

УДК 621.039.578

## ОЦЕНКА УДЕЛЬНОЙ СТОИМОСТИ ДОСТАВКИ ПОЛЕЗНОГО ГРУЗА С ЗЕМЛИ НА ГЕОСТАЦИОНАРНУЮ ОРБИТУ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЯДЕРНОГО РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ

© 2021 г. В. А. Павшук<sup>1</sup>, А. Н. Писарев<sup>1, \*</sup>, А. Б. Сенявин<sup>1</sup><sup>1</sup>Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, Россия

\*e-mail: a.n.pisarev93@gmail.com

Поступила в редакцию 06.10.2020 г.

После доработки 01.12.2020 г.

Принята к публикации 04.12.2020 г.

Рассмотрен алгоритм оценки удельной стоимости доставки полезного груза (ПГ) с Земли на геостационарную орбиту (ГСО) с помощью ракетносителей (РН) и ядерного ракетного двигателя (ЯРД). Проведено сравнение с применяемыми в настоящее время разгонными блоками (РБ) на основе жидкостных ракетных двигателей (ЖРД). Использование РБ на основе ЯРД с водородом позволяет при сопоставимых затратах на выведение на орбиту и полезного груза снизить удельную стоимость доставки примерно в 2 раза. Определены параметры многоразового РБ на основе ЯРД, использующего в качестве рабочего тела (РТ) воду, которые позволяют обеспечить простоту в эксплуатации и экономическую выгоду по сравнению с РБ на основе ЖРД в 1.2 раза.

*Ключевые слова:* ядерный ракетный двигатель, полезный груз, геостационарная орбита, разгонный блок

DOI: 10.31857/S000233102101012X

### ВВЕДЕНИЕ

В результате увеличения потребной мощности и массы перспективных космических аппаратов (КА), функционирующих на ГСО, геопереходных (ГПО) орбит, орбит для полетов к Луне и Марсу и других энергоемких орбитах, необходимо значительно увеличить эффективность средств межорбитальной транспортировки, осуществляющих выведение КА на энергоемкие рабочие орбиты с опорной орбиты.

В связи с развитием Интернета, мобильной связи, средств позиционирования, мировой рынок космических услуг за последние 10 лет вырос в пять раз и сегодня превышает 500 млрд \$ в год [1]. Общая масса спутников, доставленных на ГСО приблизительно равна 8000 т, в количестве более 1000 штук (США – 578; КНР – 181; Россия – 140; прочие – 522), из них работает менее 500 штук.

Лунные программы СССР и США потребовали 76 пусков на лунную орбиту до 1998 года. Из них в США – 40, СССР – 32, прочие – 4. Общая масса этих КА на низкой опорной орбите (НОО) была 553.7 тонны. В дальний космос с 1958 г. по 2019 г. запущено 244 аппарата. Как видно, потребность в РБ в мире имеется и постоянно возрастает.

Одной из прорывных технологий, предусмотренных стратегией развития космической деятельности России до 2030 года и на дальнейшую перспективу, является разработка космических ядерных энергоустановок и их ключевых элементов. К этому направлению относится создание ЯРД и РБ на их основе [2].

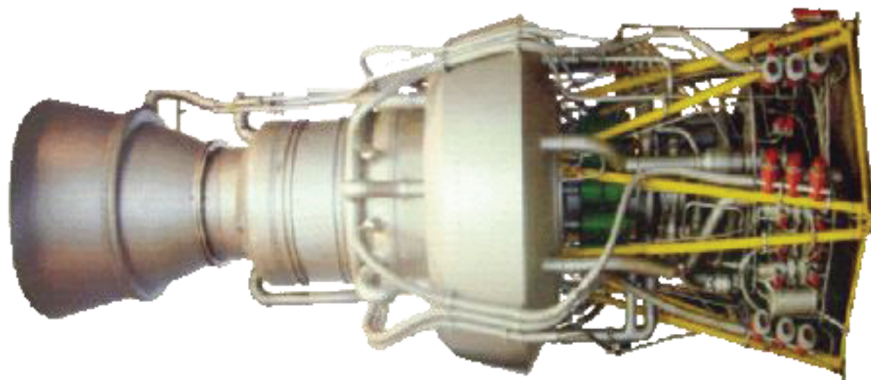


Рис. 1. ЯРД 11Б91 (РД-0410) разработан в КБХА (СССР).

В Советском Союзе по инициативе И.В. Курчатова и С.П. Королёва осуществлялась отработка реакторных узлов ЯРД: ТВС, отражателя, замедлителя, органов регулирования и др. Были разработаны проекты ЯРД мощностью 200 МВт и тягой до 4 тонн (рис. 1) и более. Полученные результаты позволили оценить эффективность применения ЯРД с РТ – водородом, в том числе и по сравнению с самыми перспективными ЖРД на кислородно-водородном рабочем теле.

Целесообразность дальнейшей разработки ЯРД требует создания методики выбора наиболее эффективного варианта для первоочередного создания и внедрения конкретного варианта.

В качестве показателя эффективности могут быть рассмотрены следующие параметры:

- удельная тяга РБ, т.е. отношение тяги к его массе (кг/кг);
- капитальные затраты на создание РБ с ЯРД (млн \$);
- удельный импульс ЯРД (с).

Наиболее информативным и комплексным будет критерий удельной стоимости доставки ПГ на заданную орбиту (\$/кг). Этот критерий ориентирован не только на разработчика и изготовителя, но и на конечного потребителя услуг РБ. Этот критерий дает основание судить о том, выгодно или нет применять РБ с ЯРД по сравнению с традиционными РБ на ЖРД, и какого типа ЯРД будет выгоднее. Критерий удельной стоимости включает в себя и техническую и экономическую составляющую эффективности в применении к конкретным задачам освоения космоса.

В данной статье проведена оценка экономической эффективности транспортной системы, использующей в качестве двигательной установки ядерный ракетный двигатель. Проведена оценка удельной стоимости доставки единицы массы ПГ с поверхности Земли через радиационно-безопасную орбиту (РБО) на целевую орбиту (ГСО). В качестве основы была выбрана методика РКК “Энергия”, изложенная в [3].

## СОСТАВ И СХЕМА РАЗВЕРТЫВАНИЯ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ

В состав космической транспортной системы входят одноразовые тяжелые ракеты-носители, одноразовые разгонные блоки для перевода составляющих с НОО на стартовую РБО высотой около 800 км и РБ на основе ЯРД. В статье рассмотрено два типа ЯРД в зависимости от применяемого РТ, водород и вода, и от продолжительности работы – одноразовые и многоразовые.

Транспортный комплекс представляет собой КА, который на орбите собирается из двух модулей – энергетического (ЭМ) и грузового (ГМ).

В состав ЭМ входят:

– ЯРД, включающий ядерный реактор, систему управления реактором, систему многократного запуска, систему охлаждения реактора;

– приборно-агрегатный отсек (ПАО), где размещаются следующие служебные системы: электроника систем управления движением и навигации, аппаратура и агрегаты системы стыковки, система управления бортовым комплексом, система радиосвязи, телеметрии и т.д.;

– стыковочный узел, необходимый для стыковки модулей на околоземной орбите.

ГМ включает:

– грузовой контейнер с ПГ, представляющий собой отдельный отсек, предназначенный для размещения и транспортировки ПГ, а также отсек для хранения и перевозки РТ на РБО;

– узел разделения ПГ и РБ с ЯРД.

Первым пуском РН выводится на НОО энергетический модуль. Затем он доставляется с помощью РБ на РБО, где проводится отделение РБ от ЭМ. ЭМ функционирует на орбите автономно до стыковки с ГМ.

Вторым пуском грузовые модули с ПГ и с РТ доставляются на РБО посредством тяжелой РН. На РБО производится стыковка модулей, тестирование всех систем, запуск ЯРД, и осуществляется перелет с РБО на ГСО. Здесь ГМ, содержащий ПГ, отделяется от ЭМ, который возвращается обратно на РБО за очередным ГМ с ПГ. Количество перелетов определяется ресурсом ЯРД. Последний рейс осуществляется только в одну сторону, т.е. на целевую орбиту, после чего РБ с ЯРД уводится на орбиту захоронения. В расчетах должен быть учтен дополнительный запас РТ на увод РБ на орбиту захоронения по истечении ресурса ЯРД.

### ОЦЕНОЧНАЯ МОДЕЛЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАТРАТ НА ДОСТАВКУ ПГ НА ГСО

Полные финансовые затраты, связанные с изготовлением, подготовкой к старту и доставкой ПГ на целевую орбиту с помощью транспортной системы с использованием РБ с ЯРД могут быть представлены в виде

$$C = C_{\text{изг}}^{\text{ЭМ}} + n C_{\text{изг}}^{\text{ГМ}} + C_{\text{д}}^{\text{ЭМ}} + n C_{\text{д}}^{\text{ГМ}} + n C_{\text{упр}}^{\text{РБ}} + n C^{\text{T}}, \quad (1)$$

где  $C_{\text{изг}}^{\text{ЭМ}}$  – стоимость изготовления ЭМ;  $C_{\text{изг}}^{\text{ГМ}}$  – стоимость изготовления ГМ;  $C_{\text{д}}^{\text{ЭМ}}$  и  $C_{\text{д}}^{\text{ГМ}}$  – стоимости доставки ЭМ и ГМ соответственно на РБО;  $C_{\text{упр}}^{\text{РБ}}$  – затраты на управление полетом и контроль РБ с ЯРД;  $C^{\text{T}}$  – стоимость топлива;  $n$  – количество рейсов, выполняемых за срок эксплуатации РБ с ЯРД.

В выражении (1) не учитываются затраты на разработку и испытания (НИОКР), капитальные затраты на создание необходимой инфраструктуры производственных и исследовательских комплексов, а также не учитывается стоимость ПГ.

Стоимость доставки ГМ на РБО, затраты на управление РБ в полете и стоимость РТ выражаются через удельные стоимости и технические характеристики РБ с ЯРД:

$$C_{\text{д}}^{\text{ГМ}} = C_{\text{д}}^{\text{РН}} m_{\text{ГМ}}; \quad (2)$$

$$C_{\text{упр}}^{\text{РБ}} = \overline{C_{\text{упр}}^{\text{РБ}}} t_{\text{РБ}}; \quad (3)$$

$$C^{\text{T}} = \overline{C^{\text{T}}} m_{\text{T}}; \quad (4)$$

$$C_{\text{изг}}^{\text{ГМ}} = C_{\text{уд.изг}}^{\text{ГМ}} m_{\text{ГМ}}; \quad (5)$$

**Таблица 1.** Технические параметры

Параметр, размерность	Обозначение	ЯРД с H <sub>2</sub> O	ЯРД с H <sub>2</sub>
Максимальная температура РТ, К	$T$	3000	3000
Масса ЭМ, т	$m_{ЭМ}$	3.4	4.3
Масса ЭМ при возврате, т	$m_{ЭМ}^{обр}$	2.0	2.0
Тепловая мощность реактора, Вт	$N$	$200 \times 10^6$	$200 \times 10^6$
Удельный импульс, м/с	$I_{уд}$	3883	9123
Тяга, кН	$F$	47.18	35.17

где  $C_d^{рн}$  – удельная стоимость выведения ПГ на РБО (зависит от типа РН);  $\overline{C_{упр}^{рб}}$  – удельная стоимость услуг по управлению и контролю РБ с ЯРД в полете;  $\overline{C^T}$  – удельная стоимость РТ;  $m_{ГМ}$ ,  $m_{ЭМ}$ ,  $m_T$  – массы ГМ, ЭМ, РТ соответственно;  $t_{рб}$  – ресурс РБ в годах.

Удельная стоимость доставки единицы массы ПГ с поверхности Земли на орбиту назначения за весь срок эксплуатации РБ с ЯРД, определяется следующим выражением:

$$\overline{C} = \frac{C}{nm_{ПГ}}. \quad (6)$$

Масса ЭМ, исходя из массы аналога ИБ-91 и вспомогательного оборудования [2], не превысит 3.4 тонн (для ЯРД на воде), поэтому выведение ЭМ на РБО возможно с помощью РН грузоподъемностью класса “Союз”, стоимость запуска которой составляет ~48.5 млн \$ [4]. Выведение ГМ осуществляется с помощью РН класса “Ангара-А5”, стоимость запуска которой составляет ~140 млн \$ [4]. Для ЯРД на водороде выведение ЭМ и ГМ осуществляется одним пуском РН класса “Ангара-А5”. Стоимости пусков указанных классов РН известны, поэтому в расчетах может использоваться не удельный показатель  $C_d^{рн}$ , а полная стоимость пуска РН (вне зависимости от массы выводимого груза). В данной работе для конкретизации расчетов принято, что грузоподъемность РН на РБО составляет 85% от грузоподъемности на НОО [3], а подготовка и запуск ЭМ и ГМ осуществляется с космодрома “Восточный”.

Принятые технические и стоимостные параметры для РБ с ЯРД на водороде типа ИБ-91, РБ с ЯРД на воде (неоптимизированный прототип) представлены в табл. 1 и 2.

Стоимость изготовления ЭМ  $C_{изг}^{ЭМ}$  принята 90 млн \$, как в работе [5], согласно проекту № 335 МНТЦ [6]. Удельная стоимость выведения ГМ на РБО рассчитана согласно эмпирической формуле (8), полученной в работе [3].

С помощью описанной модели выполнен анализ удельной стоимости доставки ПГ с Земли на ГСО без учета капитальных затрат и затрат на НИОКР по ЭМ на текущий момент времени. Эти затраты учитывались в стоимости самого ЯРД (с учетом амортизационных отчислений) при расчетах.

В таблице 3 представлены результаты, полученные для одноразового РБ с ЯРД на водороде и воде при принятых исходных данных (табл. 1 и 2) в сравнении с РБ типа “Бриз-М”.

Из приведенных результатов следует, что применение РБ с ЯРД позволяет увеличить массу ПГ при выведении на ГСО в сравнении с РБ на ЖРД. Удельная стоимость доставки ПГ для РБ с ЯРД на водороде примерно в 2 раза меньше, чем у РБ с ЖРД. Несмотря на большую массу, доставляемого ПГ РБ с ЯРД на воде (5921 кг) по сравнению с РБ на ЖРД (4600 кг), удельная стоимость доставки его больше, в связи с большой стоимостью изготовления ЭМ.

**Таблица 2.** Ценовые параметры, экспертные оценки

Параметр, размерность	Обозначение	ЯРД с Н <sub>2</sub> O	ЯРД с Н <sub>2</sub>
Удельная стоимость РТ, млн \$/т	$\overline{C}_{\Gamma}$	$376 \times 10^{-6}$	$560 \times 10^{-5}$
Удельная стоимость услуг по управлению и контролю РБ, млн \$/т	$\overline{C}_{\text{упр}}^{\text{РБ}}$	5	5
Удельная стоимость изготовления ГМ, млн \$/т	$C_{\text{уд.изг}}^{\text{ГМ}}$	$526 \times 10^{-6}$	0.067
Стоимость выведения ЭМ на РБО, млн \$	$C_{\text{д}}^{\text{ЭМ}}$	40	–
Стоимость изготовления ЭМ, млн \$	$C_{\text{изг}}^{\text{ЭМ}}$	90	90
Удельная стоимость выведения ГМ на РБО, млн\$/т	$C_{\text{д}}^{\text{РН}}$	4	4

**Таблица 3.** Сравнение эффективности транспортной системы с РБ на ЖРД и ЯРД

Тип РБ	Удельный импульс, м/с	Тяга, кН	Масса РБ, кг	Масса ПГ на ГСО, кг	Стоимость доставки ПГ на ГСО, \$/кг
РБ типа “Бриз-М”	3227	19.62	2370	4600	30434
ЯРД с Н <sub>2</sub>	9123	35.17	4500	9559	18280
ЯРД с Н <sub>2</sub> O	3883	47.18	3400	5921	36029

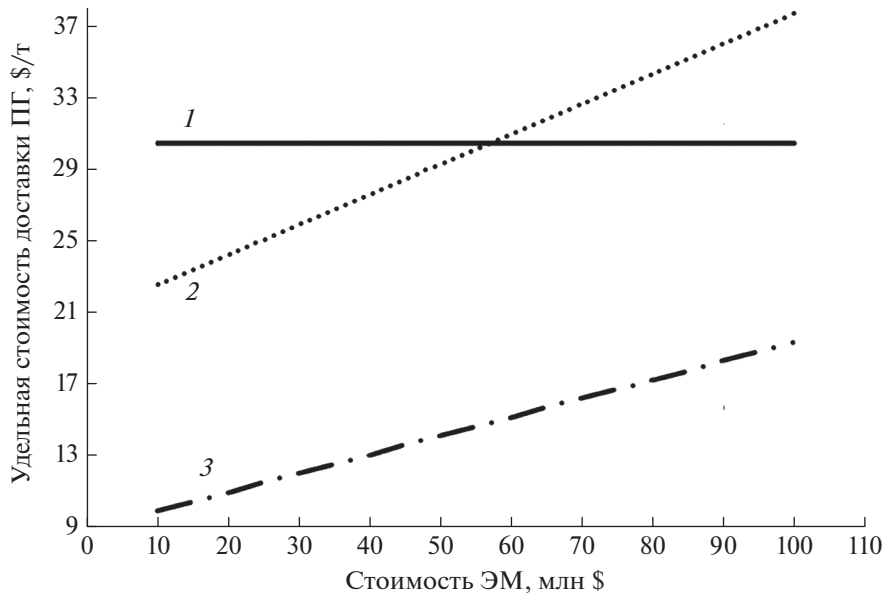
На рисунке 2 показана зависимость удельной стоимости доставки ПГ от стоимости ЭМ для одноразовых РБ с ЯРД на воде и на водороде в сравнении с удельной стоимостью выведения для ЖРД с РБ типа “Бриз-М”.

Как видно, если стоимость одноразового ЯРД на воде будет меньше ~55 млн \$, то он станет экономически выгоднее, чем РБ с ЖРД. Одноразовый ЯРД на водороде, даже при достаточно больших стоимостях ЭМ, остается экономически выгоднее РБ на основе ЖРД. Поэтому дальнейшие расчеты в основном проводились для ЯРД на воде с целью определения его параметров, при которых он стал бы экономически выгоднее РБ с ЖРД.

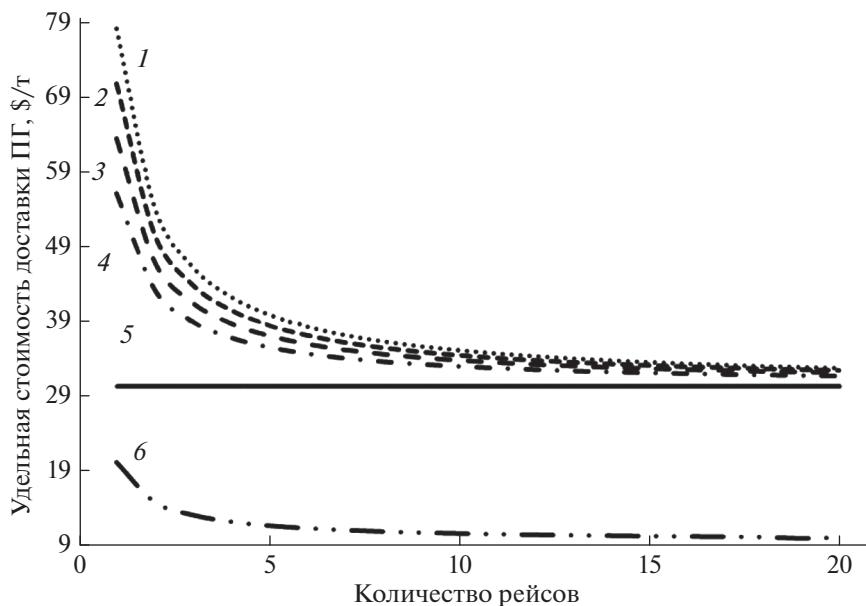
На рисунке 3 представлена зависимость удельной стоимости выведения ПГ от количества рейсов для многоразового РБ с ЯРД на воде, при всех принятых исходных данных из табл. 1 и 2, но при различных стоимостях ЭМ. Для сравнения различных ЯРДов на этом же рисунке (кривая б), представлен многоразовый ЯРД с водородом при стоимости ЭМ 90 млн \$.

Многоразовый РБ с ЯРД на воде становится экономически выгоднее одноразового РБ с ЯРД на воде после совершения определенного количества рейсов в зависимости от стоимости ЭМ. Чем меньше стоимость ЭМ, тем меньше количество рейсов необходимо совершить, чтобы многоразовый РБ стал выгоднее одноразового. Однако выгоды по сравнению с ЖРД не удается добиться даже при устремлении количества рейсов к бесконечности. Это объясняется тем, что масса ПГ доставляемого многоразовым РБ с ЯРД на воде равна 2.728 т, что в 2.2 раза меньше массы ПГ доставляемого тем же одноразовым ЯРДом. Объясняется это тем, что требуется запас топлива на возврат (с ГСО на РБО). Поэтому затраты на выведение и прочие расходы растут быстрее, чем увеличивается суммарная масса ПГ, доставляемого на ГСО многоразовым РБ с ЯРД на воде. Что касается многоразового ЯРД с водородом, то его удельная стоимость, после совершения 5 рейсов, уменьшается в 2 раза по сравнению с таким же одноразовым ЯРДом, а затем практически остается неизменной при увеличении количества рейсов.

Одним из параметров, который весьма влияет на массу доставляемого ПГ и, следовательно, на удельную стоимость доставки ПГ, является масса ЭМ. На рисунке 4 показана зависимость удельной стоимости доставки ПГ от массы ЭМ для одноразового РБ с ЯРД на воде. Как видно, уменьшение сухой массы ЯРД до 1 т или, что тоже са-



**Рис. 2.** Зависимость удельной стоимости доставки ПГ от стоимости ЭМ для: 2 – ЯРД на воде; 3 – ЯРД на водороде; 1 – удельная стоимость доставки ПГ для ЖРД.



**Рис. 3.** Зависимость удельной стоимости доставки ПГ от количества рейсов для многоразового РБ с ЯРД на воде при различных стоимостях ЭМ: 1 – 90 млн \$; 2 – 70 млн \$; 3 – 50 млн \$; 4 – 30 млн \$; 5 – удельная стоимость доставки ПГ для ЖРД; 6 – для многоразового РБ с ЯРД на водороде при стоимости ЭМ 90 млн \$.

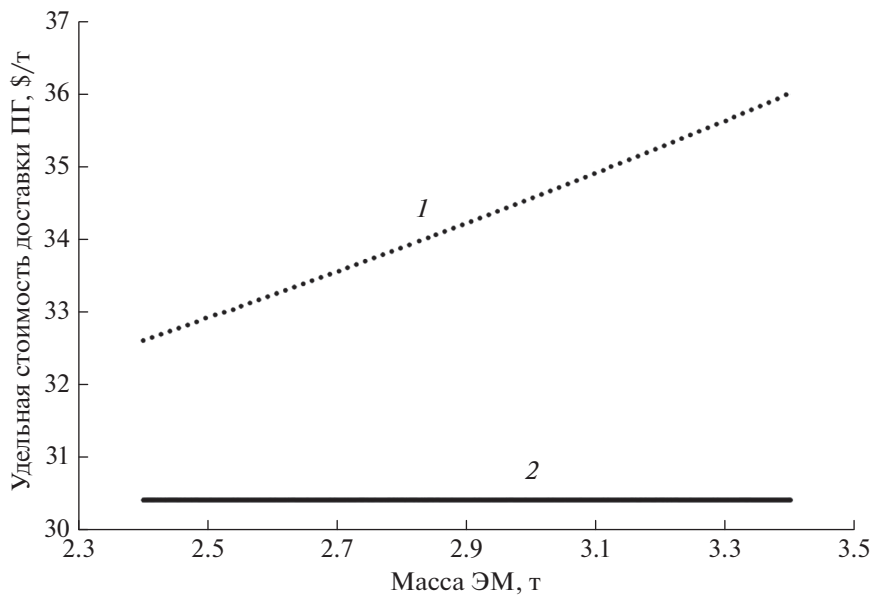


Рис. 4. Зависимость удельной стоимости доставки ПГ от массы ЭМ для одnorазового РБ с ЯРД на воде – 1; 2 – удельная стоимость доставки ПГ для ЖРД.

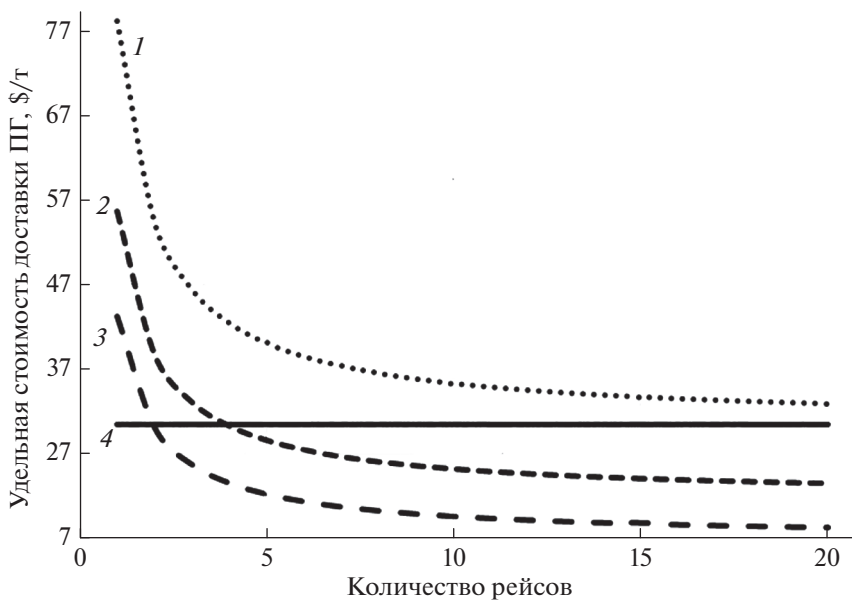


Рис. 5. Зависимость удельной стоимости доставки ПГ от количества рейсов для многоразового РБ с ЯРД на воде при различных массах ЭМ: 1 – 2 т; 2 – 1.5 т; 3 – 1 т; 4 – удельная стоимость доставки ПГ для ЖРД.

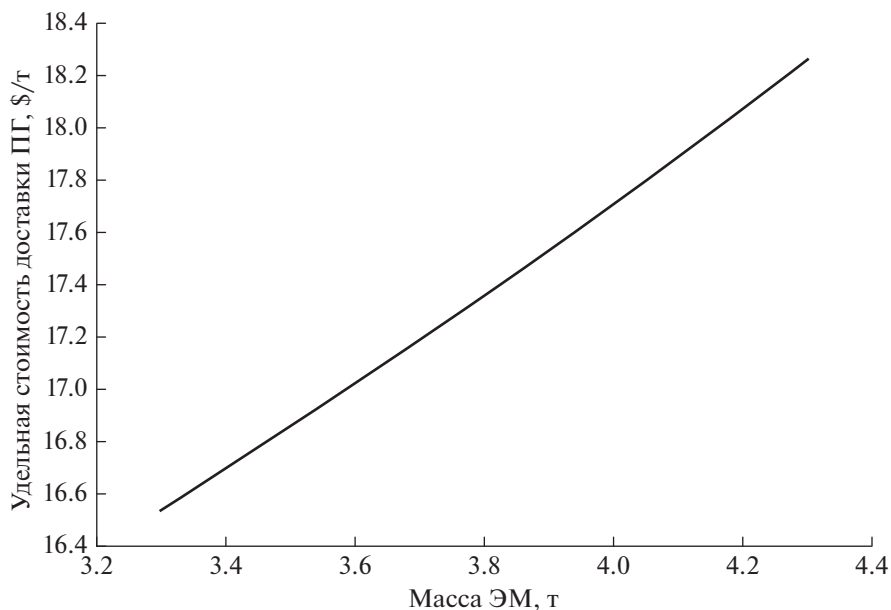


Рис. 6. Зависимость удельной стоимости доставки ПГ от массы ЭМ для одноразового РБ с ЯРД на воде.

мое, массы ЭМ до 2,4 т, не делает одноразовый РБ с ЯРД на воде экономически выгоднее РБ с ЖРД.

Иначе дело обстоит с многоразовым РБ с ЯРД на воде. На рисунке 5 представлена зависимость удельной стоимости доставки ПГ от количества рейсов при всех принятых данных из табл. 1 и 2, но при различных массах ЭМ.

Если сухая масса ЯРД составит  $\sim 1,5$  т (соответственно масса ЭМ  $\sim 2,9$  т), то многоразовый РБ станет экономически выгоднее РБ с ЖРД после осуществления определенного числа рейсов (чем меньше масса ЯРД, тем меньшее количество рейсов необходимо для достижения той же стоимости, что и у ЖРД).

Для одноразового ЯРД с водородом снижение массы ЭМ на 1 т приводит всего лишь к уменьшению удельной стоимости доставки ПГ с 18280 \$/кг до 16500 \$/кг (рис. 6).

Незначительное снижение удельной стоимости доставки ПГ при уменьшении массы ЭМ наблюдается и для многоразового ЯРД с водородом (рис. 7). Увеличение количества рейсов приводит к наибольшему снижению удельной стоимости.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью представленной в статье методики были оценены затраты на доставку ПГ на ГСО различными транспортными системами с различными параметрами для одноразового и многоразового РБ с ЯРД.

Из полученных результатов следует, что применение одноразовых РБ с ЯРД позволяет увеличить массу ПГ при выведении на ГСО в сравнении с РБ на ЖРД. По сравнению с применяемыми РБ на основе ЖРД, одноразовый РБ с ЯРД на водороде позволяет снизить удельную стоимость доставки ПГ почти в 2 раза практически при любой стоимости ЯРД. Использование многоразового ЯРД с водородом позволит еще в 2 раза снизить удельную стоимость при совершении не менее 5 рейсов.



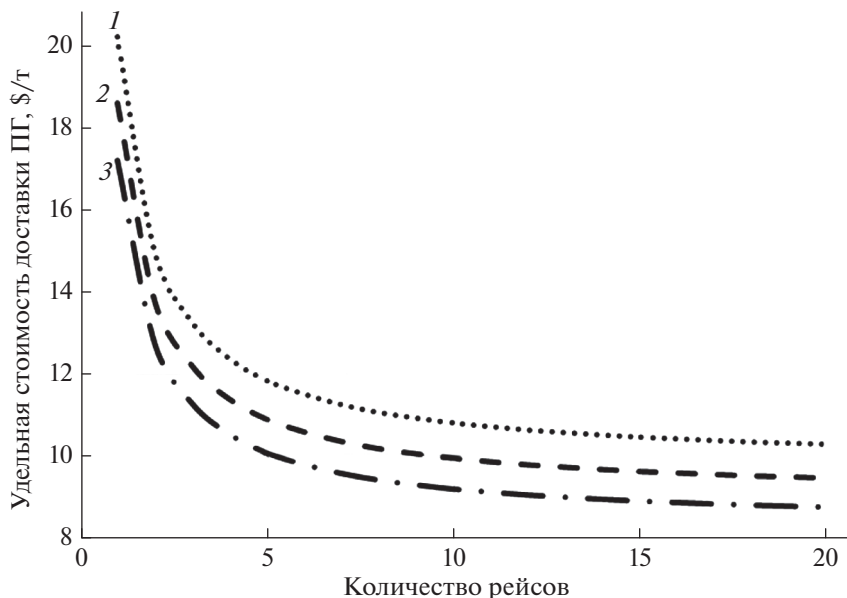


Рис. 7. Зависимость удельной стоимости доставки ПГ от количества рейсов для многоразового РБ с ЯРД на водороде при различных массах ЭМ: 1 – 2 т; 2 – 1.5 т; 3 – 1 т.

Одноразовый РБ с ЯРД на воде по сравнению с РБ на основе ЖРД, становится выгодным при стоимости ЭМ менее 55 млн \$. Масса многоразового ЯРД имеет решающее значение для его экономической эффективности. Поэтому для достижения экономической выгоды РБ с ЯРД на воде по сравнению с РБ на основе ЖРД необходимо снизить стоимость изготовления ЭМ для одноразовых РБ или уменьшить массу ЭМ (массу ЯРД) для многоразовых РБ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Давыдов В.А.* Прогнозирование объемов финансирования космической отрасли и основные макроэкономические показатели развития экономики России // *Оборонная техника*, 2012. № 9. С. 43–49.
2. *Конюхов Г.В., Каминский А.С., Гордеев Э.Г., Конюхов В.Г., Павшук В.А.* Высокотемпературные газоохлаждаемые ядерные реакторы в космической энергетике. Изд. Янус-К, 2017. С. 223.
3. *Косенко А.Б., Синявский В.В.* Оценка удельной стоимости доставки полезного груза с поверхности Земли на орбиту назначения транспортной системой с многоразовым электро-ракетным буксиром // *Известия РАН. Энергетика*. 2011. № 3. С. 53–64.
4. Сравнительная стоимость запуска полезного груза в космос на разных РН. Журнал “Все о космосе”, 2016.
5. *Коротеев А.С., Акимов В.Н., Архангельский Н.И., Кувшинова Е.Ю., Музыченко Е.И.* Ядерные ракетные двигатели: состояние разработки и перспективы применения. “Атомная энергия”, 2018. Т. 124. №. 4. С. 206–211.
6. Концептуальный проект ядерного ракетного двигателя для задач освоения космического пространства. Проект № 335. Т. 1. Концептуальный проект ЯРД для лунного буксира. МНТЦ 335-96, 1997.

---

## Estimation of the Specific Cost of Payload Delivery to a Geostationary Orbit Using a Nuclear Rocket Engine

V. A. Pavshuk<sup>a</sup>, A. N. Pisarev<sup>a, \*</sup>, and A. B. Senyavin<sup>a</sup>

<sup>a</sup>National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

\*e-mail: a.n.pisarev93@gmail.com

An algorithm for estimating the unit cost of delivering a payload from the Earth to a geostationary orbit using launch vehicles and a nuclear rocket engine is considered. A comparison is made with the currently used upper stages based on liquid propellant rocket engines. The use of an upper stage based on a nuclear rocket engine with hydrogen makes it possible, with comparable costs for launching into orbit and of a payload, to reduce the unit cost of delivery by about 2 times. The parameters of a reusable upper stage based on a nuclear rocket engine using water as a working fluid have been determined, which make it possible to ensure ease of operation and economic benefit in comparison with the upper stage based on liquid propellant rocket engines by 1.2 times.

*Keywords:* nuclear rocket engine, payload, geostationary orbit, transfer orbit stage