 200 \text{ кВ}$ ).

Воздействие магнитного поля (электромагнитная индукция) согласно закону Фарадея связано с образованием в электрических контурах ЭДС, пропорциональной крутизне фронта тока молнии и площади, охватываемой контуром. Протяженные коммуникации электрических кабелей по борту РКН могут образовывать контуры, охватывающие большую площадь, в которых возможно наведение ЭДС в несколько сотен вольт [7].

Ниже приводятся оценочные данные, дающие представление о значениях термического и механического воздействий молнии на РКН при прямом ударе [8].

Основными физическими факторами, приводящими к проплавлению обшивки РКН, являются радиационное тепловое излучение дуги, образующейся на фронте первого импульса тока, и теплопроводная передача тепла из плазмы дуги к поверхности материала. Если первый фактор дает тепловой поток примерно 4 МВт/см<sup>2</sup> благодаря высокой температуре плазмы в десятки тысяч градусов, то второй составляет всего 10 кВт/см<sup>2</sup>. Однако время действия второго фактора составляет сотни миллисекунд, а первого – десятки микросекунд. Поэтому вклад фазы С в проплавление материала более существен, и в общем случае результат действия нагрева оценивается суммарным перенесенным электрическим зарядом.

Оценки показали, что наиболее эффективными металлами для нанесения защитных пленочных покрытий на используемые во внешней конструкции диэлектрические материалы являются молибден Мо, никель Ni и медь Cu. Толщина уноса материала передним импульсом тока молнии составляет у них 14–30 мкм, в то время как у алюминия Al – 90 мкм.

Эксперименты по воздействию модельной молнии с силой тока 200 кА на алюминиевый лист показали, что лист прожигается на глубину 4 мм [9].

Ударная волна является следствием быстрого расширения разогретого канала молнии. Расчеты показывают, что максимальное давление, создаваемое ударной волной на поверхность РКН, не превышает 2 МПа, а соответствующий импульс давления меньше 0,1 кПа·с.

Магнитные силы, проявляющиеся при больших токах, реализуются в виде магнитного давления на поверхность проводника или магнитного взаимодействия токов. Эти силы пропорциональны квадрату силы тока молнии. Например, на проводник диаметром 5 мм при силе тока 200 кА действует давление 1000 атм [8].

Магнитное взаимодействие токов возникает в случае их протекания по двум близко расположенным проводникам (одним из которых может быть канал разряда). Если расстояние между каналом и проводником равно 30 мм, то погонная сила на проводник будет равна 180 Н/см [8].

Пробой диэлектрика может происходить в сильном поле лидерной головки молнии. Условием пробоя является наличие с тыльной стороны по отношению к молнии проводящей поверхности. Пробой диэлектрика, в частности головного обтекателя РКН, за которым находится полезная нагрузка, может привести к местному снижению прочности конструкции.

**Молниезащита РКН на стартовом комплексе.** Гарантированно защитить ракету на старте от прямого попадания молний технически сложно и дорого. Для этого стартовая площадка должна быть окружена надежной системой молниезащиты, которая перехватывает опасные разряды молний и при этом не индуцирует в зоне ракеты сильное электромагнитное поле [10, 11].

В космической практике из условия сохранения работоспособности аппаратуры приняты допустимые в районе старта значения импульсных напряженностей магнитного и электрического полей:  $H \approx 200$  А/м,  $E \approx 300$  кВ/м. Такая электромагнитная обстановка примерно соответствует индуцируемому полю, создаваемому прямым попаданием молнии с током 200 кА в систему молниезащиты стартового комплекса или непосредственным поражением РКН молнией с током 5 кА.

Поэтому безопасность РКН на старте может быть обеспечена ее молниестойкостью выше 5 кА. Такое требование должно предъявляться для всех РКН, которые не стартуют в грозовую погоду, но могут находиться на стартовом комплексе во время грозы. Добиться такой молниестойкости технически несложно. При прямом попадании в РКН молнии с силой тока 5 кА механическое и термическое воздействия незначительны. Это относится и к диэлектрическим элементам конструкции РКН. Заметное электрическое воздействие могут оказать ток растекания молнии и электромагнитный импульс. Поэтому конструкция ракеты должна быть выполнена с минимальными отверстиями в поверхности, чтобы проникающие внутрь электромагнитное поле и токи растекания были минимальны. Входные электрические цепи наружной аппаратуры должны быть защищены от воздействия тока растекания молнии с силой 5 кА.

Уязвимым местом РКН являются кабели, проложенные в гаргротах снаружи корпуса ракеты. Генерируемые в кабелях «наводки» проникают по цепям питания, управления и телеметрии внутрь ракеты и поступают на входы радиоэлектронной аппаратуры. Гаргроты представляют собой металлические алюминиевые кабельные каналы аэродинамической формы, частично экранирующие кабель от электромагнитного воздействия. Длина гаргротов достигает нескольких десятков метров.

Расчеты показали, что при ударе молнии в РКН с силой тока 5 кА в проводах кабеля длиной 10 м индуцируется напряжение 15 В, а при силе тока 200 кА напряжение возрастет до 600 В [12].

Проникающее внутрь корпуса РКН электромагнитное поле становится пренебрежимо малым, и его можно не учитывать. Оценки показывают, что при существующих временных параметрах молнии, высоте ракеты 50 м и толщине алюминиевого корпуса 2 мм произойдет ослабление магнитного поля в тысячи раз [13].

**Молниезащита РКН в полете.** При старте ракеты в пределах высоты полета 20 км существует вероятность ее поражения молнией. При этом сила удара молнии может достигать 200 кА. В гражданской авиации, где средняя частота ударов молнии в самолет высока и в среднем равна 1 удару в год, достигнута молниестойкость самолета порядка 100 кА. Данное значение молниестойкости может служить ориентиром при разработке всепогодной РКН.

Проведем анализ последствий удара молнии в РКН с силой тока 200 кА.

Механическое воздействие на корпус РКН, вызываемое ударной волной с давлением порядка 2 МПа, но малым импульсом 0,1 кПа·с, незначительно и может быть легко учтено конструктивными решениями [8].

Опасным является термическое воздействие молнии на поверхность РКН. Если при полете самолета пятно дуги разряда молнии за время разряда может смещаться по корпусу на расстояние в несколько диаметров пятна, то при медленном взлете РКН вся энергия разряда выделится в области одного пятна. В результате может произойти прогорание алюминиевого корпуса РКН, имеющего толщину порядка 2 мм. Повышения термостойкости наружной алюминиевой поверхности РКН можно достичь нанесением дополнительного молниезащитного покрытия из Mo, Ni, Cu толщиной в сотни микрон.

Особенно подвержены термическому разрушению наружные элементы конструкции, изготовленные из полимерных композитных материалов. Например, при воздействии молнии с током 200 кА и переносимым зарядом 20 Кл на углепластик толщиной 3–5 мм происходит его сквозной пробой с образованием трещин на площади 90 мм<sup>2</sup>. Поэтому имеющиеся в конструкции РКН полимерные элементы должны быть заменены на металлические или на них должно быть нанесено молниезащитное покрытие [14, 15].

Наиболее опасным является электромагнитное воздействие молнии на аппаратуру РКН. Токи растекания и электромагнитная индукция увеличиваются пропорционально току разряда молнии, и поэтому индуцированная током растекания помеха в электросети РКН может достигать 600 В. Для снижения величины помех и сохранения работоспособности аппаратуры необходимо усилить экранировку электросети РКН и защиту входных цепей аппаратуры.

В заключении остановимся на очень важном вопросе организации экспериментальной стендовой отработки молниестойкости РКН. Обоснование мол-

нистойкости РКН путем прямого испытания полномасштабного РКН на воздействие молниевых разрядов технически и организационно очень сложно. Для того чтобы имитировать разряд молнии на крупногабаритном РКН, имеющем индуктивность в несколько мГн, потребуется создание мощного генератора импульса тока с током разряда до 200 кА и напряжением порядка 10 МВ. Кроме того, для проведения испытаний должен быть организован специальный стенд (полигон) с соответствующей инфраструктурой.

В соответствии с ГОСТ [16] решением этой проблемы является возможность не проводить полномасштабный дорогой эксперимент, а ограничиться испытаниями наиболее критичных конструктивных элементов и электрических устройств РКН с последующим расчетным обоснованием молниестойкости всей РКН. В этом случае для имитации воздействия разряда на небольшие устройства потребуется малогабаритный генератор, который можно разместить в лабораторном помещении.

В ГКНПЦ им. М.В. Хруничева разрабатывается программа по организации экспериментальной базы по исследованию молниестойкости критичных элементов РКН. Испытания будут проводиться по механическому, термическому и электромагнитному воздействиям.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сенцов Ю.И., Хмельщиков М.В. О молниестойкости ракет космического назначения. – Электричество, 2019, № 8, с. 30–33.
2. КТ-160D. Квалификационные требования. Условия эксплуатации и окружающей среды для бортового авиационного оборудования (Внешние воздействующие факторы). Требования, нормы и методы испытаний. М.: АР МАК, 2004, 327 с.
3. Rakov V.A., Mareev E.A. Statistical Distributions of Lightning Parameters with Emphasis on their Extremely High Values. – Электричество, 2021, № 3, с. 4–25.
4. Кужекин И.П., Ларионов В.П., Прохоров Е.Н. Молния и молниезащита. М.: Знак, 2003, 330 с.
5. Комягин С.И. Электромагнитная стойкость беспилотных летательных аппаратов. М.: Красанд, 2016, 320 с.

6. Кужекин И.П. и др. Защита от молнии и обеспечение электромагнитной совместимости на стартовых комплексах космического назначения. – Вестник МЭИ, 2009, № 5, с. 36–41.

7. Кириллов В.Ю., Клыков А.В., Нгуен В.Х. Моделирование воздействия мощных электромагнитных помех на электротехнический комплекс самолета. – Труды МАИ, 2013, № 71, 23 с.

8. Острик А.В., Филипенко А.А. Молниезащита углепластиковых элементов конструкции самолета при тепловом и механических действиях прямого удара молнии. – Конструкции из композиционных материалов, 2010, № 1, с. 34–44.

9. Баранов М.И., Кравченко В.И. Электротермическая стойкость металлической обшивки летательного аппарата к прямому воздействию импульсного тока молнии. – Электричество, 2012, № 12, с. 18–26.

10. Issac F., et. al. Space Launching Site Protection against Lightning Hazards. – AerospaceLab, 2012, No. 5.

11. Mata C.T., Mata A.G. Summary of 2011 Direct and Nearby Lightning Strikes to Launch Complex 39B, Kennedy Space Center, Florida. – Int. Conference: Lightning Protection (ICLP), 2012, DOI:10.1109/ICLP.2012.6344321.

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

13. Кравченко В.И., Болотов Е.А., Летунова Н.И. Радиоэлектронные средства и мощные электромагнитные помехи. М.: Радио и связь, 1987, 256 с.

14. Авруцкий В.А. и др. Разрушение изделий из углепластика под действием токов молнии. – Электричество, 1993, № 2, с. 28–33.

15. Гуняев Г.М. и др. Молниестойкость современных полимерных композитов. – Авиационные материалы и технология, 2012, № 2, с. 36–42.

16. ГОСТ РВ 0020-57.309–2019. КСМК. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Методы оценки соответствия требованиям стойкости к воздействию электромагнитных полей и токов источников естественного и искусственного происхождения. М.: 2021.

[12.04.2021]



Автор: Сенцов Юрий Иоганесович – кандидат физ.-мат наук, ведущий конструктор АО «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева», Москва, Россия.

## Analysis of the Lightning Discharge Impact on Space Rockets

SENTSOV Yuriy I. (Khrunichev State Research and Production Space Centre, Moscow, Russia) – Leading Designer; Cand. Sci. (Phys. -Math).

The impact of a direct lightning discharge on a space rocket is analyzed. Mechanical, thermal, and electromagnetic impacts are considered in the entire range of possible lightning current intensities. It is noted that the lightning main characteristic that determines various physical factors of its impact on objects is the lightning discharge current intensity as a function of time. Thermal factors are caused by rapid heat release when the lightning channel comes in direct contact with the rocket external structural components. The energy released in the lightning channel is determined by the transferred charge, flash duration, and

*lightning current amplitude. In most cases, this energy is sufficient to ignite fuel mixtures and gases produced during refueling. It is shown that at a current of higher than 100 kA, there is a danger of melting the rocket external structural components. The mechanical impact caused by an acoustic shock wave does not pose a hazard even at a current of 200 kA. Electrodynamical impact can cause flattening of hollow metal tubes. Electrical factors are associated with the impact of lightning current and overvoltages occurring in the onboard equipment. Electromagnetic impact is always dangerous when lightning hits a rocket and requires protective measures for the onboard equipment and cable network.*

**К е у о р д с:** *rocket, lightning, lightning resistance*

---

REFERENCES

1. **Sentsov Yu.I.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2019, No. 8, pp. 30–33.
2. **KT-160D.** *Kvalifikatsionnye trebovaniya. Usloviya ekspluatatsii i okruzhayushchey sredy dlya bortovogo aviatsionnogo oborudovaniya (Vneshnie vozdeystviyushchie faktory). Trebovaniya, normy i metody ispytaniy (Qualification requirements. Operating and environmental conditions for on-board aviation equipment (External influencing factors). Requirements, norms and test methods).* M.: AR MAK, 2004, 327 p.
3. **Rakov V.A., Mareev E.A.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2021, No. 3, pp. 4–25.
4. **Kuzhekin I.P., Larionov V.P., Prokhorov E.N.** *Molniya i molniezashchita. (Lightning and Lightning Protection).* M.: Znak, 2003, 330 p.
5. **Komyagin S.I.** *Elektromagnitnaya stojkost' bespilotnykh letatel'nykh apparatov (Electromagnetic Resistance of Unmanned Aerial Vehicles).* M.: Krasand, 2016, 320 p.
6. **Kuzhekin I.P., et. al.** *Vestnik MEI – in Russ. (Bulletin of the MPEI)*, 2009, No. 5, pp. 36–41.
7. **Kirilov V.Yu., Klykov A.V., Nguen V.H.** *Trudy MAI – in Russ. (Proceedings of MAI)*, 2013, No. 71, 23 p.
8. **Ostrik A.V., Filipenko A.A.** *Konstruksii iz kompozitsionnykh materialov – in Russ. (Structures Made of Composite Materials)*, 2010, No. 1, pp. 34–44.
9. **Baranov M.I., Kravchenko V.I.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2012, No. 12, pp. 18–26.
10. **Issac F., et. al.** *Space Launching Site Protection against Lightning Hazards.* – AerospaceLab, 2012, No. 5.
11. **Mata C.T., Mata A.G.** *Summary of 2011 Direct and Nearby Lightning Strikes to Launch Complex 39B, Kennedy Space Center, Florida.* – Int. Conference: Lightning Protection (ICLP), 2012, DOI:10.1109/ICLP.2012.6344321.
12. **Sentsov Yu.I.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2017, No. 11, pp. 36–39.
13. **Kravchenko V.I., Bolotov E.A., Letunova N.I.** *Radioelektronnye sredstva i moshchnye elektromagnitnye pomekhi. (Radio-Electronic Means and Powerful Electromagnetic Interference).* M.: Radio i svyaz', 1987, 256 p.
14. **Avrutskiy V.A., et. al.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 1993, No. 2, pp. 28–33.
15. **Gunyaev G.M., et. al.** *Aviatsionnye materialy i tekhnologiya – in Russ. (Aviation materials and technology)*, 2012, No. 2, pp. 36–42.
16. **GOST RV 0020-57.309-2019.** *Apparatura, pribory, ustroystva i oborudovanie voennogo naznacheniya. Metody otsenki sootvetstviya trebovaniyam stoykosti k vozdeystviyu elektromagnitnykh poley i tokov istochnikov estestvennogo i iskusstvennogo proiskhozhdeniya (Equipment, Devices and Equipment for Military Purposes. Methods for Assessing Compliance with the Requirements of Resistance to Electromagnetic Fields and Currents of Sources of Natural and Artificial Origin).* M.: 2021.

[12.04.2021]