

ПРИМЕНЕНИЕ В МИРНЫХ ЦЕЛЯХ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ В КОСМОСЕ

Роберт Розен, А. Дан Шнайер

Статья посвящена применению космических ядерных энергетических установок в задачах мирного исследования космоса. Определяется широкий круг задач, включая как пилотируемое так и беспилотное исследование солнечной системы, наряду с прикладными задачами, осуществляемыми на околоземной орбите. Такие задачи потребуют использования разнообразных космических энергетических систем большой мощности, что может быть обеспечено наилучшим образом с помощью ядерной технологии. Большая продолжительность экспедиций, большие запасы энергии, необходимые для выполнения определенных задач и, в некоторых случаях, дефицит солнечной энергии, превратили использование источников ядерной энергии в жизненно важный фактор для проведения этих экспедиций.

ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ В КОСМОСЕ В МИРНЫХ ЦЕЛЯХ

Начиная с 1960 года NASA использует источники ядерной энергии в виде радиоизотопных тепловых генераторов (РТГ) для проведения большого числа научно-исследовательских экспедиций. РТГ - проверенные, высоконадежные энергетические источники, которые необходимы NASA при проведении долговременных экспедиций в дальний космос. РТГ успешно использовались на станциях Викинг при исследовании Марса, на станциях Аполло, при исследовании поверхности Луны и продолжают обеспечивать энергией аппараты Вояджер и Пионер, которые вот уже в течение 10 и 16 лет, соответственно, движутся в направлении границы солнечной системы.

Изучение вопроса космической деятельности определило в настоящее время будущие гражданские космические проекты, для которых РТГ и другие современные источники энергии будут не пригодны, и которые потребуют применения высокоэнергетических систем, использующих ядерные реакторы. Изучение вопроса, связанного с космическими проектами, характеризовалось широтой взглядов на освоение Соединенными Штатами космического пространства в 21 веке и обеспечило основу Национальной Космической Политики, учредившей широкомасштабные гражданские цели в космосе для Соединенных Штатов.

В этой статье рассматриваются возмож-

ные космические проекты в рамках NASA, которые реализуются или существенно расширяются за счет использования источников ядерной энергии. Сведения о таких источниках, необходимые для прогнозирования, основываются как на ранних исследованиях^{1,2,3,4}, так и на последних работах, выполненных исследовательским центром NASA.⁵

На рис. 1 схематично представлен научный и прикладной интерес NASA; делается попытка классифицировать широкую область применения ядерной энергетики в мирном космосе с помощью разбиения всей деятельности на экспедиции и отдельные функциональные операции.

Применение ядерной энергетики для исследования внешней области солнечной системы может быть представлено в виде автоматических зондов для исследования дальних планет за орбитой Марса. Это - Сатурн, Уран, Нептун и Плутон, а также кометы и астероиды.

Часть рисунка, на которой показана внутренняя область солнечной системы, фокусируется, в основном, на пилотируемом и беспилотном исследовании Марса и его спутников. Это может включать в себя автоматические разведывательные зонды, посадочные блоки, передвижные устройства на поверхности, а также пилотируемые экспедиции, посты и базы на поверхности планеты. Сюда можно включить также грузовые транспортные средства на электрической тяге.

Операции на Луне с использованием

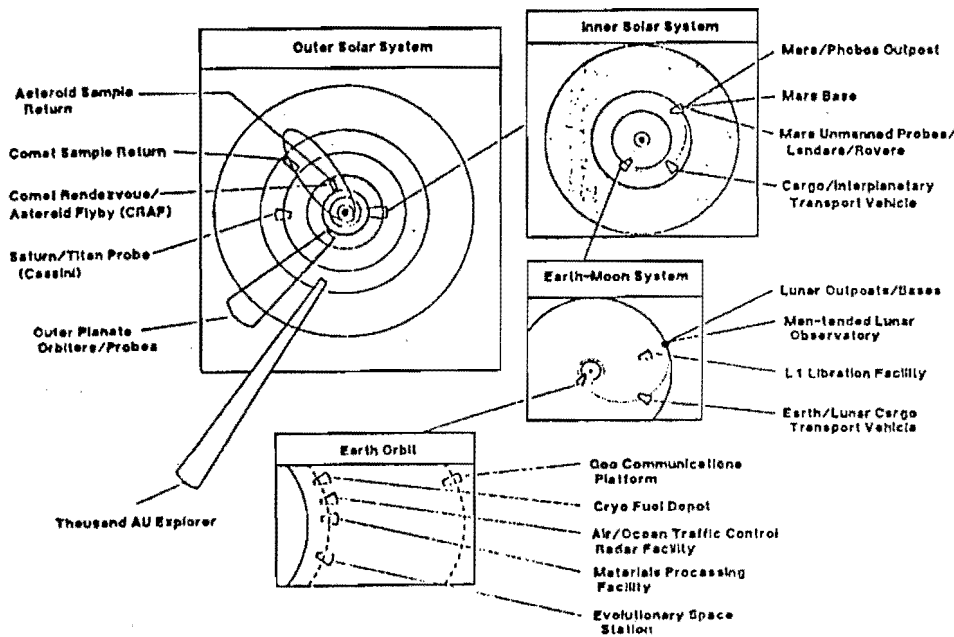


Рисунок 1

Проекты НАСА, предполагающие использование ядерной энергии в мирных целях

ядерной энергии включают в себя посадочные станции, передвижные механизмы, постоянные обитаемые посты и базы на поверхности, обсерватории и, возможно, грузовые транспортные средства, использующие современные двигательные установки. Возможные примеры такой деятельности показаны на рисунке.

Мы детально рассматриваем три основные категории: пилотируемое исследование солнечной системы, межпланетные ядерно-электрические двигатели с акцентом на беспилотные исследовательские экспедиции и деятельность в околоземном пространстве.

ПИЛОТИРУЕМЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Управление исследований в NASA (ОЕХР) было организовано в июне 1987 года для изучения и сравнения альтернативных сценариев пилотируемого исследования солнечной системы с первоначальным акцентом на исследование Луны и Марса.

В 1988 году ОЕХР проанализировало пакет предложений, состоящий из четырех направлений исследований:

- пилотируемая экспедиция к Фобосу

- пилотируемая экспедиция к Марсу
- обсерватория на Луне
- посты на Луне и Марсе.

Важным элементом этих предложений было определение характеристик и требований, предъявляемых к энергетической системе, а также определение альтернативных вариантов систем, удовлетворяющих этим требованиям.

Были определены те проекты, для которых применение высокоэнергетических систем является существенным фактором их осуществимости. Сюда относятся различные операции производимые человеком на поверхности планет, межпланетные электрические двигатели для перевозки грузов, хранение и транспортировка криогенного топлива и операции на космических станциях по монтажу, проверке, испытанию и функционированию систем.

ОПЕРАЦИИ НА ПОВЕРХНОСТИ ПЛАНЕТ

Надежные, долгоживущие источники электроэнергии (аналогичные наземным станциям), устанавливаемые на поверхности Луны, Фобоса или Марса будут необходи-

мым элементом в исследованиях, проводимых человеком, а также при использовании природных ресурсов этих объектов. Энергия будет также необходима для операций, проводимых на передвижных механизмах с использованием человека или автомата.

Были определены четыре разновидности обитаемых баз на планете; энергетические требования, предъявляемые к каждой из разновидностей, представлены в табл.1. В табл.2 для каждой разновидности баз определены задачи экспедиции и разнообразная деятельность, представляющая интерес.

Для поддержания деятельности обитаемых постов и баз, предназначенных для проведения продолжительных космических исследований и разработок, а также производства необходимых ресурсов, требуемая величина электрической мощности оценивается в пределах от сотен киловатт до нескольких мегаватт.

Основные минералы на поверхности Луны содержат кислород, кремний, железо, магний, титан и алюминий. Лунный реголит (лежащий на поверхности горных образований) содержит так же большое количество стекла, образовавшегося в результате бомбардировки микрометеоритами.

Прежде чем использовать природные ресурсы, сырье должно быть собрано и переработано. Обработка может включать в себя снижение концентрации водорода и углерода, выщелачивание гидрофторированием, электролиз магмы - все эти процессы требуют затрат тепла. Количество тепловой энергии, необходимое для обработки минералов, зависит в большой степени от специфики их нагрева и от точки плавления. Изучение отдельных примеров говорит о необходимости высокоинтенсивного использования энергии. Имеющаяся в распоряжении мощность (тепловая или электрическая) очевидно ограничивает расширение такого рода деятельность.

Для проведения непрерывных, продолжительных операций на поверхности планеты, особенно во время длительного ночного периода, энергетические системы большой емкости, основанные на использовании ядерных реакторов, могут играть решающую роль.

Будучи независимыми от продолжительности циклов день/ночь или их вариации, реакторные энергетические системы не имеют тех больших масс, что обычно ассоциируются с огромными системами аккумуляции энергии. Для высокоэнергетических систем на рис.2 показано преимущество в массе реакторных систем по сравнению с современными солнечными системами (включая электрохимические системы аккумуля-

рования энергии), при этом рассматриваются два типа защиты реакторов: защита в диапазоне телесных углов - 4π (реактор полностью окружен защитой), что требует транспортировки ее с Земли на Луну; реакторы, для которых используется лунный грунт в качестве естественной защиты, что исключает требования по ее транспортировке.

Исследуемые для сравнения энергетические системы на основе ядерных реакторов состоят из реакторов типа SP-100, соединенных с системой Стирлинга трансформации энергии.

При оценке массы современных генераторов солнечной энергии и систем аккумуляции энергии брались в расчет современные фотоэлектрические антенные решетки с солнечными элементами из арсенида галлия с эффективностью в 20% (с массовой энергией в 300 ватт/кг) совместно с высокоэффективной системой накопления энергии на основе водородо-кислородной регенерационной камеры (RFC), с эффективностью в 70% и со специфической энергией 500 ватт-час/кг.

Системы на основе реакторов имеют существенно большее преимущество в массе по сравнению с самыми современными солнечно-энергетическими системами. Это происходит, в основном, из-за огромной массы системы аккумуляции энергии, которая необходима для солнечных источников энергии.

На рис. 3 представлено сравнение масс энергетических систем, предназначенных для функционирования постов и баз на поверхности Марса. В этом случае проигрыш в массе солнечных систем меньше, чем в случае их расположения на Луне потому, что марсианская ночь длится только около 12 часов. Но, тем не менее, разность в массах остается значительной при условии обеспечения каких-либо крупномасштабных операций.

Разница в массах приобретает наиболее драматический характер, если оценить сопутствующую массу, доставляемую на орбиту. Для каждого килограмма полезного веса, доставляемого на поверхность Луны, требуется примерно 5 килограммов вспомогательной массы, доставляемой на низкую околоземную орбиту (НОО). Основная часть этой массы - ракетное топливо, необходимое для транспортировки полезной нагрузки с орбиты на поверхность Луны. Аналогичное соотношение в случае доставки груза на Марс составляет величину 6.5.

Эта ситуация продемонстрирована графически на рис. 4, где сравнивается экономия веса при доставке груза с орбиты на Марс и Луну в случае использования ядер-

Таблица 1

Энергетические требования, предъявляемые к базам на поверхности планет

	Мощность kW	Время жизни	Источник
Обитаемая обсерватория на Луне	<100	Несколько лет	Солнце/реактор
Разведывательные пилотируемые экспедиции	<100	60 дней	Солнце
Обитаемые посты на планете	100-600	Несколько лет	реактор
Обитаемые базы с переработкой природных ресурсов	2-20 MW	Несколько лет	реактор

Таблица 2

Операции на поверхности планеты

Обитаемая обсерватория на Луне	Разведывательные экспедиции	Обитаемые посты	Базы с производственной деятельностью
Область низких частот	Жилое помещение на 2-4 человека	Жилье на 15 человек	Жилье на 24 человека
Оптический диапазон частот	Лаборатория	Дополнительные лаборатории	Исследовательские объекты
Телескопы слежения за звездами	Научные эксперименты	Расширение научных исследований	Системы обеспечения исследований исследовательской работы
Радиоинтерферометр с базой Земля-Луна	Поиск мест для производства жидкого кислорода	Воспроизводство ресурсов	Увеличение производства жидкого кислорода
Солнечная обсерватория	Подготовка площадок	Исследование систем жизнеобеспечения	Производство металлов.
Радиотелеметрия для программы СЕТИ	Передвижные устройства/буксировка	Топография	Производство керамики
Местные геологические экспедиции	Посадочные блоки/ракеты		Производство продуктов питания
Геофизические станции			Экспорт продукции

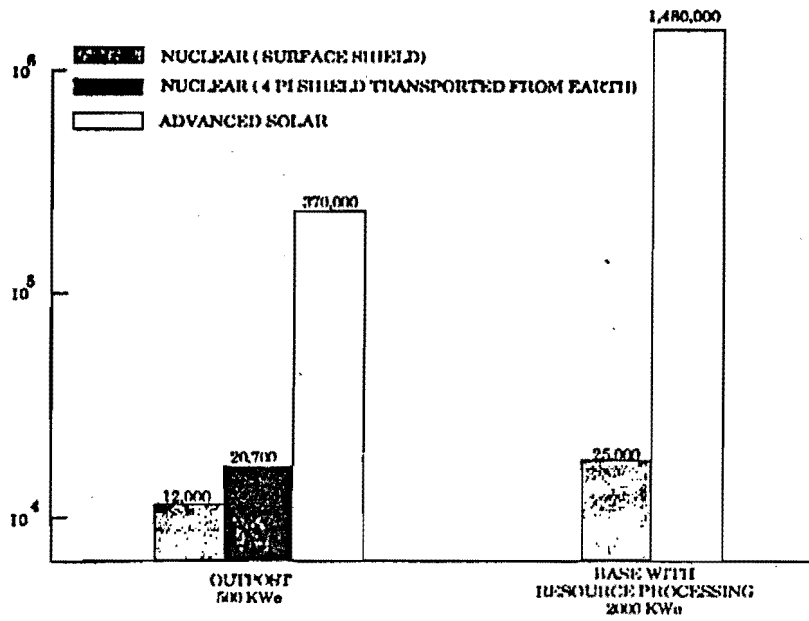


Рисунок 2

Сравнение энергетических установок на поверхности Луны по массе.

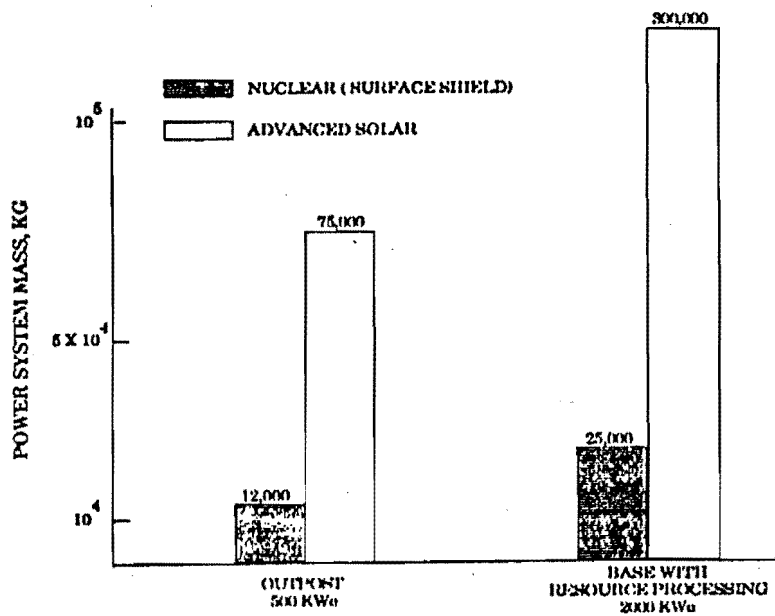


Рисунок 3

Сравнение энергетических установок на поверхности Марса по массе.

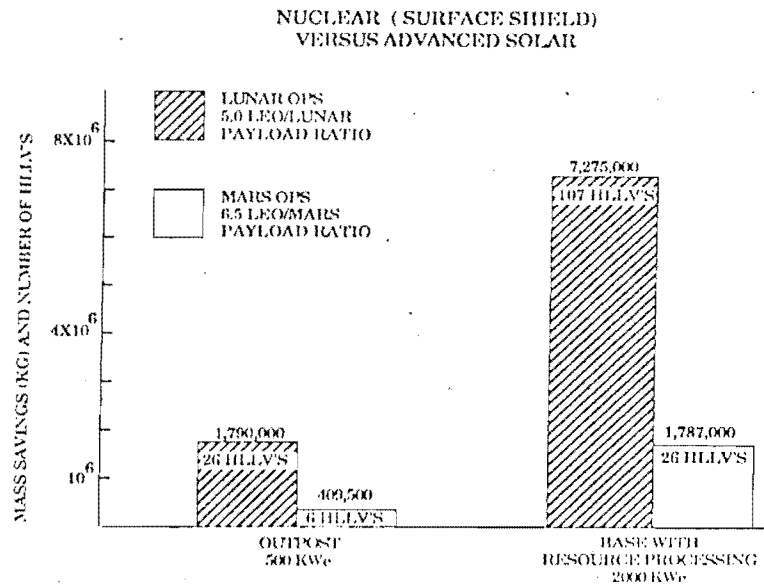


Рисунок 4

Выигрыш по массе на околоземной орбите для операций по лунным и марсианским проектам

ной и солнечной энергетической установки. Эта экономия веса может быть переведена в экономию стоимости, выраженную в количестве запусков большегрузных ракет, предполагая, что каждая ракета может нести 68 тонн полезной нагрузки.

На переднем плане - изображение энергетической системы, способной производить 825 кВт электроэнергии в течение семи лет. 2.5-мегаваттный тепловой реактор типа SP-100 соединен с восемью преобразователями энергии типа Стирлинга. При этом два преобразователя остаются в резерве, а остальные работают на 91.7 процентов своей номинальной мощности. Реактор, как показано на рисунке, расположен в центре, в цилиндрическом котловане, что обеспечивает некоторую защиту от гамма и нейтронной радиации. Восемь вертикальных панелей радиатора расположены по радиусу от преобразователя энергии, а между панелями расположена теплоизоляционная защита, способствующая уменьшению локальной температуры на поверхности Луны до 222°K во время работы энергетической установки. Проектируемая

температура поверхности радиатора 525°K , а предполагаемая эффективность производства электрической энергии при такой концепции энергетической установки составляет 33%.

ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ОПЕРАЦИИ НА НИЗКИХ ОКОЛОЗЕМНЫХ ОРБИТАХ (НОО)

Сценарии исследования космоса с помощью человека, изучавшиеся в Исследовательском Центре NASA, обязательно включают в себя доставку на орбиту и хранение большого количества криогенного топлива. Такие сценарии предполагают размещение складов топлива на орбите, которые будут служить как заправочные станции транспортных средств, летящих на Луну или на Марс.

Возможные методы транспортировки жидкого водорода и кислорода с Земли на орбитальные хранилища криогенного топлива включают в себя либо непосредственную его доставку с помощью тяжелых транспортных ракет, либо транспортировку воды,

электролиз ее на орбите и последующее сжижение водорода и кислорода. Т.к. с водой проще обращаться и ее проще хранить, то последний способ может быть реализован в емкостях упрощенной конструкции, с помощью обыкновенных транспортных средств и упрощенных погрузо-разгрузочных работ, но все это может быть реализовано за счет высоких энергетических требований, предъявляемых к орбитальным хранилищам топлива. На основе предварительных исследований, требуемый энергетический потенциал должен быть порядка сотен кВт.

Три из четырех сценариев исследований, изученных NASA, требуют использования настолько тяжелых ракет, что, по-видимому, организация сборочных работ в космосе является единственным техническим подходом к решению задач. Это увеличивает необходимость организации транспортного узла на низкой околоземной орбите, который может служить как станция сборки, проверки, испытания и размещения ракет. Эти функции могут быть реализованы как на космических станциях, так и на отдельных объектах, размещенных на околоземных орбитах. Если при этом требования по энергетике достигают величины мегаватта, компактные источники энергии на основе ядерных реакторов могут стать удачными кандидатами для достижения этих целей.

ЯДЕРНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДВИГАТЕЛИ ДЛЯ МЕЖПЛАНЕТНЫХ ПЕРЕЛЕТОВ

Две другие области приложения, где энергетические системы на основе ядерных реакторов могут играть существенную роль, связаны с межпланетными электрическими силовыми установками. Во-первых, применение транспортных ракет с ядерно-электрическими двигателями для крупномасштабных технических операций по обеспечению исследований Луны и Марса с использованием человека потребуют скоростей порядка 30-100 км/с. Эта скорость более чем в 10 раз выше той, которую может обеспечить современная двигательная установка на химическом топливе.

Использование транспортных ракет с электрическим двигателем для межпланетных перевозок оборудования и материалов является интегральной частью исследований с использованием баз на Луне и Марсе. Использование таких ракет, как оказалось, является необходимым потому, что современные двигатели на химическом топливе требуют доставку на околоземную орбиту неприемлемо большого количества топлива. Требования по электрической мощности - в области нескольких МВт и требования не-

больших масс может быть реализовано в космосе только с помощью энергетической установки на основе ядерного реактора с высокими эксплуатационными характеристиками. Компактность, большая емкость и высокие энергетические возможности ядерных систем могут обеспечить автоматические исследования дальнего космоса, представляющие большой научный интерес. Основное преимущество ядерных источников энергии заключается в их независимости от имеющейся в распоряжении солнечной энергии.

Рис. 5 показывает падение величины излучаемой солнечной энергии с увеличением расстояния от Солнца. Имея в виду высокие эксплуатационные характеристики реакторных систем, время пролета космического аппарата до внешних планет может быть существенно уменьшено с применением ядерно-электрических двигателей, что требует меньшей массы аппарата, чем альтернативные двигательные установки, из расчета на одну и ту же заданную мощность и полезную нагрузку.

Приблизительное минимальное время полета до Сатурна, Урана и Нептуна для различных типов двигательных установок показано в табл. 3. Расчеты основываются на предположении о фиксированной величине полезной нагрузки и показывают значительную экономию времени в случае использования ядерно-электрической установки.

Более короткое время полета может также обеспечить значительную экономию в стоимости в случаях выполнения функций слежения и связи. Увеличивая величину мощности, имеющуюся в распоряжении ядерно-электрической установки, можно еще уменьшить время полета, как показано в табл. 4, в случае полета к Нептуну.

Другие преимущества, которые можно получить от имеющейся большой мощности, показаны на рис. 6.

Большие энергетические возможности космического аппарата могут расширить возможности средств связи. Если мощность передачи сигнала увеличивается, то количество и размеры принимающих антенн может быть уменьшено. Далее, в результате прогресса в технике скорость передачи информации с космического аппарата постоянно увеличивается, и до тех пор, пока увеличение мощности при передаче увеличивает отношение сигнала к шуму, можно достигнуть более высоких скоростей передачи информации.

Другое преимущество от располагаемой аппаратом возрастающей мощности состоит в расширении научной отдачи от экспедиции. Будущие экспедиции, использующие

большие энергетические возможности аппарата, могут увеличить научную отдачу, осуществляя, например, построение изображения с помощью радара, способного разрешить мелкие детали поверхности, находясь на орбите планеты. Эти и другие примеры приведены в табл. 5.

Далее, дополнительная гибкость, обеспечиваемая с помощью ядерно-электрических двигателей, может создать дополнительные преимущества, уменьшая зависимость от "окон" запуска. Современные, ограниченные по характеристикам, химические двигательные системы часто требуют совершения гравитационного маневра около Земли или планеты для того, чтобы достичь других планет. И во многих случаях такие маневры возможны при осуществлении запуска только в определенные промежутки времени. При сравнимом времени, затрачиваемом на перелет, ядерно-электрическая двигательная установка может обеспечить более прямую траекторию, что в результате дает возможность осуществлять более частые запуски ракет с Земли.

NASA определила ряд проектов по исследованию космоса с помощью автоматических станций, в которых ядерные энергетические установки могут быть либо усиливающим, либо существенным элементом для успешного выполнения экспедиции.

Пример таких экспедиций и эффект от имеющихся в распоряжении энергетических возможностей показан в табл. 6. Требования по мощности выражены в терминах трех сценариев. Первый сценарий отражает основные современные энергетические требования, предъявляемые к предполагаемым экспедициям. В этом случае уровни располагаемой мощности, обычно, довольно низкие и соответствуют возможностям реально действующих энергетических систем. Второй сценарий соответствует более высоким энергетическим возможностям и здесь отмечены те экспедиции, в которых научная отдача может быть существенно расширена за счет применения энергетических систем на основе ядерных реакторов. В третьем сценарии отражены те экспедиции, которые могут быть реализованы только при использовании ядерно-энергетических двигательных установок. Исследовательский аппарат под названием Тысячи Астрономических Единиц (TAU) является попыткой осуществления экспедиции огромного научного значения, которая может быть предпринята только с использованием долгоживущей ядерно-электрической установки.

Большие преимущества применения электрических двигателей могут быть реализованы при их использовании непосредственно

на низкой околоземной орбите для вывода аппарата на межпланетную траекторию. В терминах первоначально выводимой массы с низкой орбиты выигрыш при использовании ядерно-электрических двигателей примерно в два раза больше, чем при использовании химических двигательных установок. Благодаря большой величине импульса силы ядерно-электрический двигатель может вывести на межпланетную траекторию примерно 88% первоначальной массы ракеты, в то время, как двигатели на высоко эффективном химическом топливе, с максимально развиваемой скоростью 4.700 м/с, могут вывести на межпланетную траекторию только 44% первоначальной массы ракеты.

ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДЛЯ ЗЕМНЫХ ЦЕЛЕЙ

Ориентированные на нужды Земли и представляющие интерес в 21 веке задачи, где могут быть использованы энергетические системы на основе ядерных реакторов, включают в себя: слежение и контроль за передвижением транспорта по воздуху и по воде; производство материалов в условиях микрогравитации, а также связь.

Слежение за воздушным и морским транспортом. Федеральное Авиационное Управление США (FAA) в настоящее время не имеет возможности следить за самолетами, не поддерживающими связь, которые удалились от береговой линии на расстояние более 180 миль. Космические радарные системы, большинство которых функционирует на орбитах, высотой 1000-3000 км в радиационных поясах Ван Аллена, могут в будущем дать большие преимущества при решении задач контроля за перемещением воздушного и водного транспорта. Предварительный анализ космических радарных систем для контроля полетов самолетов выявил требования к электрической мощности систем в пределах от 50 до 200 кВт, что зависит от таких специфических факторов, как условие полета, разрешение, высота орбиты, количество целей, область покрытия, размеры антенн. На таких средних высотах фотоэлектрические системы сталкиваются с проблемой поддержания приемлемой эффективности из-за разрушающего воздействия радиации. Работа на низких (200-400 км) орбитах практически не приемлема из-за того, что потребуется большое количество радаров для постоянного покрытия зон слежения.

Микрогравитация. Условия микрогравитации в космосе, видимо, являются весьма благоприятными для производства высококачественных материалов (кристаллов) для электроники; металлов, стекла и керамики;

Таблица 3

Время полета (годы) до внешних планет с использованием различных двигательных установок

	Ядерно-электрический двигатель	Солнечно-электрический двигатель	Химический двигатель
Сатурн	5	6	7
Уран	8	11	12
Нептун	11	16	17

Предположения: электрическая мощность - 100 кВт, нагрузка - 1500 кг, одиночный запуск космического корабля "Спейс Шаттл", при применении солнечных или химических источников энергии используется гравитационный маневр.

Таблица 4

Зависимость времени полета до Нептуна от располагаемой мощности

Уровень мощности, кВт	кВт	100	200	300	400	500
Время полета, лет	годы	11.0	9.3	8.5	8.0	7.8

Предполагаемая скорость истечения равна 50 км/с.

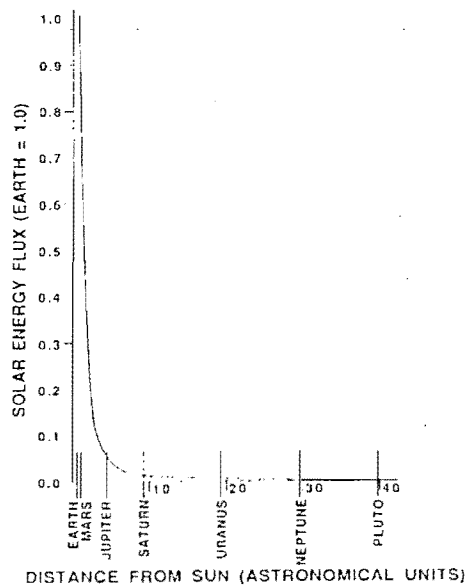


Рисунок 5

Поток солнечной энергии в зависимости от расстояния до Солнца.

Таблица 5

Возрастание научных возможностей с увеличением мощности

		Мощность, кВт
Радар		
Альциметр/дальномер	Слежение с расстояния 10.000 км	0,1 - 1,0
Эхолокация	Картирование подповерхностных слоев	0,5 - 5,0
Картирование планет	Дистанционное картирование	1 - 200
Апертурный синтез	Увеличение разрешения и получение детального изображения	0,5 - 1,0
Лазер		
Бомбардировка	Дистанционная спектроскопия поверх- ности, просвечивание породы и облаков	0,1 - 1,0
Радиоволны		
Радиозатмение	Увеличение глубины проникновения радиосигнала в атмосфере: Юпитер 0 - 40 км Сатурн 10 - 60 км Уран 30 - 40 км	≥ 20
Передача информации	Увеличение скорости передачи научной информации 1000 кбит/с - Юпитер 1000 кбит/с - Нептун	2 80
Низкие температуры	Дополнительное охлаждение больших сенсоров и передатчиков	1 - 10 Вт охлаждения

биологических материалов (кристаллы протеина); а также эти условия весьма благоприятны для разработки перспективной техники для химического производства.

Связь. Космические платформы играют весьма существенную роль в развитии высокоскоростной системы связи, включающей в себя: прямое телевидение, телеконференции, электронную почту и оперативную связь.

ГАРАНТИИ БЕЗОПАСНОСТИ

Хотя вопрос о гарантиях безопасной работы реакторов выходит за рамки данной статьи, важно отметить, что безопасность является существенной, неотъемлемой частью программ развития ядерной технологии. Любой запуск и функционирование в космосе источников ядерной энергии должно полностью соответствовать всем представленным рекомендациям по безопасности, критериям, инструкциям и стандартам, обеспечивающим безопасность работы. Это пол-

ностью соответствует прошлой и настоящей практике внимательного отношения к разработкам и функционированию ядерных реакторов. В настоящее время программы технологического усовершенствования реактора SP-100 рассматривают безопасность в качестве высшего приоритета, как составную часть самой программы.

Например, условия безопасности работы реактора SP-100, в настоящее время приняты для всех стадий функционирования реактора, начиная от предполетной подготовки до окончательного размещения на орбите. Это отражено в табл. 7 и наилучшим образом иллюстрирует уровень заботы о безопасности в программах технического развития реакторов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для исследовательских работ на Луне и Марсе с использованием человека, энергетическая ядерная установка является существенным элементом для организации постов

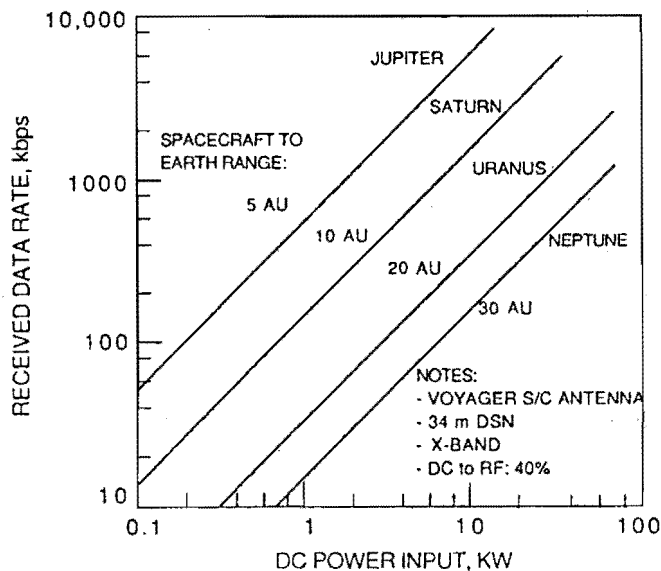


Рисунок 6

Увеличение скорости передачи данных с ростом мощности.

наблюдения или баз, которые требуют потребления энергии от сотен кВт до нескольких МВт. Более того, для транспортных систем с электрическими двигателями, которые нужны для перевозок большого количества материалов, необходимых для сборки и установки обитаемых постов и баз на планетах, понадобятся ядерные энергетические установки мощностью от 2 до 10 МВт. Использование ядерных установок с электрической мощностью от 30 до 120 кВт в комбинации с электрическим двигателем может значительно уменьшить время полета автоматических научных зондов к границам солнечной системы.

Размещенные в космосе ядерные энергетические установки могут также эффективно использоваться для земных нужд, например, для телекоммуникационных платформ и лаборатории по производству материалов в условиях микрогравитации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Pioneering the Space Frontier. Washington, DC, US Government Printing Office,

The National Commission on Space, May 1986.

2. Sally K. Ride, Leadership and America Future in Space, A Report to the Administrator. Washington, DC, NASA Headquarters, August 1987.
3. Civil Applications of Nuclear Power - Final Report of the Civil Missions Advisory Group, Washington, DC, NASA Headquarters, September 1984.
4. J. Mankins, J. Olivieri, A. Hepenstal. Preliminary Survey of 21st Century Civil Mission Applications of Space Nuclear Power (SP-100 Class). Los Angeles, California, Jet Propulsion Laboratory, March 1987, JPL Report JPL-D-3547.
5. Beyond Earth's Boundaries: Human Exploration of the Solar System in the 21st Century. Washington, DC, Office of Exploration, NASA Headquarters, December 1988.
6. Civil Applications of Nuclear Power - Final Report of the Civil Missions Advisory Group, Washington, DC, NASA Headquarters, September 1984.

Таблица 6

Сводная таблица сценариев по уровням располагаемой мощности

	Сценарий		
	I	II	III
Рандеву с кометой и пролет мимо астероида	•		•
Спутник Сатурна и зонд на Титан (Кассини)	•	•	•
Марсоход и доставка грунта	•	•	•
Астероид главного пояса	•	•	
Аэрономия Марса	•		
Солнечный зонд	•	•	•
Доставка образца астероида	•		•
Зонд к внешним планетам			
Посадочный блок Икарус	•	•	•
TAU*			
Возврат образца кометы			
<p>Основные особенности сценариев:</p> <p>I: 0.1 - 10 кВт электроэнергии на науку, химический двигатель.</p> <p>II: 10-100 кВт электроэнергии на расширение научной деятельности, химический двигатель.</p> <p>III: 100-120 кВт электроэнергии на расширение научной деятельности и ядерно-электрический двигатель.</p> <p>* Для получения требуемой мощности в течение длительного периода времени необходимо два реактора с мощностью каждого по 1-2 МВт.</p>			

Таблица 7

Условия безопасного функционирования реактора SP-100

Условия для предполетных операций на Земле

- Не работает и нет продуктов радиоактивного распада.
- Наличие дезактивированного топлива, нет радиоактивной опасности.
- Топливо - в основном уран-235 с добавкой урана-234.
- Уран-235 и уран-234 - излучают α -частицы, которые легко блокируются.
- Многослойная защита от радиации.
- Незначительные дозы радиации идут от реактора.

Условия при запуске и подъеме

- Предохранения от случайного запуска во время номинального режима старта и подъема или аварийного спуска в воду, на почву или скальный грунт.
- Неудовлетворительный уровень мощности при случайной аварии - вынос ядерного топлива из реактора.
Суммарная радиоактивность под оболочкой мала, незначительная биологическая опасность даже при извлеченном из реактора топливе.

Условия функционирования в космосе

- Начало работы при достижении заданной орбиты или поверхности планеты.
- Оболочка реактора не разрушается при выходе из строя энергетической системы.
- Быстрое выключение если оболочка подвергается опасности.
- Конструкция обеспечивает выключения в конце экспедиции.