

Ядерные электроракетные двигатели для полета на Марс

В.В. СИНЯВСКИЙ,
доктор технических наук
Ракетно-космическая корпорация “Энергия”
им. С.П. Королёва

В статье рассмотрены результаты концептуально-проектных разработок РКК “Энергия” ядерных электроракетных двигателей для обеспечения пилотируемой

экспедиции на Марс – начиная с первого проекта тяжелого межпланетного корабля академика С.П. Королёва¹. Рассмотрены различные схемы полета, в

том числе с участием нескольких космических кораблей с возможностью проведения спасательных операций экипажа во время полета².

НОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ ДЛЯ ПОЛЕТА К МАРСУ

Проектирование космического корабля для полета человека к Марсу началось в ОКБ-1 (ныне – РКК “Энергия”) практически с самого зарождения пилотируемой космонавтики. Одним из первостепенных вопросов был выбор типа основной маршевой двигательной установки. Этот вопрос до сих пор обсуждается на всех этапах разработки концепций

марсианской пилотируемой экспедиции.

Главный конструктор С.П. Королёв – не только мечтавший о межпланетных пилотируемых полетах, но и понимающий необходимость создания для их осуществления новых технологий и техники – неоднократно подчеркивал, что “для полета на Марс нужны новые двигатели на основе атомной энергии”. В 1958 г., после успешного запуска

первого искусственного спутника Земли, по указанию С.П. Королёва проектные отделы ОКБ-1 приступили к исследованиям с целью создания и использования электроракетных двигателей, питаемых от ядерной энергетической установки, для межпланетных сообщений.

Привлекательность электроракетных двигателей как двигателей малой тяги резко возрастает при

¹ Горшков Л.А., Сиявский В.В., Стойко С.Ф. Межпланетные проекты С.П. Королёва и их развитие в РКК “Энергия” // В кн.: История развития отечественной пилотируемой космонавтики (М.: Столичная энциклопедия, 2015. С. 253–273).

² Севастьянов Н.Н., Сиявский В.В., Юдицкий В.Д. Концепция экспедиции на Марс в составе эскадры // Известия РАН. Энергетика, 2007. № 3. С. 46–56.

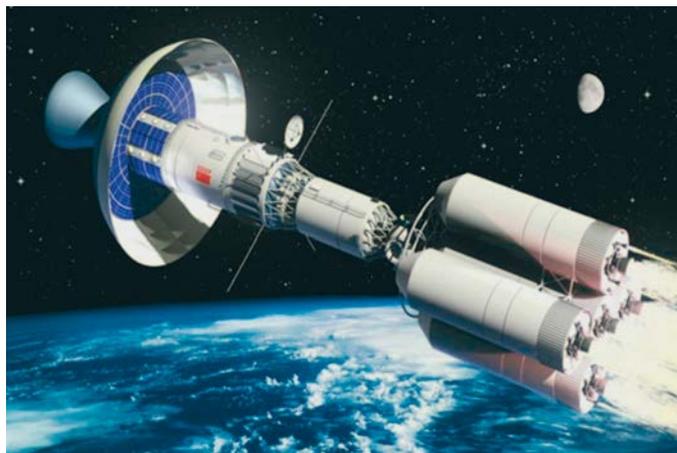
Проект одного из вариантов тяжелого межпланетного корабля академика С.П. Королёва, 1964 г.

рассмотрении межпланетных полетов в Солнечной системе, поскольку соотношение между временем межпланетного перелета и необходимым временем для выполнения полетной задачи соизмеримо. Использование в качестве эффективного энергетического источника ракетного двигателя малой тяги позволяет в десятки раз (по сравнению с газодинамическими методами) увеличить удельный импульс двигателя. Это позволит получить значительную экономию рабочего тела (топлива) – в особенности при осуществлении сложных маневров в космическом пространстве.

МАРСИАНСКИЙ ПРОЕКТ
С.П. КОРОЛЁВА 1960 ГОДА

В 1960 г. был разработан первый проект экспедиции тяжелого межпланетного корабля общей массой 60–80 т для обеспечения посадки человека на поверхность Марса (стартовая масса ракетно-космической

Испытания магнитоплазменно-динамического двигателя электрической мощностью 500 кВт с литием в качестве рабочего тела в вакуумной камере.



системы составляет 1000–2000 т; Земля и Вселенная, 2007, № 2). В этом проекте использовалась электроракетная двигательная установка с ядерным источником электроэнергии. После сравнительного исследования космических ядерно-энергетических установок с различными схемами преобразования тепловой энергии в электрическую (газотурбинной, паротурбинной и с непосредственным термоэмиссионным преобразованием энергии) специалисты

выбрали схему с термоэмиссионным реактором-преобразователем из-за очевидных преимуществ (по сравнению с другими схемами преобразования) тепловой энергии в электрическую:

- простая тепловая и электрическая схемы;
- отсутствие движущихся частей и, следовательно, повышенная надежность;
- слабая чувствительность к единичным точечным отказам;
- простые запуск и прекращение работы;



– возможность многократного применения и запуска ядерно-энергетической установки без затрат электроэнергии;

– высокая температура отвода тепла и компактный холодильник-излучатель; поэтому минимальная масса и габариты установки;

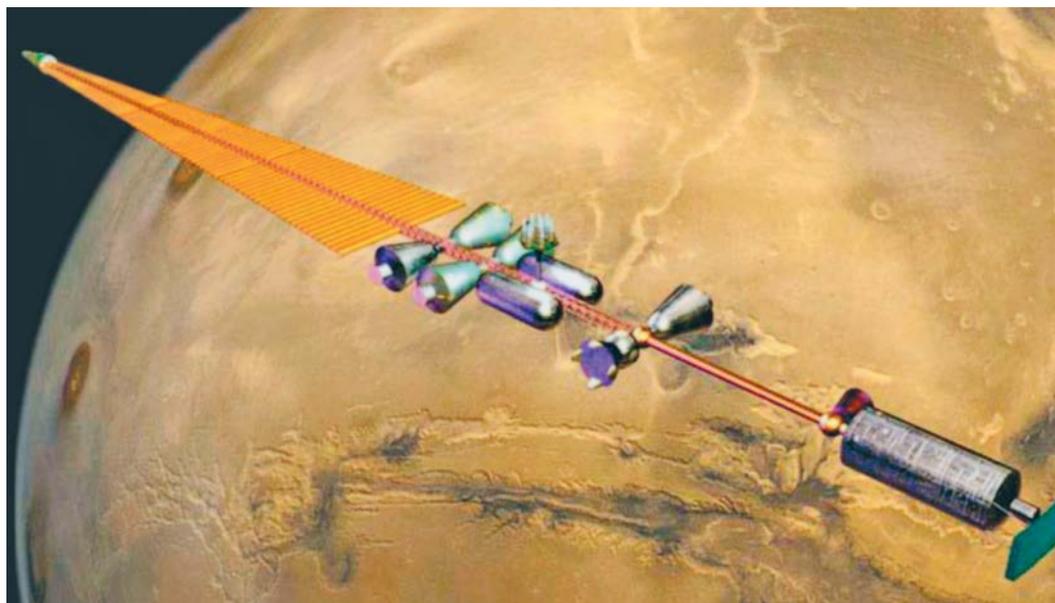
– потенциальные возможности повышения КПД, удельных энергетических характеристик и нижней температуры термодинамического цикла: существенное снижение удельной массы и габаритов ядерно-энергетической установки.

Межпланетный космический корабль с ядерным электроракетным двигателем электрической мощностью 7 МВт (экипаж – 6 человек) на орбите Марса.

Термоэмиссионный реактор-преобразователь обладал электрической мощностью в 7 МВт и оснащался радиационной биологической защитой, “в тени” которой располагался марсианский корабль. В качестве электроракетной двигательной установки планировалось использовать низковольтный магнитоплазмодинамический двигатель большой мощности. Образец такого двигателя мощностью 500 кВт создали и испытали в 1976 г. в РКК “Энергия”.

Межпланетный корабль общей массой до 500 т собирался на околоземной орбите из отдельных модулей массой порядка 80 т, выводимых разрабатываемой тогда ракетой-носителем “Н-1” сверхтяжелого класса, и затем должен был стартовать в сторону Марса с экипажем из шести человек.

Трое из шести членов экипажа вместе с оборудованием совершили посадку на поверхность Марса, для чего предусматривалось создание пяти спускаемых аппаратов сегментально-конической формы. После посадки исследовательский комплекс – его отдельные модули последовательно соединялись вместе, формируя “поезд”, движущийся на крупногабаритных колесных шасси. “Поезд” должен был состоять из пяти платформ-модулей: кабины экипажа с манипулятором и буровой установкой; конвертоплана (беспилотный самолет) для разведочных полетов над Марсом; взлетных ракет (одна запасная) для возвращения экипажа с поверхности Марса на корабль, находящийся на околомарсианской орбите; платформы



Самодвижущийся колесный “поезд”, сформированный на поверхности Марса из доставленных платформ-модулей.

с силовой ядерной энергоустановкой.

Многомодульный “поезд” длиной порядка 20 м в течение одного года должен был пройти по поверхности Марса – от Южного полюса до Северного, провести исследования его грунта и атмосферы, затем передать информацию на корабль, обращающийся по орбите вокруг Марса; оттуда она ретранслировалась на Землю. После выполнения программы работ на поверхности Марса экипаж с образцами грунта и другими результатами исследований должен был возвратиться на орбитальный корабль и затем стартовать к Земле.

ПРОЕКТ МАРСИАНСКОЙ
ЭКСПЕДИЦИИ 1969 ГОДА

В 1969 г. был разработан еще один проект пилотируемой экспедиции на Марс. Марсианский корабль общей массой 600–700 т должен был собираться на околоземной орбите с использованием “Н-1М” – модификации разрабатываемой

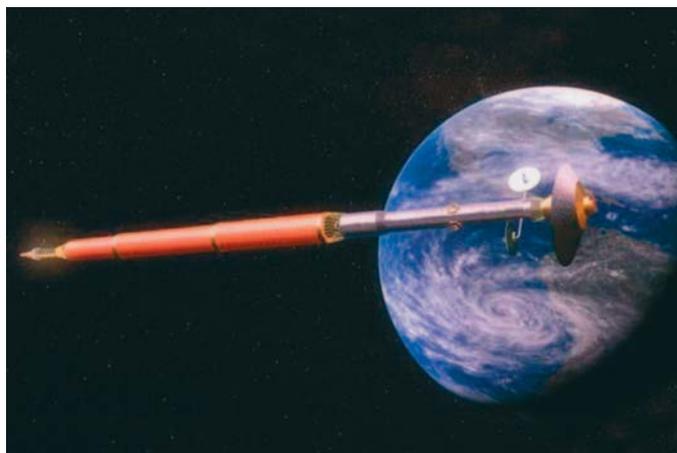
Межпланетный корабль с термоэмиссионным реактором мощностью 15 МВт на орбите Марса. Экипаж состоит из четырех человек.



тогда ракеты-носителя “Н-1” стартовой массой 2200 т. В составе марсианского экспедиционного комплекса предусматривались: межпланетный орбитальный корабль массой около 50 т, в котором размещались экипаж и основные бортовые системы; марсианский посадочный корабль для спуска на поверхность Марса массой 30 т; возвращаемый аппарат для обратного перелета к Земле; электро-ракетная двигательная

установка с термоэмиссионной ядерно-энергетической установкой.

Конструкция марсианского экспедиционного комплекса представляла собой орбитальный корабль с вынесенными с двух сторон от него ядерными электроракетными двигателями и реактором для радиационной безопасности, а также конечным радиатором системы сброса непреобразованного тепла термодинамического цикла.





Старт взлетной ступени марсианского корабля с экипажем со стационарной посадочной платформы.

В отличие от проекта 1960 г., на поверхность Марса садился один посадочный аппарат сегментально-конической формы с разворачивающимся лобовым теплозащитным щитом. На корабле также использовались электрореактивные двигатели, электрическая

мощность термоэмиссионного реактора-преобразователя была увеличена до 15 МВт. Численность экипажа уменьшилась до четырех человек.

ПРОЕКТ МАРСИАНСКОЙ ЭКСПЕДИЦИИ 1987 ГОДА

В следующем проекте экспедиции на Марс,

созданном в 1987 г., после успешного запуска сверхтяжелой РН "Энергия", использовались многие технические решения проекта 1969 г. Его особенность – использование РН "Энергия" в качестве средства доставки элементов корабля общей массой 500 т на околоземную орбиту. Была изменена также форма посадочного корабля ("несущий корпус" вместо "фары" с теплозащитным экраном).

В этом проекте для межпланетного перелета использовались две независимые автономные электроракетные двигательные установки

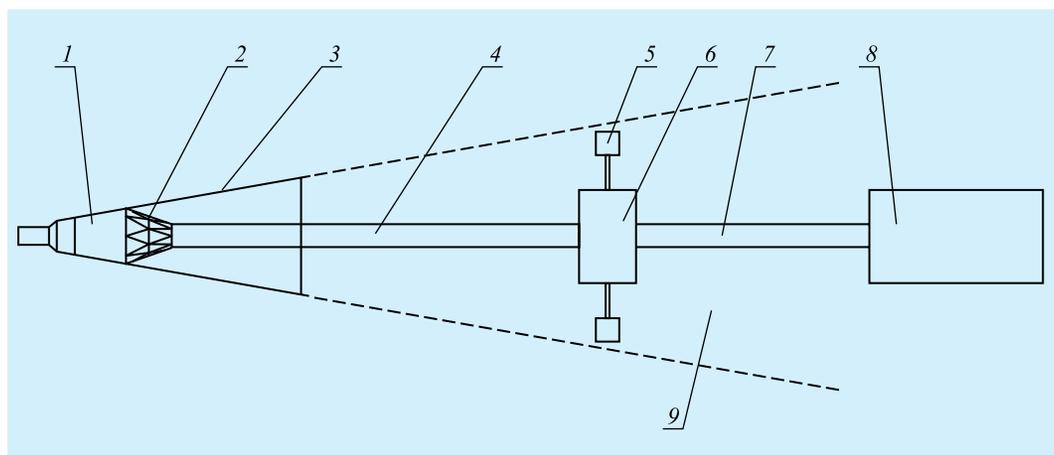


Схема космического транспортного средства с ядерным электроракетным двигателем: 1 – ЯЭУ; 2 – ферменная вставка; 3 – холодильник-излучатель; 4 – ферма системы отведения ЯЭУ; 5 – блок электроракетных двигателей; 6 – приборно-агрегатный отсек ЭРДУ; 7 – ферма системы отведения блока полезного груза; 8 – блок полезного груза; 9 – "зона тени" радиационной защиты.



Межпланетный корабль с двумя независимыми ядерными электроракетными двигателями, предназначенными для повышения надежности перелета на околоземной орбите.

с пакетом электроракетных двигателей, питаемых от ядерно-энергетической установки с термоэмиссионным реактором-преобразователем электрической мощностью 7,5 МВт.

Отметим, что суммарная мощность двух ядерных электроракетных двигателей (ЯЭРД) осталась, как и в проекте 1969 г., равной 15 МВт; причем использование двух ЯЭРД

мощностью по 7,5 МВт не привело к увеличению начальной массы и понижению стоимости, в сравнении с ЯЭРД мощностью 15 МВт. Использование двух автономных ЯЭРД

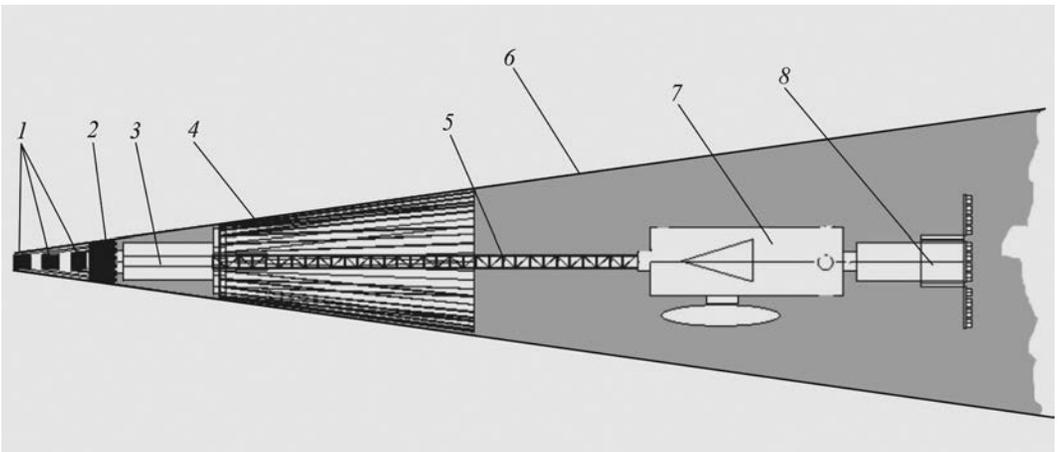


Схема межпланетного транспортного корабля с ядерным электроракетным двигателем: 1 – реакторы ядерной энергетической установки (термоэмиссионные реакторы-преобразователи), 2 – теневая радиационная защита, 3 – отсек оборудования ЯЭУ, 4 – холодильник-излучатель, 5 – трансформируемая ферма, 6 – граница конуса радиационной тени, 7 – полезный груз, 8 – электроракетная двигательная установка (высоковольтная).

позволило значительно увеличить надежность и безопасность межпланетного перелета, так как даже при одной работающей ЯЭРД экипаж мог быть возвращен на Землю с любой точки траектории полета.

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ПРОЕКТЫ 2000-х гг.

После 2000 г. на РКК “Энергия” были разработаны еще несколько концептуальных проектов экспедиции на Марс с использованием одного корабля, оснащенного электроракетными двигателями, работающими как на солнечной энергии, так и с использованием ядерной установки. Особенность проектов состояла в необходимости сокращения времени экспедиции, а, следовательно, – в увеличении мощности маршевого двигателя. Кроме того, в этих проектах рассматривалось повторное использование созданных космических комплексов для следующих марсианских экспедиций и в других программах (прежде всего, для обеспечения больших грузопотоков при освоении Луны).

Основные характеристики марсианского экспедиционного комплекса проекта начала 2000-х гг. с трехблочной ЯЭРДУ суммарной электрической мощностью 24 МВт (6 МВт × 3) следующие: стартовая масса – до 500 т, масса взлетно-посадочного комплекса – до 40 т, тяга электроракетных двигателей

для межпланетного перелета – 480 Н, удельная тяга электроракетных двигателей – 50–90 км/с, количество членов экипажа межпланетного комплекса – 4–6 человек, количество членов экипажа взлетно-посадочного комплекса – 2–3 человека, общее время полета на Марс и обратно – около 2,5 лет, время работы экипажа на поверхности Марса – 15–30 сут.

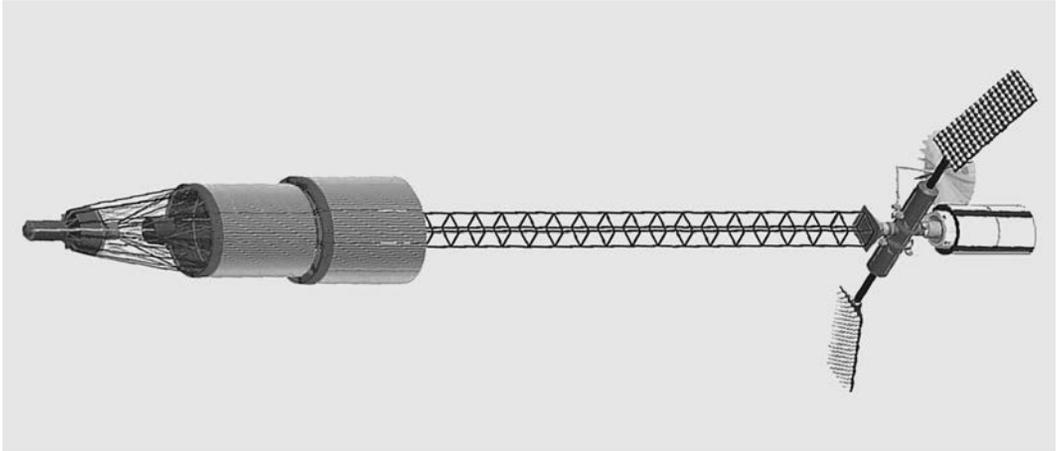
Сокращение времени экспедиции требует увеличения не только электрической мощности двигателя, но и снижения удельной массы ЯЭРД, прежде всего ядерной энергетической установки (ЯЭУ). Для экспедиции длительностью порядка 500 сут потребуются двигатели в несколько десятков мегаватт с удельной массой 3–4 кг/кВт; для 700 суток – двигатель примерно в 5,5 кг/кВт. Такие низкие удельные массы могут быть достигнуты лишь в высокотемпературных одноблочных ядерных энергетических установках: в частности, в термоэмиссионных, в которых в качестве теплоносителя используется жидкий литий, а в качестве конструкционного материала – жаропрочный сплав ниобия.

ДОСТАВКА К МАРСУ ТЯЖЕЛЫХ ГРУЗОВ

Один из возможных вариантов схемы экспедиции на Марс предполагает, что на его поверхности заранее создается база с соответствующей инфра-

структурой, и лишь потом осуществляется пилотируемая экспедиция с высадкой космонавтов на планете и их работа на базе; это позволит минимизировать робототехнические операции на поверхности Марса. Этот вариант предполагает доставку беспилотными транспортными кораблями полезного груза массой в десятки (и даже в сотни) тонн, в том числе и отдельных модулей.

Специалисты РКК “Энергия” исследовали проблему обеспечения довольно больших грузопотоков с околоземной орбиты на орбиту искусственного спутника Марса. Для обеспечения межорбитальной перевозки грузов используется ЯЭРД на основе термоэмиссионной ядерной установки мощностью от 500 кВт и ресурсом до трех лет; обоснованными можно считать параметры разработанного в РКК “Энергия” межорбитального буксира “Геркулес” с ядерным электроракетным двигателем мощностью 500–600 кВт. Особенность ЯЭУ буксира – модульное построение и использование высокотемпературных технологий для изготовления всех агрегатов с рабочей температурой 800–950 °С. Учитывая возможность сброса необработанного в термодинамическом цикле тепла лишь тепловым излучением, высокотемпературные технологии позволили создать ядерно-энергетическую установку компактной, с низкой удель-



Межорбитальный электроракетный буксир "Геркулес" с термоэмиссионной ядерно-энергетической установкой электрической мощностью 500–600 кВт.

ной массой (10–15 кг/кВт), недостижимой при других (нетермоэмиссионных) схемах преобразования тепла в электричество. Такой буксир предназначался для решения ряда транспортно-энергетических задач в околоземном космосе. Модульное построение позволяло наращивать его мощность за счет увеличения количества модулей и некоторого повышения удельных энергетических характеристик энергоустановки, а также использовать отработанные технологии буксира "Геркулес" в перспективных программах освоения Луны и полета на Марс.

Особенность этой транспортной операции (в отличие от пилотируемой экспедиции) состоит в том, что здесь нет жестких ограничений по времени, поэтому параметры ЯЭРД и транспортировки могут быть

оптимизированы: в частности, может быть уменьшена мощность ЯЭРД для заданной массы полезного груза. Определено, что применительно к доставке на орбиту Марса груза массой 20 т эффективно использование одноразового межорбитального буксира типа "Геркулес" на основе термоэмиссионной ядерно-энергетической установки мощностью 500 кВт, длительное время разрабатываемого в РКК "Энергия". Транспортный комплекс на околоземной орбите высотой 800 км может быть сформирован тремя пусками ракет-носителей тяжелого класса ("Протон", "Ангара-А5") или одним пуском класса РН "Энергия" ("Ангара-7").

Для транспортировки на орбиту Марса полезных грузов массой 100–200 т могут быть использованы ядерные электроракетные

двигатели мощностью 1,6–3,1 МВт с ресурсом до двух лет. Высокой эффективностью в решении рассматриваемой задачи обладает двигатель на основе термоэмиссионной ядерной установки – имеет минимальную удельную массу, по сравнению с ядерными установками с динамическими схемами преобразования энергии. Это получается за счет высокого значения нижней температуры термодинамического цикла и, соответственно, малыми габаритами и массой холодильника-излучателя.

Использование в грузовом корабле в качестве двигательной установки ЯЭРД вместо ЖРД позволяет существенно (в 4–8 раз, в зависимости от электрической мощности ЯЭРД) сократить число пусков тяжелых ракет-носителей для формирования транспортного комплекса по доставке тяжелых

**СРАВНЕНИЕ ОДНОРАЗОВЫХ ТРАНСПОРТНЫХ КОРАБЛЕЙ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ
ЖИДКОСТНЫЕ РАКЕТНЫЕ ДВИГАТЕЛИ (ЖРД) И ЯДЕРНЫЕ
ЭЛЕКТРОРАКЕТНЫЕ ДВИГАТЕЛИ (ЯЭРД)**

Масса груза на орбите, т	Тип двигательной установки	Начальная масса на низкой околоземной орбите, т	Время полета к Марсу, сут	Мощность ядерного двигателя, кВт	Отношение начальных масс буксира с ЖРД и ЯЭРД
20	ЖРД	416	270	–	–
20	ЯЭРД	54	690	500	7,7:1
20	ЯЭРД	97	352	4120	4,3:1
100	ЖРД	2080	270	–	–
100	ЯЭРД	283	360	15 300	7,35:1
100	ЯЭРД	496	287	10 200	4,2:1
200	ЖРД	4160	270	–	–
200	ЯЭРД	492	360	26 500	8,45:1
200	ЯЭРД	707	317	17 600	5,9:1

полезных грузов на орбиту Марса с целью строительства марсианской обитаемой базы.

**ПОЛЕТ НА МАРС
ЭСКАДРЫ КОРАБЛЕЙ**

Классики космонавтики С.П. Королёв (СССР) и Вернер фон Браун (США) высказывались в своих ранних статьях о полете человека к Марсу в пользу эскадренного построения экспедиции. В частности, в своей статье, датированной 1966 г., С.П. Королёв писал: *“...в будущем космические корабли с людьми пойдут в дальние рейсы к Луне, планетам и их спутникам. Надежность таких экспедиций повысится, если посылать не один корабль, а два и более...”*. Однако первые детальные проекты, заложенные при их жизни (и позже), строились, как отмечено выше, по схеме

запуска одного корабля с экипажем.

Эскадра должна состоять как минимум из двух кораблей, причем оба корабля пилотируемые – с экипажем по 2 или 3 космонавта в каждом. Возможно и большее число кораблей, но остальные – грузовые. Важным моментом считается то, что в каждом из пилотируемых кораблей соответствующие системы жизнеобеспечения и запасы расходных материалов должны быть рассчитаны на полный состав экспедиции (на 4 или 6 человек). Это позволяет при отказе одного из пилотируемых кораблей завершить экспедицию на втором пилотируемом корабле.

Сборка кораблей производится на высокой околоземной орбите – например, в 200 тыс. км. Экипажи доставляются на борт транспортными

кораблями с двигателями на основе ЖРД: например, с помощью перспективных пилотируемых транспортных кораблей нового поколения “Федерация”. Корабли эскадры стартуют с высокой околоземной орбиты и выходят на траекторию полета к Марсу практически одновременно. Дальнейший полет эскадры кораблей осуществляется с использованием ЯЭРДУ. На стартовой орбите формируется оптимальное расстояние между кораблями (порядка 300 км), которое обеспечивает снижение допустимого уровня мощности радиационной дозы облучения от работающих реакторов ЯЭРДУ (экран является щитом только для экипажа). Выбор такого расстояния позволяет не изменять принципы устройства защиты от излучения реактора – оно определяет разумное

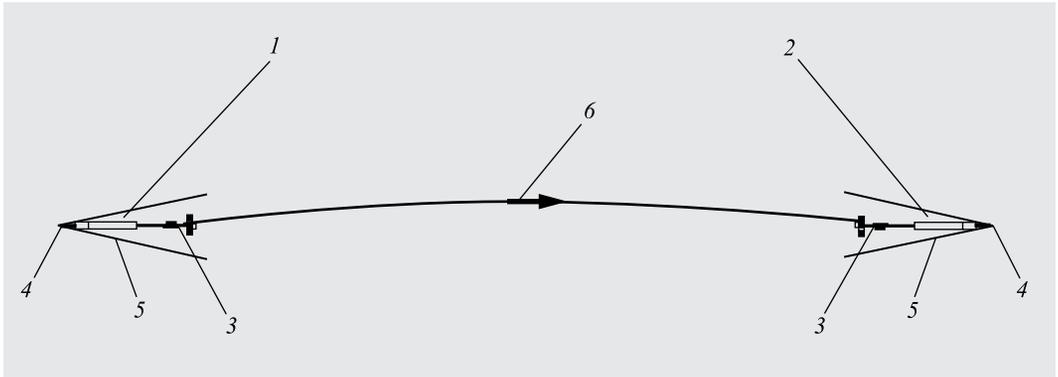


Схема спасательной операции, возможной в межпланетной экспедиции: 1 – первый корабль, участвующий в операции; 2 – второй корабль, участвующий в операции; расстояние между кораблями – около 300 км; 3 – обитаемые комплексы кораблей; 4 – ядерные реакторы энергодвигательных установок кораблей (при проведении спасательной операции реакторы заглушены, но являются источниками гамма-излучения); 5 – границы конуса защищенного от радиационного излучения пространства, создаваемого радиационной защитой ядерного реактора энергодвигательной установки, 6 – траектория маневра корабля-спасателя.

время, необходимое для того, чтобы корабли (или бортовые средства индивидуального транспорта) могли сблизиться и оказать помощь одному из них в случае аварийной ситуации. Схема спасательной операции при возникновении аварийной ситуации на межпланетной траектории (при условии сохранения расстояния между кораблями) предполагает кратковременное выключение двигательных установок: это нарушает на малую величину программное соотношение координат кораблей и планеты назначения; на этот случай, следовательно, должны быть предусмотрены резервы рабочего тела двигательных установок, позволяющих провести маневр коррекции траектории.

Высокая надежность выполнения экспедиции достигается при условии независимости отказов разделенных кораблей эскадры. Это чрезвычайно важный фактор. Сколько бы труда и средств не вкладывалось в конструкцию отдельного космического корабля (довольно сложного устройства) – невозможно избежать отказа в одном агрегате (или системе); это может вызвать цепную реакцию отказов в других агрегатах и системах, связанных с ними функционально. В такой сложной системе ее надежность не увеличивается по мере усложнения; возможно даже ее уменьшение (по мере усложнения устройства) в результате взаимодействия и наложения отказов, нестандартных ситуаций. Напротив,

реализуя принцип независимости отказов, можно повышать надежность системы путем вложения дополнительных средств в модернизацию; при этом следует иметь в виду, что приближение надежности к единице (с ростом ее значения на проценты и доли процента) эквивалентно снижению в разы (и даже в десятки раз) вероятности неблагоприятного исхода. Применительно к пилотируемой марсианской экспедиции этот тезис исключительно важен, так как это прямой путь повышения вероятности успеха путем вложения средств. Итак, основная идея эскадренного построения кораблей – возможность оказания помощи при возникновении аварийной ситуации и преодоление ее с сохранением возможности

успешного завершения экспедиции.

Выполненные в РКК “Энергия” исследования показали, что уже при схеме из двух кораблей эффективность экспедиции (отношение вероятности неудачи экспедиции, состоящей из одного корабля, к вероятности неудачи перелета эскадрой) возрастает на порядок, а при четырех – на три порядка. Следует особо отметить, что увеличение в два–четыре раза числа кораблей эскадры (вместо одного) отнюдь не означает увеличения в столько же раз стоимости экспедиции. Это следует из следующих известных факторов: стоимость изготовления космического корабля, реализующего определенную космическую программу, составляет 1/10...1/20 от стоимости программы технологической и экспериментальной отработки первых образцов на стадии опытно-конструкторских работ и еще меньшую долю – от стоимости инфраструктуры, обслуживающей программу. Следовательно, увеличение числа кораблей пилотируемой эскадры приведет к увеличению стоимости пилотируемой части экспедиции всего лишь на 10–20%, а с учетом непилотируемой составляющей и на еще меньшее количество. Следует также принять, что все корабли эскадры (пилотируемые и грузовые) должны быть полностью укомплектованы системами

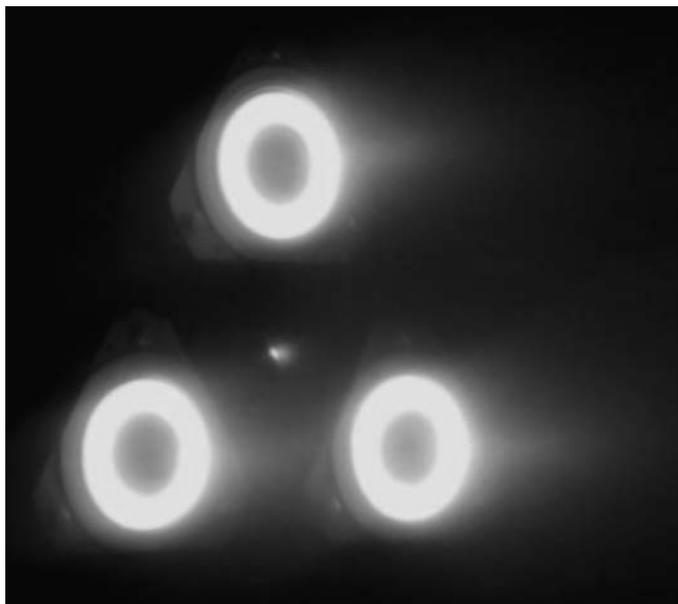
и расходными материалами, рассчитанными на полный состав экспедиции. Таким путем минимизируется объем операций, и, следовательно, время на их выполнение, а также вероятность неудачи при выполнении спасательной операции. Переброска экипажа аварийного корабля производится на один из резервных. Можно рассматривать и более сложные построения, предусматривающие неполное резервирование расходных материалов и отвести для них место в перемещаемых стыкуемых блоках. Представляется, что выигрыш в массе (и в стоимости миссии) при этом невелик, а снижение вероятности успеха может быть ощутимым.

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ ЭЛЕКТРОРАКЕТНЫЙ ТРАНСПОРТНЫЙ АППАРАТ

В РКК “Энергия” предложено использовать транспортный корабль, состоящий из трех независимых блоков. Ядерный электроракетный двигатель после возвращения с орбиты Марса используется для транспортного обслуживания околоземного пространства. В блоке реакторов размещаются три термоэмиссионных реактора со своими обслуживающими системами, каждый рассчитан на электрическую мощность в 7 МВт. При осуществлении перелета: орбита Земли – орбита Марса – орбита Земли все три блока работают одновременно, что

обеспечивает необходимую энергооборудованность марсианского экспедиционного комплекса (21 МВт) и кинематическое согласование траектории комплекса с движением планет. При использовании в околоземном пространстве ядерного электроракетного двигателя жесткого кинематического ограничения, как правило, нет. Это позволяет использовать запас энергии, сосредоточенный в реакторах марсианского электроракетного двигательного блока (ЭДБ) иным способом, более “адекватным” околоземным задачам. Блоки ядерных электроракетных двигателей используются последовательно во времени, каждый на уровне мощности в 5250 кВт (0,75 мощности номинального режима марсианского двигателя), что позволяет увеличить ресурс моторного времени в 6 раз (суммарно – до 10 лет) при разумных значениях времени выполнения заданных полетных задач.

Электроракетный двигатель рассматривается в двух вариантах. Энергетически и по массовым показателям наиболее привлекательным и совместимым по электрическим параметрам с термоэмиссионным реактором-преобразователем считается электроракетный двигатель, использующий в качестве рабочего тела литий. Электроракетный торцевой стационарный двигатель размещается не-



Испытания “связки” из трех электроракетных двигателей с анодным слоем в вакуумной камере.

электрической мощностью до 30 кВт, использующие различные рабочие тела висмут, ксенон) с удельным импульсом до 70 км/с и КПД до 0,7 были разработаны в РКК “Энергия” и ЦНИИмаш и прошли испытания.

Срок службы ЭДБ транспортного средства с ядерным электроракетным двигательным блоком (ЯЭДБ) увеличивается путем последовательного во времени, отдельного использования каждого из трех блоков ЯЭДБ на пониженном уровне мощности. Это обеспечивает увеличение ресурса каждого энергоблока от 1,5 лет (как того требует задача доставки марсианской экспедиции) до примерно

посредственно за радиационной защитой реактора для того, чтобы минимизировать длину низковольтных шин. Логика построения такого двигателя в случае его использования в качестве многоразового буксира существенно

различается: применяются плазменные высоковольтные двигатели типа двигателя с анодным слоем, обладающие более высоким ресурсом при работе на рабочих телах с высокими значениями атомного веса. Такие двигатели

Таблица 2

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЯДЕРНОГО ЭЛЕКТРОРАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЬНОГО БЛОКА ДЛЯ МАРС-ЭДБ И МНОГОРАЗОВОГО БУКСИРА

Тип и параметры двигателей	Марс-ЭДБ	Многоразовый буксир
Номинальная электрическая мощность, МВт	$7000 \times 3 = 21\ 000$	$5250 \times 1 = 5250$
Тип ядерного реактора	термоэмиссионный реактор-преобразователь	термоэмиссионный реактор-преобразователь
Тип ЭРДУ	торцевой стационарный двигатель	двигатель с анодным слоем
Удельный импульс, км/с	50	35
Рабочее тело (топливо)	Li	Bi, Xe, Ar
Мощность одного тягового модуля, кВт	до 1000	50–100
Требуемый ресурс, годы	1,45	10
Масса ЯЭДБ, т	87	87
Удельная масса, кг/кВт	4,15	16,6

3 лет, при сохранении динамических качеств двигателя, удовлетворительных для использования в околоземном космосе. Суммарный моторный ресурс энергоустановки ЯЭДБ может составить 10 лет (и более) при значении удельной массы 16,6 кг/кВт; при этих условиях высокоорбитальный буксир может совершить до 20 рейсов на геостационарную орбиту и обратно. Основные характеристики ЯЭДБ для марсианского ЭДБ (Марс-ЭДБ) и многогоразового околоземного буксира приведены в таблице 2.

Информация

Пролеты “Кассини” под кольцами Сатурна

В начале 2017 г. АМС “Кассини” (запущена 15 октября 1997 г.; Земля и Вселенная, 1998, № 3, с. 48–51) приступила к серии из 22 пролетов в зазор между внутренним кольцом D Сатурна и верхушками облаков планеты, которые будут продолжаться в течение пяти месяцев (см. стр. 3 обложки, вверху). Щель между кольцами и верхним слоем атмосферы газового гиганта составляет примерно 2 тыс. км. Аппарат пролетает ее со скоростью 110–124 тыс. км/ч (30,5–34,4 км/с), на один виток уходит чуть более 6 сут. Ученые надеются, что собранные данные помогут дать ответы на давно мучающие их вопросы о происхождении колец Сатурна,

В течение более 50 лет работы над проектом межпланетного корабля для полета человека на Марс прошли большую эволюцию. Многие технические решения марсианского экспедиционного комплекса отработывались при полетах орбитальных станций, пилотируемых и грузовых кораблей. Для обеспечения полета в РКК “Энергия” создан большой научно-технический задел по ядерным электроракетным двигателям, термозмиссионной ядерно-энергетической установке и электроракетным двигателям мощностью

их составе и свойствах. Эти рискованные пролеты станут последним заданием станции, она закончит свое существование 15 сентября 2017 г. упав на планету-гигант. Первоначально исследования в системе Сатурна были рассчитаны на 4 года. Состояние аппарата оставалось хорошим, а сведения, получаемые с орбиты, – захватывающе интересными, поэтому полет АМС неоднократно продлевался. На сей раз, исчерпав топливо, она больше не сможет работать на орбите Сатурна.

Станция в первый раз “нырнула” 26 апреля 2017 г. под кольца Сатурна, пролетев на высоте 3 тыс. км над облаками планеты и в 300 км от края кольца D (Земля и Вселенная, 2017, № 3, с. 48–51; 2017, № 4, с. 48–51). Ввиду опасности столкновения с частицами колец (при такой скорости попадание даже крохотной крупинки в космический аппарат может оказаться

в десятки и сотни киловатт. Пилотируемые комплексы и автоматические аппараты составляют единый инструментарий исследования космоса, каждое направление имеет свою нишу они дополняют и обогащают друг друга. Уникальный опыт в области пилотируемой космонавтики, в использовании термозмиссионных ядерно-энергетических установок и электроракетных двигателей позволяет разработать, как представляется, наиболее реализуемую концепцию пилотируемой экспедиции на Марс.

губительным для него) используется в качестве “щита” 4-м радиоантенной станции. Аналитики считают, что это маловероятно, но специалисты по управлению полетом Лаборатории реактивного движения (JPL) хотят избежать даже мельчайшего риска, поэтому “Кассини” направляют именно в этот промежуток между кольцами. Так как антенна на время пролетов не направлена в сторону Земли, радиокontakt с АМС теряется и принимается вновь лишь через 20 ч станцией Дальней космической связи NASA в Голдстоуне (штат Калифорния). Специалисты NASA называют такие пролеты грандиозным финалом всей программы.

“Кассини” присылает на Землю фотографии колец Сатурна беспрецедентного качества, а также данные, которые помогут ответить на множество до сих пор неразрешенных вопросов об истории этой планеты.

Близкие пролеты над вер-хушками облаков позво-лят с высокой точностью измерить гравитационное и магнитное поля Сатурна. Одна из главных задач – определить массу, и, соот-ветственно, возраст колец: чем больше их масса – тем выше шанс, что они суще-ствуют с глубокой древ-ности – возможно, даже являясь ровесниками са-мой планеты. Необходимо также понять параметры элементного состава ко-лец: известно, что в основ-ном они состоят из чистой воды в виде льда. Если их возраст соответствует воз-расту самого Сатурна, то почему они выглядят так “свежо” в то время, как на них постоянно обрушива-ются метеориты? Согласно одной из теорий, возраст колец совсем небольшой, так как они могут быть об-ломками ядра кометы, ко-торая слишком близко по-дошла к Сатурну и была разорвана его гравитаци-онным полем на бесчислен-ные фрагменты.

На последних пяти вит-ках перицентр орбиты “Кассини” будет достаточ-но низок для того, чтобы аппарат ненадолго входил в верхние слои атмосфе-ры Сатурна и с помощью масс-спектрографа изме-рял их состав и свойства. При входе в атмосферу по-ток набегающего газа мож-ет развернуть главную радиоантенну аппарата прочь от Земли, для ком-пенсации этой ситуации задействованы двигатели системы ориентации. На последнем витке резуль-таты измерений будут пе-редаваться на Землю в ре-жиме реального времени до тех пор, пока двигатели



АМС “Кассини” на фоне облаков и колец Сатурна. Рису-нок NASA/JPL.

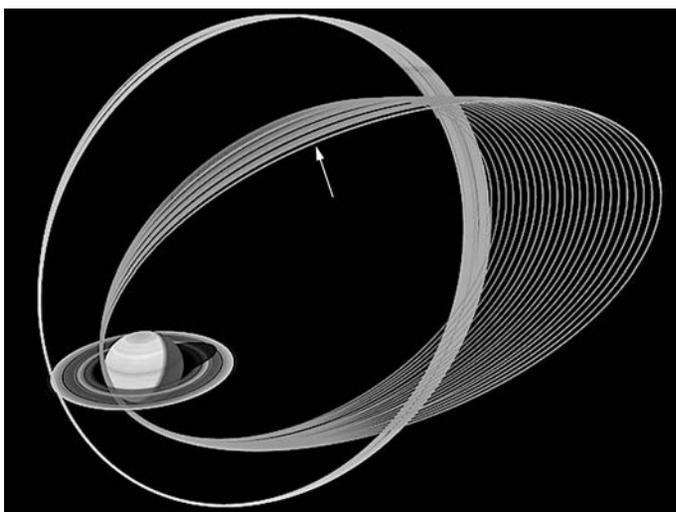
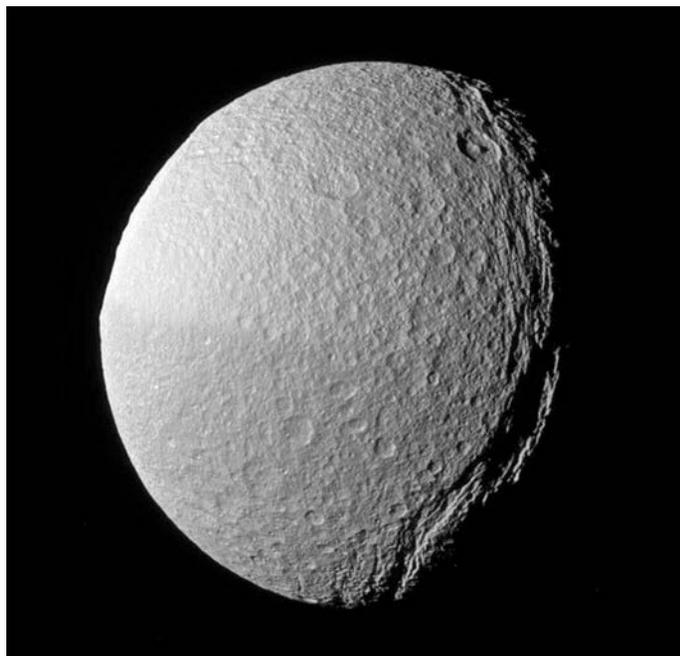


Схема “орбит, царапающих кольцо” (почти круговые) и фи-нальные орбиты (содержат 22 витка). Завершающая часть траектории АМС “Кассини” закончится падением ее в ат-мосферу Сатурна (показана стрелкой). Фото NASA/JPL.

будут в состоянии поддер-живать нужную ориента-цию станции. Ожидается, что через несколько десят-ков секунд после того, как набегающий поток отвер-нет главную радиоантен-ну “Кассини” от направ-ления на Землю, аппарат

разрушится в плотных сло-ях атмосферы.

АМС передала на Землю во время близких пролетов снимки спутников Сатурна (Земля и Вселенная, 2005, № 5). 30 января 2017 г. уз-коугольной камерой полу-чено изображение Тефии



Спутник Сатурна Тетия (диаметр 1062 км). Вблизи терминатора темной полосой тянется почти на 3/4 диаметра спутника каньон Итака шириной 100 км, глубиной 4 км. Ударный бассейн Одиссей едва виден “в профиль” на лимбе спутника, вверху слева. Снимок получен 30 января 2017 г. АМС “Кассини” с расстояния 356 тыс. км, разрешение около 2 км (север – сверху). Фото NASA/JPL.

(диаметр около 1060 км), на которой видны каньон Итака (Ithaca Chasma) и ударный бассейн Одиссей (Planitia Odysseus). Небольшие ледяные спутники, вращающиеся в кольцах или рядом с ними, удивляют своей необычной формой, напоминающей пельмень или летающую тарелку. Частицы кольца оседают на экваторе таких спутников, образуя гладкий круговой вал; слабая гравитация этих тел позволяет валу, не обрушиваясь, расти до высоты десятков километров. 12 апреля 2017 г. АМС “Кассини” пролетела на расстоянии 11 тыс. км от 30-км Атласа, вращающегося с внешней

стороны кольца А Сатурна. Поверхность спутника оказалась неровной, в центре – испещренной бороздами; по экватору Атлас окружен гладким широким валом. Отсутствие ударных кратеров на валу говорит о молодости этой структуры или о регулярных процессах обновления его поверхности.

27 ноября 2016 г. с расстояния 32 тыс. км (разрешение – 190 м) узкоугольной камерой получен снимок Энцелада (496,6 × 502,8 × 513,2 км). Обилие ударных кратеров в северной околюлярной области Энцелада говорит о том, что поверхность здесь давно не обновлялась, здесь

видны многочисленные следы тектонической активности – трещины, разломы; кратеры с затопленным дном, их форма искажена подвижкой ледяных блоков. В 2005 г. станция обнаружила вблизи южного полюса Энцелада фонтаны из частиц водяного льда и пара, извергающиеся в космос из параллельных трещин – “тигровых полос” (Земля и Вселенная, 2006, № 1, с. 101–105; 2006, № 4, с. 110–111). В недрах спутника присутствует глобальный океан горячей воды. Анализ снимков “Кассини” привел к неожиданным результатам – все формы рельефа возникли не там, где следовало бы. В частности, “тигровые полосы” и три крупные низменности на Энцеладе должны были появиться в экваториальных, а не в приполярных регионах. Расчеты показывают, что подобные аномалии можно объяснить тем, что ось вращения Энцелада в далеком прошлом была повернута на 55° в результате столкновения с крупным телом. Когда это произошло, Энцелад стал временно нестабильным и ось его вращения начала “шататься”, меняя положение на протяжении достаточно долгого времени; эти явления создали особый узор на поверхности. Упавшее небесное тело пробило ледовую оболочку спутника, в результате возникли гейзеры и другие следы внутренней активности, что объясняет различия в облике полюсов. На основе данных “Кассини”, ученые JPL составили карту полушарий Энцелада с областями, где есть

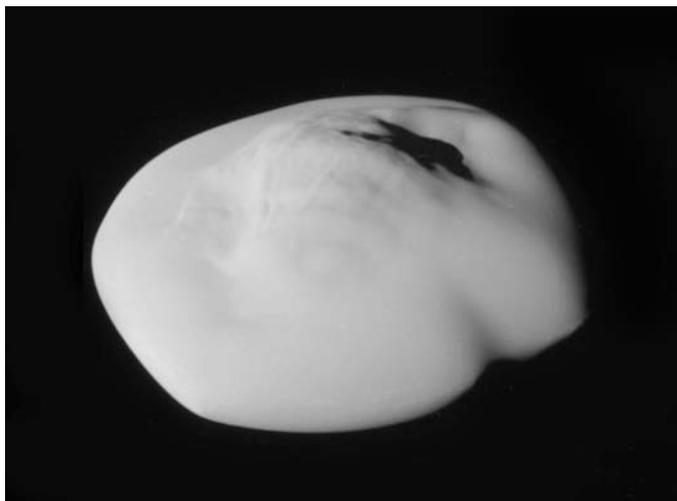
“тигровые полосы” (см. стр. 3 обложки, внизу).

Двигаясь по орбитам, “царапающим кольцо”, “Кассини” периодически пролетает мимо небольших ледяных спутников Сатурна, называемых еще “спутниками-пастухами”. 18 декабря 2016 г. передан снимок высокого разрешения, сделанный во время третьего витка, когда станция сблизилась на расстояние 40,5 тыс. км с крошечным “спутником-пастухом” кольца F – Пандорой (64 × 80 × 103 км), входящей в резонанс со 100-км Прометеем. Отличительная особенность Пандоры – неправильная, вытянутая форма и два больших кратера диаметром около 30 км, ее ледяная поверхность – пористая.

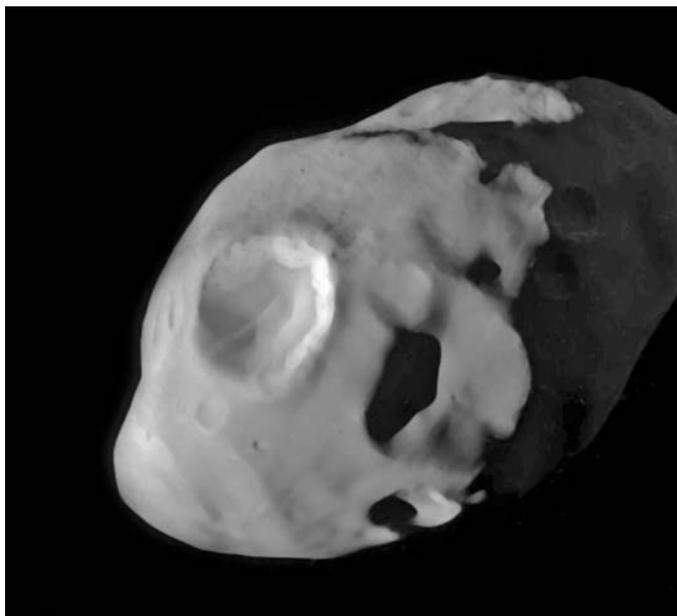
13 июня 2017 г. АМС “Кассини” сделала последние снимки Япета, находясь на расстоянии приблизительно в 2,6 млн км от спутника и совершая свои завершающие миссию “нырки” между Сатурном и его кольцами. На них хорошо заметно темное пятно – “регион Кассини”, у полюсов можно увидеть крупные кратеры и странную “борозду” в районе экватора.

В девятый раз станция нырнет в пространство между атмосферой планеты-гиганта и ее кольцами 17 июня 2017 г. Пока станция будет совершать этот виток, она будет пытаться запечатлеть полярные сияния в Северном полушарии Сатурна, проведет изучение химического состава его колец и сфотографирует их “изнутри”.

*Пресс-релизы NASA/JPL,
18, 26 апреля, 3, 31 мая,
6 и 13 июня 2017 г.*



Маленький спутник Атлас (рамер 30 км), имеет неправильную форму. Его поверхность имеет борозды, в центре – холм и впадина, по экватору располагается широкий вал. Яркие точки и штрихи – следы влияния на камеры станции космических лучей и заряженных частиц из магнитосферы Сатурна. Снимок получен 12 апреля 2017 г. АМС “Кассини” с расстояния 11 тыс. км. Фото NASA/JPL.



“Спутник-пастух” кольца F Сатурна Пандора. На ее поверхности заметны два крупных ударных кратера. Снимок получен 18 декабря 2016 г. АМС “Кассини” с расстояния 40,5 тыс. км, разрешение – 240 м. Фото NASA/JPL.