

УДК 621.039.57

*П. В. Андреев, В. С. Васильковский, В. В. Кашелкин,
Н. А. Соколов, Е. М. Страхов, М. Ю. Федоров*

Исследование разрушения космических ядерных энергетических установок в аварийных ситуациях и обоснование систем и средств обеспечения безопасности

*P. V. Andreev, V. S. Vasilkovsky, V. V. Kashelkin,
N. A. Sokolov, E. M. Strahov, M. J. Fedorov*

**Research of Space Nuclear Power Systems
Destructions in Accidents and Basis for Safety
Methods and Safety Provisions**

Выполнен обзор проблемы обеспечения безопасности и оценки возможных рисков, связанных с эксплуатацией космических ядерных энергетических установок. Рассмотрены международные и национальные нормы и правила, содержится анализ аварийных ситуаций, связанных с ударным воздействием на их конструкцию. Представлены сценарии аварийных ситуаций, приводящих к частичному или катастрофическому разрушению ядерного реактора вследствие отказов ракеты-носителя. Рассматриваются также сценарии аварийных ситуаций с ядерными энергетическими установками, связанные с воздействием на конструкцию частиц техногенной природы, так называемого космического мусора. Приведены методы и средства обеспечения безопасности как организационные, так и конструктивные. Обсуждаются созданные расчетные методики, позволяющие оценить конечное состояние ядерного топлива и систем безопасности при наступлении аварийной ситуации, направления дальнейших исследований.

Ключевые слова: безопасность, космические, ядерные, энергетические, установки, удар, разрушение, аварии, радиационные последствия.

DOI 10.14258/izvasu(2014)1.1-30

Ядерная энергия в космосе. Современный взгляд на обеспечение энергией космических аппаратов, предназначенных для решения задач освоения ближнего космоса, исследования дальних планет Солнечной системы, энергоснабжения надпланетных автоматических и обитаемых станций, предполагает использование ядерных источников энергии, в том числе и реакторных ядерных энергетических установок. Использование космических ядерных энергетических установок имеет ряд неоспоримых технических преимуществ по сравнению с другими типами источников энергии космических аппаратов [1].

The work presents a review of safety issues and assessment of potential risks associated with space nuclear power system (SNPS) operation. International and national rules and standards are considered, and accidents caused by shock impacts on SNPS are analysed. The paper demonstrates various scenarios of partial or catastrophic reactor destruction accidents caused by space launch vehicle (SLV) faults. Additionally, scenarios of space debris (SD) impact on SNPS construction are provided. The work refers to safety methods and safety provisions both managerial and constructional ones. Calculation methods for nuclear fuel final state and safety system status assessments upon accident occurrence are also developed and discussed. Prospects and potentials of future research are outlined.

Key words: safety, space, nuclear, power, systems, collisions, destruction, emergency, radiation effects.

К таким преимуществам относятся возможность обеспечения больших, вплоть до десятков мегаватт, мощностей в агрегатах сравнительно небольших габаритов, независимость, в отличие от энергоустановок на солнечных батареях, от положения на орбите и расстояния от Солнца.

Однако применение ядерных источников энергии, включая реакторные ядерные энергоустановки в качестве бортовых источников электропитания космических аппаратов, требует обеспечения ядерной и радиационной безопасности для населения и окружающей среды за счет технических средств и конструкции ядерных энергетических установок [2, с. 267].

Требуется также оценивать состояние ядерного реактора и его радиоактивных материалов после аварий, связанных с ударным воздействием на конструкцию.

Безопасность космических ядерных источников энергии. Национальные и международные нормы и правила. Безопасность применения космических ядерных источников энергии определяется международными соглашениями, национальными законами, нормами и правилами.

Международные договоры, соглашения и конвенции и федеральные законы РФ устанавливают правовые аспекты использования ядерных источников энергии в космическом пространстве.

Принципы, касающиеся использования ядерных источников энергии в космическом пространстве, одобрены ООН в декабре 1992 г. В них оговариваются критерии безопасного использования ядерных источников энергии, публикации по оценке безопасности до запуска космических аппаратов с ядерными источниками энергии, уведомление о возвращении ядерных источников энергии, консультации, помощь государствам.

Федеральный закон об использовании атомной энергии (ст. 43) имеет прямое отношение к космическим ядерным источникам энергии и не ограничивает их использование при обеспечении безопасности.

Аварийные ситуации с ядерными энергетическими установками. Наиболее опасные аварийные ситуации с космическими ядерными энергетическими установками сводятся, главным образом, к ударным воздействиям на конструкцию ядерного реактора [3, с. 49] с последующим частичным или катастрофическим разрушением конструкции.

Взрыв ракеты-носителя на старте приводит к «обстрелу» обломками ракеты «холодного» не наработавшего радиоактивности реактора.

Следствием отказа двигателей первой ступени ракеты-носителя становится падение «холодного» реактора в составе ядерных энергетических установок на поверхность Земли.

Отказы двигателей верхних ступеней и разгонных блоков приводят к падению на поверхность Земли частично обгоревшего реактора без наработанной активности. Но в обоих случаях имеет место ударное сжатие ядерного топлива активной зоны, что исключительно теоретически, при реализации особых условий, может способствовать возникновению цепной реакции деления.

Следующие сценарии аварийных ситуаций связаны с проблемой космического мусора [3, с. 49; 4, с. 382], ставшей весьма актуальной с конца 80-х гг. прошлого века.

Столкновения с космическим мусором могут вызывать локальные повреждения реактора, пробой контура теплоносителя, катастрофическое разрушение конструкции, досрочный спуск и падение на Землю реактора с радиационно-безопасной орбиты, повреж-

дения системы управления космических аппаратов или ядерных энергетических установок и связанные с этим последствия для ядерной и радиационной безопасности.

Локальные и катастрофические разрушения реактора могут привести к появлению радиоактивных частиц в околоземном пространстве или выпадению таких частиц на поверхность Земли.

Пробой основного контура теплоносителя однозначно выводит из строя ядерные энергетические установки, а в случае ядерных энергетических установок мегаваттного класса с газовым теплоносителем пробой может вызвать появление постороннего вектора тяги, что в свою очередь может привести к неуправляемому полету космических аппаратов с ядерными энергетическими установками.

Методы и средства обеспечения безопасности космических ядерных энергетических установок. Для снижения риска возврата на Землю радиоактивных материалов включение реакторных ядерных энергетических установок должно осуществляться только после достижения рабочей, радиационно-безопасной орбиты.

В случае эксплуатации космических аппаратов с ядерными энергетическими установками на сравнительно низких орбитах и возникновения аварийной ситуации с возможным риском входа в плотные слои атмосферы можно использовать следующие методы:

- увод на высокую орбиту со временем существования, достаточным для высвечивания накопленной активности;
- сохранение целостности элементов ядерных источников энергии, содержащих радиоактивность, для изотопных источников — это ампула с изотопом, а для реакторных ядерных энергетических установок — активная зона или реактор.

Например, для 29 выведенных из эксплуатации ядерных энергетических установок «Бук», которые находятся на орбитах 900–1000 км, и одной ядерной энергетической установки космического аппарата «Космос 1900» (на орбите 700–750 км) применялась двигательная установка увода, которая либо в конце ресурса, либо при возникновении аварийной ситуации обеспечивала увод ядерных источников энергии на орбиту высотой 800–1000 км.

Орбита высотой 800 км считается радиационно-безопасной и обеспечивает время существования ядерной энергетической установки порядка 300 лет, что достаточно для распада радиоактивных материалов активной зоны. Увод производился после гашения реактора с помощью органов регулирования. В качестве дублирующей системы радиационной безопасности применялась система аэродинамического диспергирования сборки твэлов. Отделение сборки производилось и на орбите захоронения, что в 2 раза увеличивает время существования конструкции, со-

держщей радиоактивность. При этом за счет сравнительно малого размера сборки снижается вероятность ее поражения космическим мусором.

В ядерных энергетических установках второго поколения большой мощности ядерная безопасность на всех этапах жизненного цикла и при наступлении аварийной ситуации обеспечивается за счет эксплуатации на радиационно-безопасных орбитах и применения системы стержней безопасности. Конструкция стержней безопасности обеспечивает подкритичность реактора при любых сценариях аварийных ситуаций.

Моделирование ударного разрушения космических ядерных энергетических установок и прогнозирование радиационных последствий. В методах и средствах обеспечения безопасности ядерных энергетических установок значительное место занимают методики прогнозирования последствий аварийных ситуаций, связанных с ударными воздействиями на конструкцию реактора.

Теоретические исследования и моделирование удара по конструкции ядерной энергетической установки проводятся ОАО «Красная Звезда» при методическом обеспечении Институтом теоретической и прикладной механики Сибирского отделения РАН (ИТПМ СО РАН). Цель этих исследований — создание программных средств расчета процесса частичного и катастрофического разрушения конструкции ядерной энергетической установки и реактора [5, с. 222].

Созданные методики расчета позволили оценить конечное состояние материалов реактора, ядерного топлива и систем безопасности при наступлении рассмотренных в данной работе аварийных ситуаций.

В результате численных экспериментов, проведенных в ИТПМ СО РАН на геометрических моделях, разработанных в ОАО «Красная Звезда», получено, что в результате аварий, связанных с падением на поверхность Земли обгоревших при спуске в атмосфере реакторов ядерных энергетических установок и первого, и второго поколений, реализуется подкритичное состояние активной зоны. Подкритичное состояние обеспечивается за счет разрушения отражателя нейтронов и за счет остающихся в разрушенной массе топлива поглощающих материалов стержней безопасности.

Результаты расчетов катастрофических последствий высокоскоростного удара космического мусора по находящимся на радиационно-безопасных орбитах ядерных энергетических установок «Бук» и «Тополь» показали, что количество и размеры радиоактивных осколков, выпадение которых на поверхность Земли принципиально возможно, не вызывает серьезных последствий для природы и населения, при крайне малой вероятности такого события.

Направления дальнейших исследований и разработок. К настоящему времени созданы методики расчета ударного воздействия на конструкцию ядерных энергетических установок в одномерной и двумерной постановке, что позволяет рассчитывать последствия ударов по нормали к объекту. Другие варианты взаимодействия — удар под углом, локальные повреждения с отрывом или разрушением части конструкции, требуют создания трехмерных методик расчета и соответствующих им моделей конструкции. Эта работа ОАО «Красная Звезда» и ИТПМ СО РАН начата в 2010 г. и проводится в настоящее время.

Библиографический список

1. Васильковский В. С., Андреев П. В., Зарицкий Г. А., Пономарев-Степной Н. Н. и др. Проблемы космической энергетики и роль ядерных энергетических установок в их решении // *Ядерная энергетика в космосе* — 2005: сб. докл. Междунар. конф. — Подольск, 2005.
2. Грязнов Г. М., Жаботинский Е. Е., Николаев В. С., Сербин В. И. Концепция ядерной и радиационной безопасности космических термоэмиссионных ядерных энергетических установок // *Атомная энергия*. — 1990. — Т. 69, вып. 5.
3. Федоров М. Ю., Краус Е. И., Фомин В. М., Шабалин И. И. Моделирование ударных воздействий на кон-

- струкцию в проблеме обеспечения безопасности космических ядерных энергетических установок // *Вестник Московского авиационного института*. — 2009. — Т. 16, № 3.
4. Назаренко А. И. Проблема «космического мусора» в околоземной среде. Раздел 8. Экологические проблемы и риски воздействий ракетно-космической техники на окружающую среду: справ. пособие / под ред. В. В. Адушкина, С. И. Козлова, А. В. Петрова. — М., 2000.
5. Механика — от дискретного к сплошному / [А. Н. Андреев и др.]; отв. ред. В. М. Фомин; Рос. академия наук, Сиб. отд-е; Ин-т теоретической и прикладной механики им. Христиановича. — Новосибирск, 2008.