



DOI: 10.22363/2312-8143-2025-26-4-376-387

EDN: CVILLK

Научная статья / Research article

Особенности функционирования и способы радиационной защиты космического аппарата с ядерной энергоустановкой в газопылевой плазменной среде собственной внешней атмосферы

А.Н. Устинов^a, В.Д. Атамасов^{b,✉}^a ОАО «МЗ «Арсенал», Санкт-Петербург, Российская Федерация^b Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург, Российская Федерация

✉ vldmatamasov@mail.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 14 апреля 2024 г.

Доработана: 10 июля 2024 г.

Принята к публикации: 12 августа 2025 г.

Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Аннотация. Эксплуатация космических аппаратов с ядерными энергетическими установками, функционирующими в условиях воздействия собственной внешней атмосферы, сопряжена с эффектом переноса радиации из оклореакторной зоны в зону около приборного отсека. Данное явление получило название «наведенная радиация». Наведенная радиация оказывает негативное воздействие на оборудование в зоне около приборного отсека. Для защиты от наведенной радиации предложено совместно с традиционными методами защиты использовать специальные устройства, обеспечивающие дополнительную радиационную защиту космических аппаратов с ядерными энергетическими установками. К их числу относятся положительно заряженный разделительный экран; газовые сопла для продувки забортного пространства; электронные нейтрализаторы плазмы с термоэмиссионными катодами. Совместное использование традиционных методов и дополнительных устройств защиты для уменьшения негативного воздействия ядерного реактора значительно продлит срок службы космического аппарата.

Ключевые слова: собственная внешняя атмосфера, ядерная энергетическая установка, наведенная радиация

Вклад авторов:

Устинов А.Н. — научное руководство, научное обоснование термофизических процессов в забортной среде КА, написание текста, подготовка графического материала. Атамасов В.Д. — конструкторская проработка устройств рассеяния среды в ОКП, подготовка графического материала. Оба автора ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

Для цитирования:

Устинов А.Н., Атамасов В.Д. Особенности функционирования и способы радиационной защиты космического аппарата с ядерной энергоустановкой в газопылевой плазменной среде собственной внешней атмосферы // Вестник Российской Федерации дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2025. Т. 26. № 4. С. 376–387. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2025-26-4-376-387>

Functional Features and Radiation Protection Methods for a Spacecraft with a Nuclear Power Plant in the Gas-Dust Plasma Environment of its Own External Atmosphere

Aleksander N. Ustinov^a, Vladimir D. Atamasov^{b✉}

^a Arsenal Machine Building Plant, Saint-Petersburg, Russian Federation

^b Baltic State Technical University “VOENMEH” named after D.F. Ustinov, Saint-Petersburg, Russian Federation

✉ vldmatamasov@mail.ru

Article history

Received: April 14, 2024

Revised: July 10, 2024

Accepted: August 12, 2025

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Abstract. The operation of spacecraft with nuclear power plants operating under the influence of their own external atmosphere is associated with the effect of radiation transfer from the near-reactor zone to the area near the instrument compartment. This phenomenon is called “induced radiation”. Induced radiation has a negative effect on the equipment in the area near the instrument compartment. To protect against induced radiation, this article suggests, together with traditional protection methods, using special devices that provide additional radiation protection for spacecraft with nuclear power plants. These include: a positively charged separation screen; gas nozzles for purging the outboard space; electronic plasma neutralizers with thermionic cathodes. The combined use of traditional methods and additional protection devices to reduce the negative impact of a nuclear reactor will significantly extend the service life of the spacecraft.

Keywords: own external atmosphere, nuclear power plant, induced radiation

Authors' contribution

Ustinov A.N. — scientific guidance, scientific justification of thermophysical processes in the external environment of the spacecraft, text writing, preparation of graphic material. Atamasov V.D. — design development of devices for dissipating the environment in the NES, preparation of graphic material. Both authors read and approved the final version of the article.

For citation

Ustinov AN, Atamasov VD. Functional features and radiation protection methods for a spacecraft with a nuclear power plant in the gas-dust plasma environment of its own external atmosphere. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2025;26(4):376–387. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2025-26-4-376-387>

Введение

Исследование явления наведенной радиации собственных внешних атмосфер космических аппаратов необходимо при внедрении ядерных систем энергообеспечения в составы перспективных космических аппаратов (КА). Данное явление возникает в результате излучения ядерного реактора, который активирует ядра веществ, входящих в состав забортной газопылевой плазменной среды [1]. После истечения периода полураспада половина возбужденных ядер деактивируется в результате их расщеплений, сопровождаемых излучениями корпускулярных потоков и γ -квантов. Это явление, как правило, осуществляется в процессе

перемещения активированной газоплазменной среды собственной внешней атмосферы в обход блока радиационной защиты теневого типа в область теневой радиационной защиты.

Область плазмы, сформировавшаяся в забортной атмосфере рядом с работающим ядерным реактором на космическом аппарате, содержит большое количество заряженных частиц и имеет высокую температуру. Процессы ионизации атомов и возбуждения ядер атмосферных веществ доминируют в данной области. Деактивация радионуклидов в защищенной от ядерного реактора области приводит к негативным изменениям свойств материалов и поражениям электронных устройств, что может привести к деградациям бортовых систем КА,

оснащенных ядерными энергетическими установками. Процесс накопления радиоактивных изотопов в веществах СВА под действием облучения ядерным реактором называется активацией среды [2–5].

Еще раз акцентируем, что процессы рекомбинации и расщепления ядер при их деактивации в области атмосферы, где расположены приборные отсеки, целевые и вспомогательные системы, протекают за счет вторичных электромагнитных и корпускулярных излучений. Образовавшиеся в СВА градиенты концентраций, потенциалов, температуры и давления приводят к интенсивному перемешиванию («бурлению») атмосферной среды и переносу облученных ядерным реактором веществ, перемещающихся снаружи блока теневой радиационной защиты в зону облучения КА, окружающую его другую оконечность, где размещены его защищенные отсеки и конструктивные устройства. Излучения, сопровождающие вторичные процессы ядерных превращений в атомах атмосферных веществ, вызывают поражение чувствительной к такому излучению электронной и другой аппаратуры наведенной радиацией СВА [5; 6]. Также они способны вызвать существенное негативное изменение свойств конструкционных материалов, особенно прочностных и жесткостных характеристик высоких упругих элементов. Следует помнить, что данное функциональное поражение КА осуществляется за счет энергии, подводимой от собственного ядерного реактора.

Радиоактивность веществ возникает под действием ионизирующего излучения, такого как потоки нейтронов и гамма-квантов, которые являются наиболее интенсивно излучаемыми активными зонами ядерных реакторов космического базирования. Этот процесс называется активацией СВА первичной радиацией ядерного реактора. Вещества СВА при облучении превращаются в радиоактивные изотопы с различными временами полураспадов, которые излучают вторичную радиацию спустя некоторое (разное для различных веществ) время после прекращения облучения реактором. Особо

опасную радиоактивность вызывает нейтронное облучение, что происходит из-за свойств нейтронов, имеющих достаточно большую энергию (не меньше нескольких МэВ), способную инициировать реакции ядерных превращений. Заряженные частицы и гамма-кванты взаимодействуют с электронными оболочками атомов намного интенсивнее, чем с ядрами атомов, и быстро теряют энергию, теряя и способность к активации ядер. Положительно заряженные частицы, такие как протоны и альфа-частицы, также теряют энергию, упруго рассеиваясь на ядрах [7; 8].

Таким образом, нейтроны обладают наибольшей способностью создавать наведенную радиацию, которая происходит при их поглощении ядрами или выбивании из ядер протонов, нейтронов или кластеров нуклонов, например альфа-частиц. Образование радиоактивных изотопов происходит как на поверхности, так и в толще вещества конструктивных элементов и зон облучения атмосферы КА. Радиоактивные изотопы распадаются и испускают вторичное излучение, которое называется наведенной радиацией.

1. Основные физические процессы, протекающие в собственной внешней атмосфере, облучаемой ядерным реактором космического аппарата

Установлено, что при расщеплении ядер атомов образуется около 80 различных изотопов, которые делятся примерно 40 способами. Стабильность этих изотопов отличается: некоторые из них полностью стабильны, в то время как другие радиоактивно распадаются с периодами полураспадов в секунды, часы и сутки. Разлагающиеся изотопы могут порождать стабильные и нестабильные дочерние изотопы. Как результат, смесь изотопов быстро становится сложной. Например, при ядерных взрывах в продуктах распада было обнаружено порядка 300 изотопов 36 элементов.

В область конструкции и приборного отсека КА перетекают короткоживущие изотопы, которые быстро испускают энергию распада.

Они сбрасывают часть этой энергии на конструктивные элементы и приборный отсек, другая часть излучается в космическое пространство [9–13]. Долгоживущие изотопы, напротив, испускают энергию в течение длительного времени, что создает менее интенсивное излучение, но с более высоким сроком жизни. Таким образом, продукты распада являются источником высокого уровня радиации, который не снижается в течение времени работы ядерного реактора в условиях атмосферного окружения.

Большинство элементов таблицы Менделеева исследованы на радиационную стойкость, и после их экспонирования на излучениях ядерных реакторов были обнаружены явления искусственной радиоактивности.

На рис. 1–4 представлены схемы структурно-функциональных моделей сложных технических систем, каждая из которых включает космический аппарат с ядерной энергетической установкой и его собственную внешнюю атмосферу. Космический аппарат состоит из ядерного реактора, блока теневой радиационной защиты, системы отодвижения ядерного реактора

от основной конструкции аппарата, которая включает выносные упругие элементы и модули целевых и служебных систем.

На рис. 3, 4 и 5 показаны не только элементы сложной технической системы, но и средства дополнительной функциональной защиты от наведенной радиации, генерируемой веществами газопылевой атмосферы на конструкцию КА, расположенную за блоком теневой радиационной защиты. Для обеспечения дополнительной радиационной защиты используются экран (рис. 3, 5), инжектор электронов (рис. 3, 4 и 5) и газовые сопла (рис. 4, 5). Разделяющий атмосферу элемент, выполняющий функцию экрана, препятствует перетеканию газопылевой среды из окореакторного пространства в область, окружающую остальную конструкцию КА.

Протекающие под действием солнечных и галактических космических излучений процессы ионизации забортной среды атмосферы КА с неработающим ядерным реактором вызывают генерирование электрических зарядов: отрицательного на корпусе конструкции КА и положительного в объеме СВА, как показано на рис. 1.

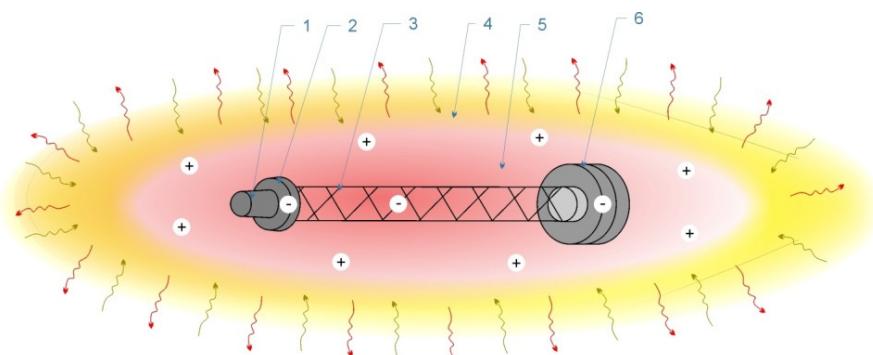


Рис. 1. Схема структурно-функциональной модели КА с выключенным ядерным реактором (в подкритическом состоянии) в условиях воздействий собственной внешней газопылевой атмосферы:
1 — ядерный реактор; 2 — блок теневой радиационной защиты; 3 — система отодвижения ядерного реактора;
4 — поверхностный слой собственной внешней атмосферы; 5 — собственная внешняя атмосфера;
6 — модуль специальных и служебных систем
Источник: выполнено В.Д. Атамасовым

Figure 1. The scheme of the structural and functional model of a spacecraft with a switched-off nuclear reactor (in a subcritical state) under the influence of its own external gas-dust atmosphere:
1 — a nuclear reactor; 2 — a block of shadow radiation protection; 3 — a system for moving away a nuclear reactor;
4 — a surface layer of its own external atmosphere; 5 — its own external atmosphere;
6 — a module of special and service systems
Source: by V.D. Atamasov

Протекающее разделение заряженностей поверхности КА (отрицательной) и объема СВА (положительной), осуществляемое вследствие значительного отличия скоростей перемещения в зоне борта пространстве легких отрицательных частиц (электронов) по сравнению со скоростями тяжелых (положительно заряженных частиц) ионов, формирует кулоновские силы притяжения, удерживающие атмосферу КА от рассеяния в космическом пространстве. Наружные слои СВА, выделенные на рисунках цветом, воспринимают излучения космоса и подвергаются наиболее интенсивному радиационному воздействию. Поддержание заряженного состояния газопылевой среды и корпуса КА достигается за счет диффузии заряженных частиц из внешних слоев атмосферы в ее внутренние объемы. При этом перемешивание атмосферной среды при неработающем ядерном реакторе происходит в основном в радиальном

направлении. Однако включение ядерного реактора при наличии внешней атмосферы приводит к кардинальному изменению состояния сложной технической системы. На рис. 2 показано, что без дополнительных средств защиты в зоне борта возникают потоки не только в радиальном, но и в продольном направлении.

Продольные перемещения образуются в связи с наличием избыточного потенциала среды и значительным увеличением объемного заряда и температуры в области атмосферы около ядерного реактора. Это приводит к переносу активированных излучениями ядерного реактора веществ в теневую область блока радиационной защиты, и возникновению наведенной радиации на защищенные элементы конструкции космического аппарата. Для предотвращения такого переноса установлен защитный экран (рис. 3).

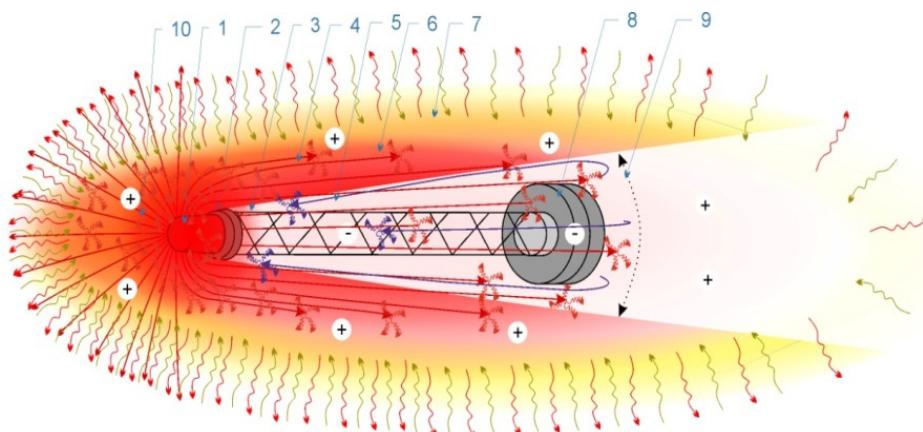


Рис. 2. Схема структурно-функциональной модели КА с активированным ядерным реактором в условиях воздействий собственной внешней газопылевой плазменной атмосферы:

- 1 — ядерный реактор; 2 — блок теневой радиационной защиты;
- 3 — система отдвижения ядерного реактора; 4 — продольные потоки МДЧ от ядерного реактора;
- 5 — продольные потоки мелкодисперсных частиц к ядерному реактору; 6 — собственная внешняя атмосфера аппарата;
- 7 — поверхностный слой собственной внешней атмосферы; 8 — модули специальных и служебных систем;
- 9 — телесный угол теневой радиационной защиты; 10 — область интенсивной активации ядер веществ атмосферы

Источник: выполнено В.Д. Атамасовым

Figure 2. The scheme of the structural and functional model of a spacecraft with an activated nuclear reactor under the influence of its own external gas-dust plasma atmosphere.

- 1 — a nuclear reactor; 2 — a block of shadow radiation protection; 3 — a system for moving a nuclear reactor;
- 4 — longitudinal fluxes of MDC from a nuclear reactor; 5 — longitudinal fluxes of fine particles to a nuclear reactor;
- 6 — its own external atmosphere of the apparatus; 7 — the surface layer of its external atmosphere;
- 8 — modules of special and service systems; 9 — solid angle of shadow radiation protection;
- 10 — the area of intensive activation of the nuclei of atmospheric substances

Source: by V.D. Atamasov

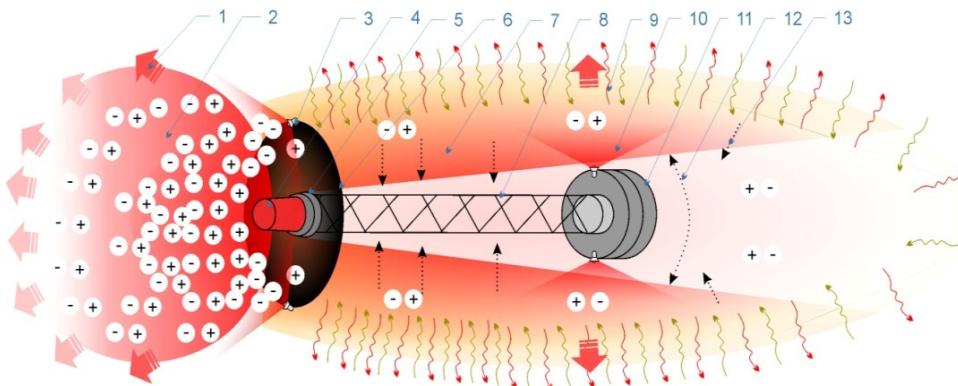


Рис. 3. Схема структурно-функциональной модели КА с активированным ядерным реактором в условиях воздействий собственной внешней газопылевой плазменной атмосферы, разделенной защитным экраном с термоэмиссионными нейтрализаторами плазменной среды:

- 1 — рассеивающийся нейтрализованный газопылевой поток из области интенсивной активации ядер веществ атмосферы;
- 2 — потоки нейтрализованной плазмы;
- 3 — электронный нейтрализатор плазмы с термоэмиссионным катодом;
- 4 — активная зона ядерного реактора;
- 5 — блок радиационной защиты;
- 6 — разделятельный экран;
- 7 — собственная внешняя атмосфера КА за блоком радиационной защиты;
- 8 — система отдвижения ядерного реактора;
- 9 — поверхностный слой собственной внешней атмосферы;
- 10 — диаграмма направленности потока электронов из электронного нейтрализатора плазмы (с термоэмиссионным катодом);
- 11 — модуль специальных и служебных систем;
- 12 — конус тени блока радиационной защиты;
- 13 — область наведенной радиации в конус теневой защиты

Источник: выполненено В.Д. Атамасовым

Figure 3. The scheme of the structural and functional model of a spacecraft with an activated nuclear reactor under the influence of its own external gas-dust plasma atmosphere separated by a shield with thermionic plasma neutralizers:

- 1 — a scattering neutralized gas-dust stream from the area of intense activation of the nuclei of atmospheric substances;
- 2 — neutralized plasma streams;
- 3 — an electronic plasma neutralizer with a thermomission cathode;
- 4 — the active zone of a nuclear reactor;
- 5 — a radiation protection unit;
- 6 — a separation screen;
- 7 — the spacecraft's own external atmosphere behind the radiation protection unit;
- 8 — the system of separation of a nuclear reactor;
- 9 — the surface layer of its own external atmosphere;
- 10 — a diagram of the direction of the electron flow from an electronic plasma neutralizer (with a thermionic cathode);
- 11 — the module of special and service systems;
- 12 — the cone of the shadow of the radiation protection unit;
- 13 — the area of induced radiation in the cone of shadow protection

Source: by V.D. Atamasov

2. Способы защиты от наведенной радиации

Для обеспечения интенсивного рассеивания атмосферы в космическом пространстве используются термоэмиссионные источники электронов. Они нейтрализуют положительный объемный заряд атмосферы и снижают отрицательный заряд поверхности конструкции аппарата, создавая условия для рассеивания атмосферы. Это позволяет устранить электростатические притяжения среды. Для создания электростатического отталкивания активированной атмосферной среды от разделяющего экрана на него наносят положительный потенциал (показано на рис. 3 и 4).

На рис. 4 изображена модель сложной технической системы «КА с ЯЭУ + СВА», которая использует другую систему защиты от наведенной радиации. В данной модели для очистки забортного пространства от радиационно-активной среды предусмотрено пневматическое устройство, с помощью которого осуществляется продувка забортного пространства, чтобы очистить его от газопылевой среды. Для этой операции предлагается использовать сжатый газ, например азот.

Для устранения электростатических сил притяжения, действующих между отрицательно заряженным корпусом КА и положительным объемным зарядом собственной атмосферы, используются термоэмиссионные инжекторы

электронов, установленные в области около ядерного реактора и на корпусе приборно-агрегатного отсека (см. рис. 3). Для компенсации реактивных воздействий истекающего газа на

корпус аппарата пневматическая система имеет газовые сопла, которые обдувают зондирование пространство в противоположных направлениях.

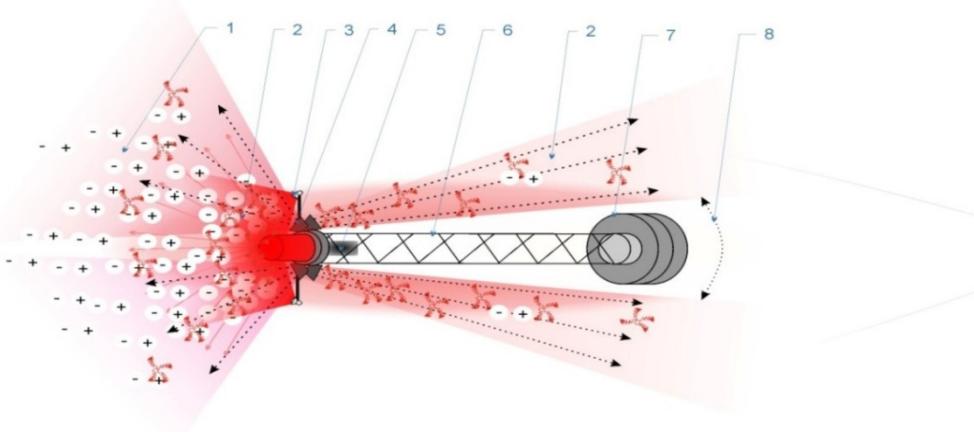


Рис. 4. Схема структурно-функциональной модели КА с активированным ядерным реактором в условиях воздействий собственной внешней газопылевой атмосферы, продуваемой потоками газа с целью очистки зондирования пространства от наведенной радиации:

- 1 — собственная внешняя газопылевая атмосфера с активированными излучениями реактора ядрами веществ;
- 2 — потоки газа очистки зондирования пространства от наведенной радиации;
- 3 — электронный нейтрализатор плазмы с термоэмиссионным катодом;
- 4 — сопла газового устройства;
- 5 — баллон сжатого газа очистки;
- 6 — система отвода ядерного реактора;
- 7 — приборный отсек;
- 8 — конус тени блока радиационной защиты

Источник: выполнено В.Д. Атамасовым

Figure 4. The scheme of the structural and functional model of a spacecraft with an activated nuclear reactor under the influence of its own external gas-dust atmosphere blown by gas flows in order to clean the outboard space from induced radiation:

- 1 — its own external gas-dust atmosphere with activated radiation of the reactor by the nuclei of substances;
- 2 — gas streams of purification of the outboard space from induced radiation;
- 3 — electronic plasma neutralizer with a thermionic cathode;
- 4 — nozzles of the gas device;
- 5 — a cylinder of compressed gas purification;
- 6 — a system for moving the nuclear reactor;
- 7 — instrument compartment;
- 8 — cone of the shadow of the radiation protection unit

Source: by V.D. Atamasov

Полученные патенты [14; 15] изобретений касаются средств защиты от наведенной радиации собственной внешней атмосферы при функционировании ядерного реактора системы энергообеспечения КА. Факторы, приводящие к образованию условий для активации ядер веществ атмосферы и переносу активированной среды в обход блока радиационной защиты в область модуля целевых и обеспечивающих бортовых систем конструкции КА, были обоснованы в результате анализа химических и ядерных процессов в СВА КА, имеющего бортовую ядерную энергоустановку.

Структурно-функциональные модели были созданы для представления конструкций КА с ядерными энергоустановками и собственными внешними газопылевыми плазменными атмосферами, а также для протекающих электрохимических и ядерных процессов, которые приводят к появлению наведенных радиаций. Были рассмотрены различные конструктивные схемы защиты космического аппарата от факторов радиационного воздействия бортового ядерного реактора на конструкционные материалы и электронные приборы через наведенную радиацию внешней собственной атмосферы.

3. Универсальный способ защиты от наведенной радиации

Выполним анализ недостатков каждого из предложенных методов, ограничивающих сроки их активных функционирований. Использование автономной системы с продувкой забортного пространства длительное время (7...10 лет) требует наличия большого запаса расходуемого газа, что делает систему газоснабжения неприемлемо массивной. Система дополнительной радиационной защиты с разделительным экраном, отталкивающим облученную (активированную) радиационными излучениями ядерного реактора атмосферную среду (см. рис. 3), имеет ограничения, связанные с конструктивно допустимым диаметром экрана. В аномальных ситуациях наружный диаметр оклореакторной области СВА может превышать диаметр защитного экрана, что приведет к затеканию активированной реактором атмосферы к защищенным отсекам КА и к прекращению его функционирования. С целью устранения указанных недостатков целесообразно объединить запатентованные способы в единую дополнительную к традиционным методам радиационную защиту КА, для управления функционирования которой в защищенную область забортного пространства устанавливается прибор (ионизационная камера), контролирующий интенсивность наведенного радиационного излучения СВА.

На рис. 5 представлена новая схема структурно-функциональной модели сложной технической системы, в состав которой входит космический аппарат с ядерной энергетической установкой и окружающая его «собственная внешняя атмосфера». Как и в предыдущих вариантах (рис. 3 и 4), космический аппарат (рис. 5) состоит из ядерного реактора 5, блока теневой радиационной защиты 6, системы отодвижения ядерного реактора от защищенных частей конструкции аппарата 10, а также универсального комплекса средств дополнительной защиты от наведенной радиации, переносимой веществами газопылевой атмосферы на часть конструкции КА, расположенную в тени конуса блока радиационной защиты 12.

В качестве элементов системы дополнительной радиационной защиты используются следующие устройства: разделительный экран 7, электронные нейтрализаторы плазмы с термоэмиссионными катодами 4 и сопла газовых устройств 3 и 8.

Итак, на рис. 5 представлено знаково-символическое и пространственно-схематическое изображение структурно-функциональной схемы КА с ядерным источником электрической энергии и предлагаемой авторами универсальной системой радиационной безопасности. Предлагаемая система радиационной безопасности включает в свой состав традиционные и дополнительные способы защиты устройств, чувствительных к радиационным излучениям. Показано, что ядерный реактор с энергопреобразующим устройством располагается на оконечности конструкции КА и имеет конструктивную связь с блоком радиационной защиты 6, создающим в радиационном поле ядерного реактора «теневую» область 15, в которой плотность излучения ослаблена до допустимого уровня. Указанная область выделена на рисунке за разделительным экраном в виде усеченного конуса темно-серого цвета.

Естественно, что выполнить блок радиационной защиты, полностью окружающий поверхность реактора-преобразователя, как и отодвинуть реактор на очень большое расстояние, не представляется возможным, ввиду неприемлемо больших массогабаритных характеристик таких систем. Авторами было предложено осуществлять очистку забортного пространства КА от СВА с помощью новой универсальной дополнительной системы радиационной безопасности. Универсальная система включает в свой состав дополнительные средства радиационной безопасности, обеспечивающие очистку забортного пространства от СВА, как используемую в запатентованном методе очистки с разделительным экраном (см. рис. 3), так и разработанную в методе с продувкой забортного пространства газом очистки (см. рис. 4). Совместное использование указанных методов защиты от наведенной радиации способствует значительному повышению надежности и долговечности КА с ЯЭУ.

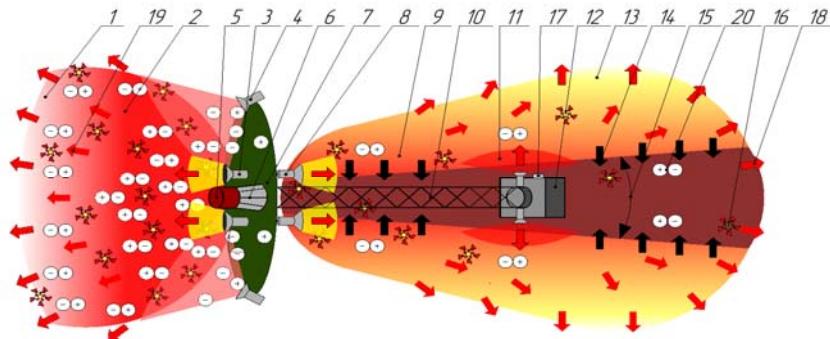


Рис 5. Схема структурно-функциональной модели КА с активированным ядерным реактором с элементами дополнительной радиационной защиты целевых и служебных систем в условиях воздействия плазменной СВА:

1 — рассеивающийся нейтрализованный газопылевой поток из области интенсивной активации ядер веществ атмосферы; 2 — нейтрализованная плазменная среда в оклореакторном пространстве СВА; 3, 8 — сопла газового устройства; 4 — электронный нейтрализатор плазмы с термоэмиссионным катодом; 5 — активная зона ядерного реактора; 6 — блок радиационной защиты; 7 — положительно заряженный разделительный экран, отталкивающий плазму СВА с положительным пространственным зарядом; 9 — собственная внешняя атмосфера КА за блоком радиационной защиты; 10 — система отдвижения ядерного реактора; 11 — диаграмма направленности потока электронов из электронного нейтрализатора плазмы (с термоэмиссионным катодом); 12 — модуль целевых и служебных систем; 13 — рассеивающийся нейтрализованный газопылевой поток из области СВА за блоком радиационной защиты; 14 — наведенная радиация в область тени блока радиационной защиты; 15 — конус тени блока радиационной защиты; 16 — реакция деактивации (превращения) активированного ядра вещества СВА; 17 — датчик интенсивности наведенной радиации; 18, 19 — направление движения потоков СВА; 20 — нейтрализованная плазменная среда за блоком теневой радиационной защиты

Источник: выполнено А.Н. Устиновым

Figure 5. The scheme of the structural and functional model of a spacecraft with an activated nuclear reactor with elements of additional radiation protection of target and service systems under the influence of plasma own external atmosphere:

1 — ascattering neutralized gas-dust stream from the area of intense activation of the nuclei of atmospheric substances; 2 — a neutralized plasma medium in the near-reactor space of its own external atmosphere; 3, 8 — a gas device; 4 — an electronic plasma neutralizer with a thermionic cathode; 5 — the active zone of a nuclear reactor; 6 — a radiation protection unit; 7 — a positively charged separation screen repelling the plasma of its own external atmosphere with a positive spatial charge; 9 — the spacecraft's own external atmosphere behind the radiation protection unit; 10 — a system for moving away a nuclear reactor; 11 — a directional diagram of the electron flow from an electronic plasma neutralizer (with a thermionic cathode); 12 — a module of target and service systems; 13 — a scattering neutralized gas-dust flow from the area of its own external atmosphere behind the radiation protection unit; 14 — induced radiation into the shadow area of the radiation protection unit; 15 — the cone of the shadow of the radiation protection unit; 16 — the reaction of deactivation (transformation) of the activated core of the substance of its own external atmosphere; 17 — the intensity sensor of induced radiation; 18, 19 — the direction of movement of the flows of its own external atmosphere; 20 — the neutralized plasma environment behind the block of shadow radiation protection

Source: by A.N. Ustinov

Для управления системой очистки предусмотрен датчик интенсивности наведенной радиации 17 — это ионизационная камера, установленная в защищенной области, формирующая сигнал, запускающий газовую систему продувки в случае превышения допустимого уровня наведенной радиации.

Включение ядерного реактора в условиях наличия СВА приводит к формированию турбулентных плазменных потоков, которые направлены относительно продольной оси КА по спиралеобразным (вихревым) траекториям. Напом-

ним, что такие перемещения появляются вследствие разогрева функционирующим ядерным реактором забортной среды, формирования в ней интенсивных процессов ионизации атомов и активации ядер ингредиентов СВА, в свою очередь порождающих выталкивающие градиенты параметров атмосферы из оклореакторной области СВА в удаленное от реактора забортное пространство [16–19].

Таким образом, обосновано, что для предотвращения образования наведенной радиации на чувствительные элементы КА следует исполь-

зователь предлагаемую впервые универсальную дополнительную (по отношению к традиционным) систему радиационной безопасности, в состав которой должны быть включены:

- разделительный экран, заряженный отталкивающим положительным потенциалом, ограничивающим движение к области теневой радиационной защиты сильно активированной среды от ядерного реактора;
- термоэмиссионные инжекторы электронов, способствующие ликвидации электростатического притяжения селективно разделяющихся зарядов: отрицательного на корпусе КА, положительного в пространстве забортной среды, удерживающих друг около друга силами кулоновского притяжения;
- газовая система, осуществляющая периодическую очистку КА с ЯЭУ от радиационно агрессивной СВА с помощью продувки забортного пространства потоками газа очистки посредством противоположно направленных безмоментных сопел. Безмоментные сопла спарены встречно и соосно, что обеспечивает компенсацию реактивного воздействия системы продувки на движение КА по орбите функционирования.

Функционирование универсальной системы радиационной защиты заключается в следующих особенностях:

- после нейтрализации электростатического положительного пространственного заряда среды осуществляется ее рассеяние вакуумом окружающего космического пространства;
- если диаметр области СВА в околосреакторном пространстве превышает диаметр разделительного экрана, то сильно активированная среда будет проникать в защищенную область КА. В таком ситуации датчики интенсивностей наведенной радиации, установленные на корпусе приборно-агрегатного отсека, сформируют сигнал на включение другого — более активного метода защиты — подсистемы газовой продувки забортного пространства КА с одновременным включением всех нейтрализаторов плазмы СВА.

Использование указанных устройств дополнительной радиационной безопасности КА

с ЯЭУ позволяет минимизировать их массовые характеристики и значительно повышает эффективность функционирования при экономическом (кратковременном) расходовании продувочного газа. Следствием дублирования друг друга указанных подсистем является повышение надежности радиационной защиты КА с ядерной системой энергообеспечения в условиях функционирования в окружении СВА.

Были получены патенты на изобретения, которые позволяют избавиться от радиационных процессов, вызываемых излучением ядерных реакторов.

Заключение

Выполнен физический анализ процессов, протекающих в СВА, при использовании в составе КА ядерной энергетической установки. Отражены ключевые факторы негативного влияния наведенной собственной внешней атмосферой радиации на защищаемую область КА.

1. С помощью плоских структурно-функциональных моделей процессов ядерных превращений в забортных средах КА с ЯЭУ изучено явление наведенной радиации СВА.

2. Разработаны технические средства защиты от наведенной радиации СВА при функционирующем ядерном реакторе. Применение этих разработок в конструкциях аппаратов с ядерными энергетическими установками позволяет снизить радиационные нагрузки, возникающие на орбитах функционирования, до величин воздействий излучения, поступающего из окружающего космического пространства. Получены патенты на изобретения указанных устройств.

3. Разработана структурно-функциональная схема КА с ядерной энергетической установкой с универсальным средством защиты от наведенной радиации, имеющим дополнительные устройства, в составе которых используется подсистема с разделительным экраном, отсекающим от СВА область интенсивной ионизации и активации атмосферы, а также подсистема с газовой продувкой забортного пространства.

4. Предложенные методы защиты могут быть использованы в перспективных разработках космических аппаратов с ЯЭУ для повышения их надежности и долговечности.

Список литературы

1. Атамасов В.Д., Бабук В.А., Ковалев А.П., Устинов А.Н. и др. Теоретические основы, особенности конструкций и испытаний ядерных энергетических установок космического базирования. Санкт-Петербург : ФГУП «КБ «Арсенал» имени М.В. Фрунзе», Балт. гос. техн. ун-т «Военмех» имени Д.Ф. Устинова, СПб. отделение Академии космонавтики РФ имени К.Э. Циолковского, 2016. 780 с.
2. Новиков Л.С. Высокоскоростные соударения в космосе. Москва : УНЦ ДО, 2003. 72 с. ISBN 5-88800-226-7 EDN: QNZQDL
3. Полетаев Б.И., Романов А.В., Соколов Ю.А., Устинов А.Н. и др. Ядерные орбитальные комплексы / под ред. В.Д. Атамасова. Санкт-Петербург : ФГУП «КБ «Арсенал» имени М.В. Фрунзе», Балт. гос. техн. ун-т «Военмех» имени Д.Ф. Устинова, Санкт-Петербург, отделение Академии космонавтики РФ имени К.Э. Циолковского, 2016. 945 с.
4. Курчатов И.В. Избранные труды : в трех томах. Т. 2 : Нейтронная физика / под общей ред. академика А.П. Александрова. Москва : Наука, 1982. 368 с.
5. Атамасов В.Д., Полетаев Б.И. Космонавтика XXI века и ядерные термоэмиссионные энергетические установки / под ред. А.П. Ковалева, В.Ф. Фатеева. Санкт-Петербург : «Агентство РДК — прнт», 2002. 384 с.
6. Физика космического пространства // Материалы теоретических и экспериментальных исследований, выполненных в научно-исследовательском институте ядерной физики имени Д.В. Скобельцына. URL: http://soviet.cosmos.ru/sites/default/files/cospar_r6.pdf (дата обращения: 15.06.2023).
7. 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). Москва : НИИЯФ МГУ, 2007. С. 15–19. URL: http://nuclphys.sinp.msu.ru/school/s07/s07_03.pdf (дата обращения: 15.06.2023).
8. Хаффнер Дж. Ядерное излучение в космосе. Москва : Атомиздат, 1971. 320 с.
9. Крымский Г.Ф., Петухов С.И., Стародубцев С.А. Исследования теории космической плазмы // Наука и техника в Якутии. 2022. № 1 (42). С. 8–14. <http://doi.org/10.24412/1728-516X-2022-1-8-14> EDN: JXFOVY
10. Рыжов Ю.А., Бургасов М.П., Кузовкин К.Н., Свищевский С.Б. О методах расчета параметров собственной внешней атмосферы летательных аппаратов // Аэротермогазодинамика в разреженных потоках. Москва : МАИ, 1988. С. 3–24.
11. Корсун А.Г., Твердохлебова Е.М., Габдуллин Ф.Ф. Динамика искусственных плазменных образований в космосе // Модель космоса. Т. II : Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов / под ред. проф. Л.С. Новикова. Москва : Книжный дом Университет, 2007. С. 918–945.
12. Брагинский С.И. Явления переноса в плазме // Вопросы теории плазмы : сб. науч. статей. Москва : Госатомиздат, 1963.
13. Надирадзе А.Б., Корсун А.Г., Куршаков М.Ю., Шапошников В.В., Габдуллин Ф.Ф., Твердохлебова Е.М. Формирование собственной внешней ионосферы космических аппаратов и эффекты ее воздействия // Труды МАИ. 2011. № 43. С. 19. EDN: NEBZGF
14. Атамасов В.Д., Дементьев И.И., Устинов А.Н. Ядерная энергетическая установка космического аппарата. Патент на изобретение RU 2677420 C1, 16.01.2019. Заявка № 2017146477 от 27.12.2017. EDN: ZKZPDU
15. Атамасов В.Д., Дементьев И.И., Устинов А.Н. Ядерная энергетическая установка космического аппарата. Патент на изобретение RU 2693434 C1, 02.07.2019. Заявка № 2018134891 от 02.10.2018. EDN: RWFLZU
16. Колбасин И.В. Основные источники и состав излучений, действующих на собственную внешнюю атмосферу космического аппарата с ядерной энергетической установкой // Вестник Московского авиационного института. 2020. Т. 27. № 2. С. 123–130. <http://doi.org/10.34759/vst-2020-2-123-130> EDN: JGQGJV
17. Мильковский А.Г., Атамасов В.Д., Колбасин И.В., Устинов А.Н., Калинина А.М. Новые явления в космическом эксперименте по созданию искусственного солнечного затмения при совместном полете космических кораблей «Аполлон» — «Союз» // Вестник Московского авиационного института. 2019. Т. 26. № 3. С. 144–151. EDN: YRLZKI
18. Наземные эксперименты и теоретические исследования // Физика космического пространства : материалы теоретических и экспериментальных исследований, выполненных в научно-исследовательском институте ядерной физики имени Д.В. Скобельцына. URL: http://soviet.cosmos.ru/sites/default/files/cospar_r6.pdf (дата обращения: 12.02.2025).
19. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы тепlopereдачи. Москва : Энергия. 1977. 343 с. URL: <https://djvu.online/file/IChEYFXILZRmp> (дата обращения: 12.02.2025).

References

1. Atamasov VD, Babuk VA, Kovalev AP, Ustinov AN, et al. *Theoretical foundations, features of designs and tests of space-based nuclear power plants*. St. Petersburg : FSUE KB Arsenal named after M.V. Frunze, Baltic State Technical University. D.F. Ustinov Voenmekh Univ., St. Petersburg Branch of the K.E. Tsiolkovsky Academy of Cosmonautics of the Russian Federation, 2016. (In Russ.)

2. Novikov LS. *High-speed collisions in space.* Moscow: UNC DO Publ.; 2003. (In Russ.) ISBN 5-88800-226-7 EDN: QNQZDL
3. Poletaev BI, Romanov AV, Sokolov Yu, Ustinov AN, Milkovsky AG, Atamasov VD, Babuka VA. et al. *Nuclear orbital complexes.* V.D. Atamasov (ed.). St. Petersburg : FSUE “KB Arsenal named after M.V. Frunze”, Baltic State Technical University. D.F. Ustinov Voenmekh Univ., St. Petersburg Branch of the K.E. Tsiolkovsky Academy of Cosmonautics of the Russian Federation; 2016. (In Russ.)
4. Kurchatov I.V. *Selected works in three volumes. Vol. 2. Neutron Physics.* Academician A.P. Alexandrova (ed.). Moscow: Nauka Publ.; 1982. (In Russ.)
5. Atamasov VD, Poletaev BI. *Cosmonautics of the XXI century and nuclear thermal emission power plants.* A.P. Kovalev, V.F. Fateev (eds.). St. Petersburg: RDK — print Agency Publ.; 2002. (In Russ.)
6. Physics of outer space. *Materials of theoretical and experimental research carried out at the D.V. Skobeltsyn Scientific Research Institute of Nuclear Physics.* URL: http://sovet.cosmos.ru/sites/default/files/cospas_r6.pdf (accessed: 06.15.2023).
7. Akishin AI. *The operability of space equipment under the influence of the spacecraft's own external atmosphere.* D.V. Skobeltsyn Scientific Research Institute of Nuclear Physics. 2007. P. 15–19. (In Russ.) Available from: http://nuclphys.sinp.msu.ru/school/s07/s07_03.pdf (accessed: 15.06.2023).
8. Haffner J. *Nuclear radiation in space.* Moscow: Atomizdat Publ.; 1971. (In Russ.)
9. Krymsky GF, Petukhov SI, Starodubtsev SA. Studies of the theory of cosmic plasma. *Science and technology in Yakutia.* 2022;1(42):8–14. (In Russ.) [http://doi.org/10.24412/1728-516X-2022-1-8-14](https://doi.org/10.24412/1728-516X-2022-1-8-14) EDN: JXFOVY
10. Ryzhov YuA, Burgasov MP, Kuzovkin KN, Svirshchevsky SB. On methods for calculating the parameters of the own external atmosphere of aircraft. In the collection *Aerothermogasdynamics in rarefied flows.* Moscow: MAI Publ.; 1988. p. 3–24. (In Russ.)
11. Korsun AG, Tverdokhlebova EM, Gabdullin FF. *Dynamics of artificial plasma formations in space. There is a space model in the sat. Vol. II. The impact of the space environment on spacecraft materials and equipment.* L.S. Novikova (ed.). Moscow: University Book House (KDU); 2007. p. 918–945. (In Russ.)
12. Braginsky SI. *Phenomena of transfer in plasma. Questions of plasma theory: collection of scientific articles.* Moscow: Gosatomizdat Publ.; 1963. (In Russ.)
13. Nadiradze AB, Korsun AG, Kurshakov MYu, Shaposhnikov VV, Gabdullin FF, Tverdokhlebova EM. Formation of the spacecraft's own external ionosphere and its effects. *Proceedings of MAI.* 2011;(43):19. (In Russ.) EDN: NEBZGF
14. Atamasov VD, Dementiev II, Ustinov AN. *Space craft nuclear power unit.* Patent 293434, Russian Federation, IPC B64G 1/42 (2006.01), B64G 1/54. EDN: ZKZPDU
15. Atamasov VD, Dementiev II, Ustinov AN. *Nuclear power plant of spacecraft.* Patent 2677420, Russian Federation, IPC B64G 1/42 (2006.01), B64G 1/54. EDN: RWFLZU
16. Kolbasin IV. Main sources and radiation composition affecting eigen external atmosphere of a spacecraft with nuclear power plant. *Aerospace MAI journal.* 2020;27(2):123–130. (In Russ.) [http://doi.org/10.34759/vst-2020-2-123-130](https://doi.org/10.34759/vst-2020-2-123-130) EDN: JGQGJV
17. Milkovsky AG, Atamasov VD, Kolbasin IV, Ustinov AN, Kalinina AM. New phenomena in the space experiment on the creation of an artificial solar eclipse during the joint flight of the Apollo — Soyuz spacecraft. *Aerospace MAI journal.* 2019;26(3):144–151. (In Russ.) EDN: YRLZKI
18. *Ground-based experiments and theoretical studies. Physics of outer space:* Materials of theoretical and experimental studies carried out at the D.V. Skobeltsyn Scientific Research Institute of Nuclear Physics. (In Russ.) Available from: http://sovet.cosmos.ru/sites/default/files/cospas_r6.pdf (accessed: 12.02.2025).
19. Mikheev MA, Mikheeva IM. *Fundamentals of heat transfer.* Moscow: Energiya Publ.; 1977. (In Russ.) Available from: <https://djvu.online/file/IChEYFXILZRmp> (accessed: 12.02.2025).

Сведения об авторах

Устинов Александр Николаевич, кандидат технических наук, генеральный директор ОАО «МЗ «Арсенал», Российская Федерация, 195009, Санкт-Петербург, ул. Комсомола, д. 1-3; eLIBRARY SPIN-код 8349-1200; e-mail: Ustinov@mzarsenal.com

Атамасов Владимир Дмитриевич, доктор технических наук, профессор кафедры А3 «Космические аппараты и двигатели», Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова, Российская Федерация, 190005, Санкт-Петербург, 1-я Красноармейская, д. 1; AuthorID: 523620; e-mail: vldmatamasov@mail.ru

About the authors

Aleksander N. Ustinov, Candidate of Technical Sciences, General Director of Arsenal Machine-Building Plant JSC, 1-3 Komsomol St, 195009, Saint Petersburg, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 8349-1200; e-mail: Ustinov@mzarsenal.com

Vladimir D. Atamasov, Doctor of Technical Sciences, Professor of the A3 Department “Spacecraft and Engines”, Baltic State Technical University “VOENMEKH” named after D.F. Ustinov, 1 1-st Krasnoarmeiskaya St, Saint-Petersburg, 190005, Russian Federation; AuthorID: 523620; e-mail: vldmatamasov@mail.ru