

ОСНОВНЫЕ ИСТОЧНИКИ И СОСТАВ ИЗЛУЧЕНИЙ, ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ НА СОБСТВЕННУЮ ВНЕШНЮЮ АТМОСФЕРУ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА С ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКОЙ

Колбасин И.В.

*Конструкторское бюро «Арсенал» имени М.В. Фрунзе,
ул. Комсомола, 1-3, Санкт-Петербург, 195009, Россия
e-mail: kolbasin777ivan@mail.ru*

Статья поступила в редакцию 16.03.2020

Проведён анализ основных источников радиационного излучения, воздействующего на космический аппарат с ядерной энергетической установкой. Рассмотрены уровни воздействия излучений радиационных поясов Земли, солнечного и галактического, дана сравнительная оценка флюенса нейтронов и гамма-излучения от ядерного реактора-преобразователя.

Ключевые слова: бортовая ядерная энергетическая установка, собственная внешняя атмосфера, наведённая радиоактивность.

При функционировании в околоземном и межпланетном пространстве космический аппарат (КА) окружает собственная внешняя атмосфера (СВА). Состав СВА формируется в процессе сублимации конструкционных материалов, дегазации систем и агрегатов аппарата, взаимодействия с поверхностью КА высокоскоростных потоков мелкодисперсных частиц (ВП МДЧ), например, роев микрометеоритов, мелкодисперсных облаков космического мусора антропогенного (часто преднамеренного) происхождения и др. [1]. Собственная внешняя атмосфера представляет собой низкотемпературную плазму с распределёнными в ней в разных фазовых состояниях мелкодисперсными частицами, образовавшимися после взаимодействия космического аппарата с микрометеоритами. Элементы из состава СВА постоянно претерпевают ядерные и химические превращения под влиянием внешних факторов. Состав собственной внешней атмосферы индивидуален для каждого КА и зависит от орбиты функционирования, используемых конструкционных материалов, типа применяемой двигательной установки, наличия на борту экипажа с соответствующими системами жизнеобеспечения.

Исследований на тему функционирования современных космических аппаратов, имеющих

плотную СВА, совместно с ядерной энергетической установкой в России и мире в целом проводится недостаточно, ввиду чего проблема полностью не изучена. Существуют дополнительные факторы (излучения естественного происхождения), влияющие на состояние забортовой атмосферы, которые также вносят неопределённость в моделируемые процессы. В настоящей статье проведена систематизация основных процессов, протекающих в СВА, для составления математической модели их совокупного влияния на элементы космического аппарата.

В процессе эксплуатации космический аппарат подвергается влиянию естественных источников излучений (солнечных и галактических космических лучей, излучений радиационных поясов Земли) и искусственных источников (бортовые источники излучений), которые оказывают воздействие на КА в широком диапазоне энергий, проникают через СВА вглубь элементов конструкции, где происходит преобразование энергий частиц [2].

Основными потоками энергии естественного происхождения, влияющими на космический аппарат, являются солнечные космические лучи, включающие электромагнитное излучение (солнечная радиация) и корпускулярное излучение

(солнечный ветер) [3]. Корпускулярное излучение представляет собой поток заряженных частиц высоких энергий (более 5 МэВ/нуклон) [4], который состоит из электронов и ионов. Ионная составляющая включает в себя протоны n_p , альфа-частицы n_a и более тяжёлые ядра n_m (углерод, азот, кислород и ионные компоненты) со средним отношением концентраций $n_p : n_a : n_m = 1000:60:1$ [5]. Если сравнивать поток альфа-частиц и протонов по значению полной энергии этих частиц, то получится отношение 0,8/1,0 [6]. Значения получены на расстоянии, равном одной астрономической единице от поверхности Солнца.

Энергия электромагнитного излучения Солнца на верхней границе атмосферы Земли, в зонах эксплуатации космических аппаратов, распределена по спектру неравномерно. На коротковолновую часть спектра – гамма-лучи, рентгеновские и ультрафиолетовые лучи – приходится только 7% энергии солнечной радиации, а на оптический диапазон спектра – 48%. Максимум излучаемой энергии находится в оптическом диапазоне, который соответствует сине-зеленому интервалу световой гаммы излучения. Остальные 45% энергии солнечной радиации содержатся в инфракрасном диапазоне, и лишь незначительная часть приходится на радиоизлучение [3].

Следующими естественными потоками энергии, влияющими на космический аппарат, являются галактические космические лучи (ГКЛ) – изотропное космическое излучение, приходящее из недр галактики, которое состоит из протонов/нейтронов (~88%), альфа-частиц (~9,8%), более

тяжёлых ядер (~1%) и электронов (~1%), с энергетическим интервалом от 0,1 до $\sim 10^{10}$ ГэВ [7]. По сравнению с солнечными галактические космические лучи воздействуют на КА с меньшей интенсивностью, ввиду низкой концентрации частиц, но из-за больших энергий частиц оказывают более негативное воздействие на аппаратуру КА.

Третьим видом излучений естественного происхождения, формирующимся солнечным ветром и магнитосферой Земли, являются радиационные пояса (РПЗ). Потоки протонов и электронов, захваченные геомагнитным полем, образуют радиационные зоны в виде торообразных колец, охватывающих Землю в плоскости геомагнитного экватора. Захваченные частицы движутся вдоль и одновременно обращаются вокруг магнитных силовых линий. Траектория частиц представляет собой спираль.

При постоянной высоте в различных географических районах частицы в пространстве не распределяются равномерно. Указанная неравномерность связана со структурой реального геомагнитного поля и его аномалиями. В зависимости от расстояния от Земли выделяют внутренний и внешний радиационные пояса. Границы этих поясов схематично показаны на рис. 1. Внешний и внутренний радиационные пояса имеют различные величины объёмных плотностей электрических зарядов.

Внутренний пояс заполнен протонами с энергией $E_p > 30$ МэВ с максимальной плотностью на высоте (0,5...2,0) радиуса Земли R_z . Внешний пояс состоит из протонов с энергией $E_p > 100$ кэВ и

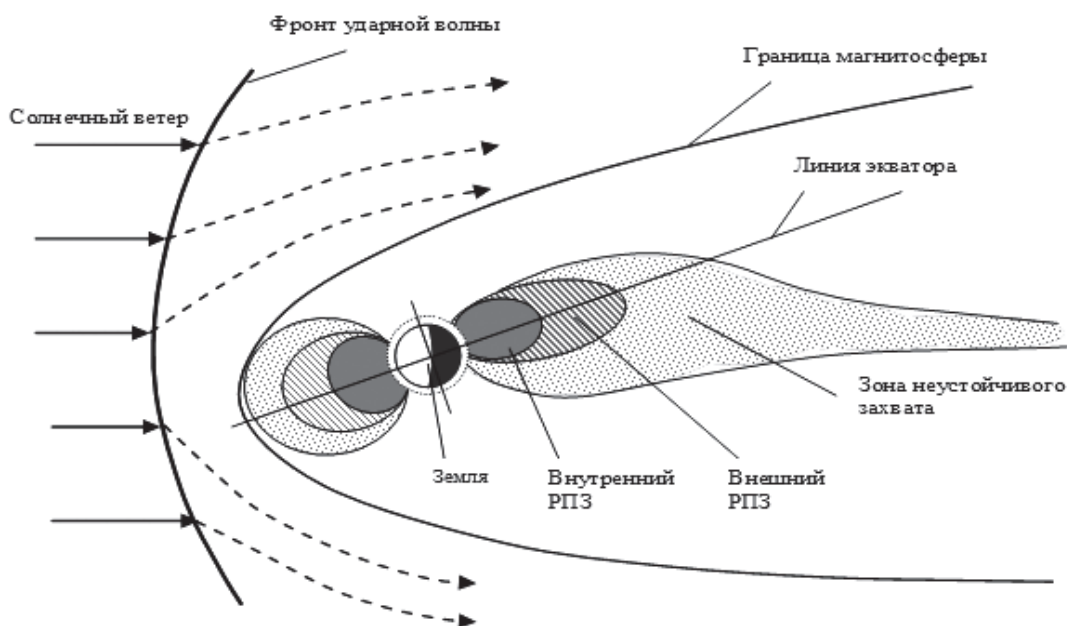


Рис. 1. Магнитосфера Земли

электронов с энергией $E_p > 150$ кэВ. Максимальная плотность потока электронов наблюдается в области $(4...5)R_3$.

Внутренний радиационный пояс практически не изменяется при изменении солнечной активности. Форма областей внешних поясов заметно зависит от активности солнца и от положения относительно границы «ночь – день». За внешним РПЗ находится зона неустойчивого захвата.

При воздействии в первую очередь солнечного ветра и межпланетной среды происходит поджатие геомагнитного поля. В результате взаимодействия с магнитосферой частицы солнечного ветра образуют ударную волну на расстоянии $(12...15)R_3$. За ударной волной находится область турбулентности.

С ночной стороны Земли находится магнитный хвост, диаметр которого составляет $\sim 40R_3$. На расстоянии $> 500R_3$ магнитные силовые линии носят нерегулярный характер.

Наибольшую опасность при полетах в околоземном пространстве представляют радиационные пояса Земли. Солнечное и галактическое космические излучения наиболее опасны в межпланетном пространстве.

Помимо естественных источников, влияющих на бортовую аппаратуру КА, существуют искусственные, расположенные на борту космическо-

го аппарата. Ядерная энергетическая установка – пример искусственного источника, который формирует поток энергии, превышающий по интенсивности влияния все естественные. От прямых электромагнитного и корпускулярного воздействий ядерного реактора бортовую аппаратуру КА защищает блок радиационной защиты, установленный у источника излучений. Область, не защищённая конусом теневой радиационной защиты, подвергается действию излучений с большой проникающей способностью.

Для составления модели воздействующих факторов и понимания радиационных процессов рассмотрим основные энергетические преобразования, протекающие в собственной внешней атмосфере космического аппарата с ядерной энергетической установкой (рис. 2).

На схеме изображено, как поток прямого радиационного излучения от ЯЭУ (a) воздействует на область СВА (d) вне тени блока радиационной защиты (z). После активации (возбуждения) ядер и ионизации атомов вещества СВА, под воздействием корпускулярных и электромагнитных излучений ЯЭУ, происходит их деактивация и рекомбинация с образованием вторичных нейтронов, γ -квантов, протонов, электронов и других частиц. Вторичные частицы и излучения распространяются от точек взаимодействия в разные

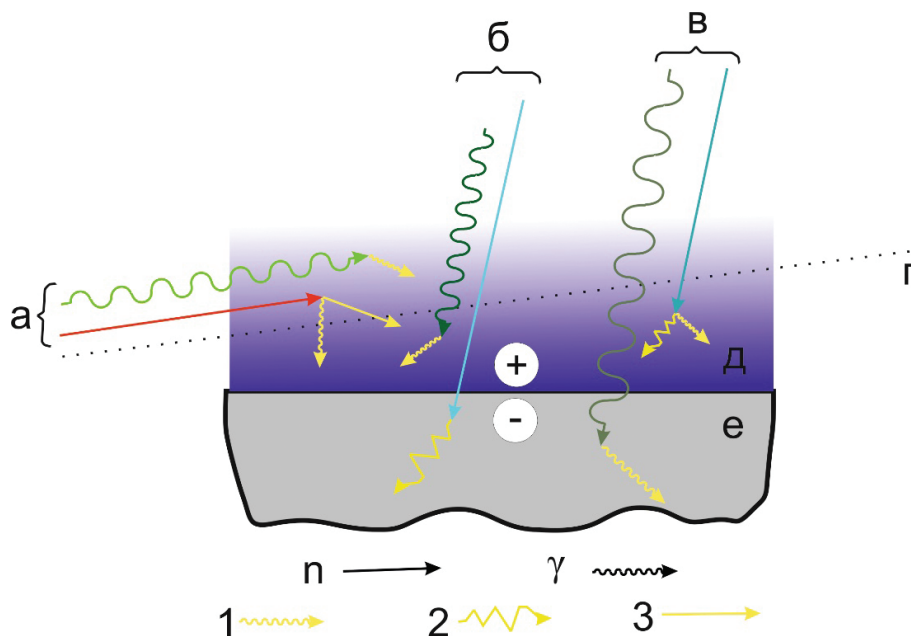


Рис. 2. Схема основных энергетических преобразований, протекающих в собственной внешней атмосфере КА с ЯЭУ: a – поток радиационного излучения от реактора; b – поток СКЛ; $в$ – поток ГКЛ; z – граница тени блока радиационной защиты ЯЭУ; d – собственная внешняя атмосфера космического аппарата над фрагментом обшивки; e – фрагмент обшивки космического аппарата; 1 – траектории вторичных гамма-квантов; 2 – траектории вторичных частиц, возникших в результате деактивации ядер; 3 – траектории вторичных частиц, возникших в результате рекомбинации атомов

стороны, образуя траектории вторичных γ -квантов (1) и вторичных частиц (2, 3), в результате чего возникает явление наведённой радиоактивности на областях, прилежащих к обшивке КА, которые защищены блоком теневой радиационной защиты от прямого излучения ЯЭУ. Дополнительный вклад в протекающие активационные и ионизационные процессы вносят первичные и вторичные γ -кванты и частицы при попадании СКЛ (б) и ГКЛ (в).

Поскольку СВА не статична, а постоянно перемещается в результате существующих градиентов давления, температуры и концентрации активированных ядер и ионизованных частиц веществ атмосферы, наведённая радиоактивность переносится по всей поверхности космического аппарата с ЯЭУ. Градиенты параметров атмосферы также способствуют формированию потоков среды, переносящих активированные ядра в область тени, создаваемой блоком радиационной защиты. Расщепления возбужденных ядер и переход их в новые, стабильные, состояния сопровождаются радиационными излучениями, приводящими к возникновению наведённой радиации на защищенную конструкцию КА.

В зависимости от величины градиентов параметров СВА скорости распределений активированных и ионизованных частиц в объёме атмосферы неодинаковы, ввиду чего концентрация того или иного вида частиц в разных участках объёма собственной внешней атмосферы не изотропна и находится в состоянии постоянного изменения [10]. От скорости перемещения активированных частиц СВА в области объёма конуса теневой защиты зависит мощность дозы наведённой радиации, поглощённой космическим аппаратом. Таким образом, скорость перемещения активированных частиц в объёме собственной внешней атмосферы характеризует время, за которое бортовая аппаратура и конструкционные материалы накопят дозу наведённой радиоактивности, способную повлиять на эксплуатационные характеристики КА.

Величина плотности потока нейтронов на поверхности реактора ЯЭУ составляет $10^{14} - 10^{15}$ нейтр/(см²·с) [7, 11]. Плотность потока γ -квантов составляет — $10^{18} - 10^{19}$ МэВ/(см²·с). Для оценки влияния излучения реактора на СВА КА рассмотрим состав потоков нейтронов и γ -квантов, поскольку остальные виды излучений (α -излучения, β -излучения, радиоизлучения и пр.), образующиеся при протекании ядерных реакций

в активной зоне, в расчётах не используем, ввиду их малых значений.

Из объёма активной зоны на поверхность корпуса ядерного реактора диффундируют нейтроны, которые разделяют на четыре условные группы [8, 12]:

- 1) мгновенные нейтроны, т.е. нейтроны, сопровождающие процесс деления ядер топлива;
- 2) запаздывающие нейтроны — испускаются сильно возбужденными ядрами осколков деления;
- 3) нейтроны активации — при радиоактивном распаде продуктов некоторых ядерных реакций;
- 4) фотонейтроны — образуются в результате (γ, n)-реакций на ядрах.

Мгновенные нейтроны вносят основной вклад в процессы активации ядер и ионизации атомов вещества СВА.

Мгновенные нейтроны образуются внутри активной зоны реактора практически одновременно с делениями ядер. Число мгновенных нейтронов при делениях каждого ядра U^{235} , U^{233} , Pu^{239} в среднем равно $2,5 \pm 0,03$, $2,47 \pm 0,03$ и $2,9 \pm 0,04$ соответственно. Запаздывающих нейтронов образуется меньше (0,002—0,007 нейтр/деление), они испускаются некоторыми продуктами деления с периодами полураспада 0,18—54,5 с [8].

Нейтроны деления (образованные в процессе ядерной реакции деления) имеют неодинаковые начальные кинетические энергии. Спектр нейтронов деления по начальным кинетическим энергиям (спектр Уатта) носит статистический характер [13]. Распределение нейтронов по энергиям приведено на рис. 3.

Наиболее вероятная энергия нейтронов, образовавшихся в результате деления ядерного топлива (соответствующая максимуму спектра нейтронов деления), немногим меньше 1 МэВ (точное ее значение — 0,7104 МэВ), но есть нейтроны с энер-

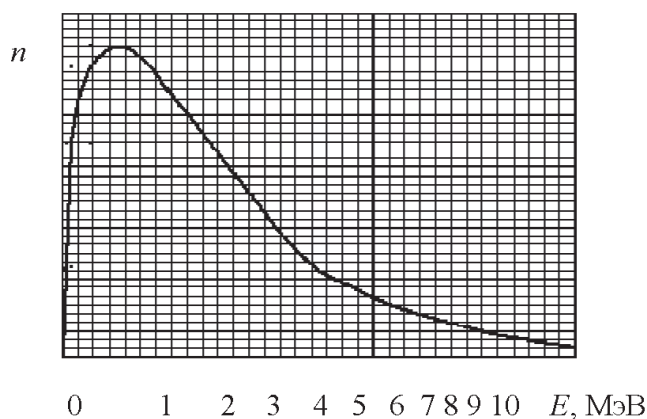


Рис. 3. Энергетический спектр нейтронов деления — спектр Уатта

гиями до 18...20 МэВ [14]. Однако таких нейтронов меньше, поэтому средняя энергия всего потока приблизительно равна 2 МэВ ($E_n = 1,935$ МэВ у U^{235} , $E_n = 2$ МэВ у Pu^{239}) [9].

Спектр нейтронов деления по начальным кинетическим энергиям показывает, что большинство нейтронов деления – это мгновенные нейтроны, энергия которых $E_n > 0,1$ МэВ.

При расчёте влияния ЯЭУ на собственную внешнюю атмосферу КА необходимо использовать приведённые выше энергии нейтронного потока от реактора.

Источников γ -излучения работающего реактора больше, и подразделяются они на следующие условные группы [8]:

- 1) излучение, сопровождающее процесс деления – мгновенное излучение;
- 2) излучение короткоживущих продуктов деления, большая часть которого испускается в первые 10 минут после деления;
- 3) захватное излучение, т.е. γ -излучение, сопровождающее (n, γ)-реакции;
- 4) излучение продуктов активации;
- 5) излучение долгоживущих продуктов деления – испускаются за время, превышающее 10 минут после деления;
- 6) излучение, сопровождающее неупругое рассеяние нейтронов;
- 7) излучение, сопровождающее (n, p)- и (n, α)-реакции;
- 8) излучение, сопровождающее аннигиляцию позитронов;
- 9) тормозное излучение, т.е. излучение, образующееся при торможении β -частиц в активной зоне.

Излучение, которое постоянно сопровождает процессы деления ядер внутри активной зоны ЯЭУ, называется мгновенным γ -излучением. На долю этого излучения из полного количества энергии, выделяющейся при одном делении, приходится 7,2–7,5 МэВ. Эта энергия может испускаться как несколькими, так и одним γ -квантом. Излучение короткоживущих продуктов деления (на одно деление) – это излучение активированных осколков деления, которые в процессе деактивации испускают γ -кванты. Количество образующихся γ -квантов в процессе деактивации соизмеримо с мгновенными γ -квантами и имеет одинаковое с ними энергетическое распределение.

При захвате нейтронов ядрами элементов, входящих в состав активной зоны, происходит их

активация и образуется захватное γ -излучение. Спектр захватного γ -излучения линейчатый, поэтому энергетическое распределение в активной зоне реактора зависит от ее конструкции и состава. Предельная энергия γ -квантов захватного излучения на поверхности реактора составляет 10 МэВ [8].

Излучение продуктов активации – это γ -излучение радиоактивного распада ядер внутри активной зоны ЯЭУ, которое образуется в результате захвата нейтронов стабильными ядрами материалов активной зоны [8].

Спектр энергии всего γ -излучения формируется в результате процессов рассеяния, распространения и потери энергии γ -квантов в материалах активной зоны и зависит от её состава, конструкционных материалов, удельной энергетической выработки топлива, мощности реактора, пространственной координаты и других параметров [8].

Оставшиеся источники γ -квантов в активной зоне играют меньшую роль в формировании энергетического потока γ -излучения из активной зоны ядерной энергетической установки, следовательно, при рассмотрении влияния на собственную внешнюю атмосферу в области реактора, не защищённой блоком радиационной защиты, их можно не учитывать.

Выводы

Ввиду увеличения потребляемой мощности бортовыми системами перспективных космических аппаратов существует тенденция к их оснащению ядерными энергетическими установками [15, 16]. В статье рассмотрены основные виды излучений, воздействующих на космические аппараты с ЯЭУ, приведена их классификация [17]. Для космического аппарата с ЯЭУ наиболее опасным является радиационное воздействие бортового реактора, которое превосходит по интенсивности солнечные и галактические излучения, формируя основной вклад в дозы радиации, накапливаемые аппаратурой и конструкционными элементами. Скорость распространения наведённой радиоактивности в объёме СВА и накопления критической дозы радиации в бортовой аппаратуре и конструкционных материалах от активированного и ионизованного вещества СВА в настоящее время не определена [18, 19]. В современных экономических условиях срок эксплуатации КА с ЯЭУ устанавливается в диапазоне от семи лет и более, что требует проведения комплекса

работ по изучению и учёту интенсивности накопления дозы радиации от СВА [20].

Основной целью дальнейших исследований должно являться определение скорости перемещения активированной и ионизированной среды по объёму СВА, а также мощности дозы наведенной радиации, которые необходимо определить с учетом разницы потенциалов между СВА и корпусом КА. В итоге теоретических исследований следует определить время достижения предельно допустимой дозы радиации на поверхностях приборного отсека и конструктивных элементов, расположенных в области тени блока радиационной защиты.

Библиографический список

1. Акишин А.И. Работоспособность космического оборудования при воздействии собственной внешней атмосферы аппарата // Труды VIII Межвузовской научной школы молодых специалистов «Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине» (19-20 ноября 2007). — М.: НИИЯФ МГУ, 2007. С. 15-19.
2. Атамасов В.Д., Данилюк А.Ю., Дементьев И.И. и др. Физико-химические процессы формирования собственной внешней атмосферы КА при воздействии высокоскоростных потоков мелкодисперсных частиц. — СПб.: КБ «Арсенал» им. М.В. Фрунзе, 2015. С. 78-84.
3. Пудовкин О.Л. Структура и электромагнитное излучение Солнца // Открытая платформа электронных публикаций SPUBLER. 2014-08-17, 22 с. URL: <https://netrs.ru/izluchenie-nashei-zvezdy-struktura-i-elektromagnitnoe-izluchenie-solnca/>
4. ГОСТ Р 25645.165–2001. Лучи космические солнечные. Вероятностная модель потоков протонов. — М.: ИПК Изд-во стандартов, 2001. — 10 с.
5. ГОСТ Р 25645.136–86. Ветер солнечный. Состав, концентрация частиц и скорость. — М.: ИПК Изд-во стандартов, 1986. — 5 с.
6. Хаффнер Дж. Ядерное излучение и защита в космосе / Сокр. пер. с англ. Ю.И. Колесникова; Под ред. д-ра техн. наук Е.Е. Ковалева. — М.: Атомиздат, 1971. — 320 с.
7. Атамасов В.Д., Бабук В.А., Немыкин С.А., Романов А.В., Соколов Ю.А., Устинов А.Н. Ядерные орбитальные комплексы: Учеб. пособие. — СПб: Профессинал, 2016. — 800 с.
8. Лекция по ОРБ. Предпоследняя. Обеспечение радиационной безопасности АЭС. URL: <https://studopedia.org/10-122995.html>
9. Вах И.В., Добрякова Л.Б. Руководство к практическим занятиям по ядерной и нейтронной физике: Учеб. пособие. — Севастополь: СИЯЭиП, 2001. — 132 с.
10. Гапоненко О.В., Гаврин Д.С., Свиридова Е.С. Анализ структуры стратегических планов развития ракетно-космической промышленности методом классификации НИОКР космических функциональных и промышленных технологий // Вестник Московского авиационного института. 2019. Т. 26. № 1. С. 64-81.
11. Юдинцев В.В. Динамика захвата сетью вращающегося объекта космического мусора // Вестник Московского авиационного института. 2018. Т. 25. № 4. С. 37-48.
12. Донсков А.В., Мишурова Н.В., Соловьев С.В. Автоматизированная система контроля состояния космического аппарата // Вестник Московского авиационного института. 2018. Т. 25. № 3. С. 151-160.
13. Разумный Ю.Н., Самусенко О.Е., Нгуен Н.К. Анализ оптимальных вариантов двухъярусных спутниковых систем непрерывного обзора сферического слоя околоземного космического пространства // Вестник Московского авиационного института. 2018. Т. 25. № 3. С. 171-181.
14. Асланов В.С., Юдинцев В.В. Стыковка с объектом космического мусора при помощи разворачиваемой упругой балки-ленты // Вестник Московского авиационного института. 2018. Т. 25. № 2. С. 16-24.
15. Акишин А.И., Новиков Л.С. Электрризация космических аппаратов. (Сер. «Космонавтика, астрономия»). — М.: Знание, 1985. — 64 с.
16. Абдурахимов А.А., Полуян М.М. Современное состояние в области исследований функционирования космических аппаратов в условиях воздействия высокоскоростных потоков мелкодисперсных частиц космотехногенного происхождения // XXV Межведомственная научно-техническая конференция космодрома «Плесецк»: Сборник трудов. — Плесецк: 1 ГИК МО РФ, 2007. С. 84-87.
17. Абдурахимов А.А., Полуян М.М. Исследование функционирования космических аппаратов в условиях воздействия высокоскоростных потоков мелкодисперсных частиц космотехногенного происхождения // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. 2007. С. 26-28.
18. Ныммик Р.А. Статистико-функциональный анализ характеристик энергетических спектров частиц (1 Z 28) солнечных космических лучей // Известия Российской академии наук. Сер. физическая. 1997. Т. 61. № 6. С. 1058-1061.
19. Ишханов Б.С., Капитонов И.М., Юдин Н.П. Частицы и атомные ядра: Учебник. — 2-е изд., испр. и доп. — М.: Изд-во ЛКИ, 2007. — 584 с.
20. Грю К.Э., Иббс Т.Л. Термическая диффузия в газах / Пер. с англ. И.С. Максимовской; Под ред. проф. А.В. Лыкова. — М.: Гостехиздат, 1956. — 183 с.

MAIN SOURCES AND RADIATION COMPOSITION AFFECTING EIGEN EXTERNAL ATMOSPHERE OF A SPACECRAFT WITH NUCLEAR POWER PLANT

Kolbasin I.V.

*Arsenal design Bureau named after M.V. Frunze,
1-3, Komsomol str., Saint Petersburg, 195009, Russia
e-mail: kolbasin777ivan@mail.ru*

Abstract

When in orbit, the spacecraft is affected by natural sources of radiation (solar and galactic cosmic rays, radiation of the Earth radiation belts) and artificial sources (the onboard radiation sources), which affect the spacecraft in a wide range of energies, penetrate through the eigen external atmosphere (EEA) deep into the structural elements, where particles of energies conversion occurs.

The following energies, affecting a spacecraft, relate to the energies of natural origin:

- solar cosmic rays, including electromagnetic radiation (solar radiation) and corpuscular radiation (solar wind);
- galactic cosmic rays, i.e. isotropic cosmic radiation coming from the interior of the galaxy;
- radiation belts of the Earth, namely radiation of natural origin, formed by the solar wind and the Earth magnetosphere.

The spacecraft onboard equipment is affected not only by sources of natural origin, but there are also artificial ones situated onboard the spacecraft. Nuclear power plant (NPP) is an example of an artificial source that generates a flow of energy that exceeds all natural impacts by its intensity.

Radiation from natural and artificial sources affects the spacecraft through the medium of its eigen external atmosphere (EEA). Since the EEA is not static, but is constantly mixing as the result of the existing of pressure gradients, temperature, and concentration of activated nuclei and ionized particles of atmospheric substances, the induced radioactivity is being carried over the entire surface of the spacecraft with NPP. Gradients of atmospheric parameters also contribute to medium flows formation that transfer activated nuclei to the shadow area created by the radiation protection unit. The exited nuclei are splitting and their transition to new stable states is accompanied by radiation, which leads to the occurrence of induced radiation on the protected spacecraft structure.

The article deals with the main types of radiation that affect spacecraft with nuclear power plants, and gives their classification. Radiation impact of the onboard reactor, which surpasses solar and galaxy

radiation by the intensity, forming basic contribution to the radiation doses, being accumulated by the equipment and structural elements, is the most dangerous for a spacecraft with NPP. The rate of the induced radioactivity propagation in the EEA volume and accumulation of critical dose of radiation in both onboard equipment and structural elements from activated and ionized EEA substance has not been determined at present.

In the existing economic conditions, the service life of a spacecraft with nuclear power plant is set within the range of seven years or more, which requires a complex of works to study and account for the intensity of radiation dose accumulation from the EEA.

Keywords: onboard power plant, eigen external atmosphere, induced radioactivity.

References

1. Akishin A.I. *Materialy VIII Mezhdvuzovskoi nauchnoi shkoly molodykh spetsialistov "Kontsentrirovannye potoki energii v kosmicheskoi tekhnike, elektronike, ekologii i meditsine" (19-20 November 2007)*, Moscow, NIIYaF MGU, 2007, pp. 15-19.
2. Atamasov V.D., Danilyuk A.Yu., Dement'ev I.I. et al. *Fiziko-khimicheskie protsessy formirovaniya sobstvennoi vneshnei atmosfery KA pri vozdeistvii vysokoskorostnykh potokov melkodispersnykh chastits* (Physical and chemical processes of formation of the SPACECRAFT eigen external atmosphere under the impact of high-speed flows of fine particles), Saint Petersburg, KB "Arsenal" im. M.V. Frunze, 2015, pp. 78-84.
3. Pudovkin O.L. *Struktura i elektromagnitnoe izluchenie Solntsa*, 2014-08-17. URL: <https://netrs.ru/izluchenie-nashei-zvezdy-struktura-i-elektromagnitnoe-izluchenie-solnca/>
4. *Luchi kosmicheskie solnechnye. Veroyatnostnaya model' potokov protonov. GOST R 25645.165-2001* (Solar space rays. Probabilistic model for proton fluxes, State Standard R 25645.165-2001), Moscow, Standarty, 2001, 10 p.
5. *Veter solnechnyi. Sostav, kontsentratsiya chastits i skorost'. GOST R 25645.136-86* (Solar wind. Composition, particle concentration and velocity, State

- Standard R 25645.136–86), Moscow, Standarty, 1986, 5 p.
6. Haffner J.W. *Radiation and Shielding in Space* (Nuclear Science & Technology). Academic Press Inc., U.S., 1968, 347 p.
 7. Atamasov V.D., Babuk V.A., Nemykin S.A. et al. *Yadernye orbital'nye komplekсы* (Nuclear orbital complexes), Saint Petersburg, Professional, 2016, 800 p.
 8. *Lektsiya po ORB. Predposlednyaya. Obespechenie radiatsionnoi bezopasnosti AES*. URL: <https://studopedia.org/10-122995.html>
 9. Vakh I.V., Dobryakova L.B. *Rukovodstvo k prakticheskim zanyatiyam po yadernoi i neitronnoi fizike* (Guide to practical classes in nuclear and neutron physics), Sevastopol, SIYaEiP, 2001, 132 p.
 10. Gaponenko O.V., Gavrin D.S., Sviridova E.S. Structure analysis of the strategic plans of the space-rocket industry development by method of space functional and industrial technologies R&D classification. *Aerospace MAI Journal*, 2019, vol. 26, no. 1, pp. 64-81.
 11. Yudintsev V.V. Rotating space debris objects net capture dynamics. *Aerospace MAI Journal*, 2018, vol. 25, no. 4, pp. 37-48.
 12. Donskov A.V., Mishurova N.V., Solov'ev S.V. Automated system for space vehicle status monitoring. *Aerospace MAI Journal*, 2018, vol. 25, no. 3, pp. 151-160.
 13. Razoumny Yu.N., Samusenko O.E., Nguyen N.Q. Optimal options analysis of two-tier satellite systems for near-earth space spherical layer continuous coverage. *Aerospace MAI Journal*, 2018, vol. 25, no. 3, pp. 171-181.
 14. Aslanov V.S., Yudintsev V.V. Docking with space debris employing the unfolding flexible beam-strap. *Aerospace MAI Journal*, 2018, vol. 25, no. 2, pp. 16-24.
 15. Akishin A.I., Novikov L.S. *Elektrizatsiya kosmicheskikh apparatov* (Electrification of space vehicles), Moscow, Znanie, 1985, 64 p.
 16. Abdurakhimov A.A., Poluyan M.M. *Materialy XXV Mezhvedomstvennoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii kosmodroma "Plesetsk"*, Plesetsk, 1 GIK MO RF, 2007, pp. 84-87.
 17. Abdurakhimov A.A., Poluyan M.M. *Materialy Voennno-kosmicheskoi akademii imeni A.F. Mozhaiskogo*, 2007, pp. 26-28.
 18. Nymmik R.A. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya fizicheskaya*, 1997, vol. 61, no. 6, pp. 1058-1061.
 19. Ishkhanov B.S., Kapitonov I.M., Yudin N.P. *Chastitsy i atomnye yadra* (Particles and atomic nuclei), Moscow, LKI, 2007, 584 p.
 20. Grew K.E., Ibbs T.L. *Thermal diffusion in gases*. Cambridge University press, 1952, 243 p.