

УДК 629.7.021

Ю.И. Лазарева¹, С.В. Клименко¹, А.В. Кулик², И.В. Лазарев³

*Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара¹
Национальный центр аэрокосмического образования молодежи
имени А.М. Макарова²
Днепропетровский колледж ракетно-космического машиностроения³*

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДАЛЬНЕГО КОСМОСА

У статті проведено аналіз сучасного стану та перспективи розвитку ракетних двигунів для дослідження космічного простору. В даний час для польотів на інші планети, не кажучи вже про зірок, застосування рідинних і твердопаливних ракетних двигунів стає все більш не вигідним, хоча і було розроблено безліч ракетних двигунів. Таким чином, для досягнення пілотованими екіпажами навіть найближчих планет необхідно розвивати ракетноносії на двигунах, що працюють за принципами, відмінних від хімічних рухових установок. Найбільш перспективними в цьому плані є електричні, лазерні і ядерні реактивні двигуни, а також гібридні ракетні двигуни, такі як твердотільний ядерний ракетний двигун (ЯРД) і електричний реактивний двигун (ЕРД) або газозфазний ЯРД і ЕРД.

Ключові слова: ракета-носіє, космічний апарат, ракетний двигун, рухова установка, ЯРД, ЕРД, гібридний ракетний двигун.

В статье проведен анализ современного состояния и перспективы развития ракетных двигателей для исследования космического пространства. В настоящее время для полетов на другие планеты, не говоря уж о звездах, применение жидкостных и твердотопливных ракетных двигателей становится все более невыгодным, хотя и было разработано множество ракетных двигателей. Таким образом, для достижения пилотируемыми экипажами даже ближайших планет необходимо развивать ракетноносители на двигателях, работающих на принципах, отличных от химических двигательных установок. Наиболее перспективными в этом плане являются электрические, лазерные и ядерные реактивные двигатели, а также гибридные ракетные двигатели, такие как твердотельный ядерный ракетный двигатель (ЯРД) и электрический реактивный двигатель (ЭРД) или газозфазные ЯРД и ЭРД.

Ключевые слова: ракета-носитель, космический аппарат, ракетный двигатель, двигательная установка, ЯРД, ЭРД, гибридный ракетный двигатель.

The article analyzes the current state and development prospects of rocket engines for space exploration. Currently, for flights to other planets, not to mention the stars, the use of liquid-propellant and solid-propellant rocket engines is becoming increasingly unprofitable, although many rocket engines have been developed. Thus, to reach manned planes even the nearest planets, it is necessary to develop rocket launchers on engines operating on principles different from chemical propulsion systems. The most promising in this regard are electric, laser and nuclear rocket engines, as well as hybrid rocket engines such as solid-state nuclear rocket engine (NRE) and electric jet engine (ERE) or gas-phase NRE and ERE.

Keywords: *rocket launcher, spacecraft, rocket engine, nuclear propulsion, propulsion, NRE, ERE, hybrid rocket engine.*

Введение. Двигательные установки на борту транспортного средства предназначены для создания силы тяги или момента импульса. Быстрое развитие ракетно-космической техники в XX веке было обусловлено военно-стратегическими, политическими и, в определенной степени, идеологическими целями и интересами двух сверхдержав – Союза Советских Социалистических Республик (СССР) и Соединенных Штатов Америки (США), а все государственные космические программы являлись продолжением их военных проектов, где главной задачей была необходимость обеспечить обороноспособность и стратегический паритет с вероятным противником. Стоимость создания техники и затраты на эксплуатацию тогда не имели принципиального значения. На создание ракет-носителей и космических аппаратов выделялись колоссальные ресурсы, а 108 минут полета Юрия Гагарина в 1961 году и телетрансляция Нила Армстронга и Базза Олдрина с поверхности Луны в 1969 году были не просто триумфами научно-технической мысли, они еще рассматривались как стратегические победы в битвах «Холодной войны» [1].

В 90-х годах основные политические задачи прошлых лет утратили актуальность, блоковое противостояние сменилось глобализацией, в мире возобладал прагматизм, поэтому большинство космических программ было свернуто или отложено, от масштабных проектов прошлого осталась, как наследие, только международная космическая станция (МКС).

Большинство фундаментальных открытий было сделано еще в первой половине XX века, а в наши дни наука и технологии достигли определенных пределов, к тому же во всем мире снизилась популярность научных знаний. Это послужило причиной застоя в космической сфере, на протяжении последних двух десятилетий.

Но сейчас становится очевидным, что мир приближается к концу очередного технологического цикла, основанного на открытиях прошлого века. Поэтому любая держава, которая будет обладать принципиально новыми перспективными технологиями в момент смены глобального технологического уклада, автоматически обеспечит себе мировое лидерство как минимум на следующие пятьдесят лет. И технологии создания ракетно-космической техники в этом процессе не исключение.

Основным элементом ракетно-космических летательных аппаратов различного назначения является их двигатель. Тип двигателя обуславливает в основном конструкцию летательного аппарата, его габаритные размеры и летные характеристики. От выбранного типа двигателя, вида используемых в нем компонентов топлива, от его конструктивных, эксплуатационных и других характеристик зависит дальность и время полета.

Постановка задачи. Двигатели ракет-носителей, используемые для полетов в космос, со временем, кардинальных изменений не претерпели.

Общий принцип работы – химический, основанный на сгорании или разложении компонентов топлива, остается прежним. Меняются конструкции камер, насосов, способы подачи компонентов, системы управления, виды топлива. Но неизменно одно – используя химическую энергию ракетных двигателей, дальше орбиты Марса или Венеры человечество не улетит. Нужны другие скорости полета космических кораблей и иная более мощная энергетика движения [1].

Необходим серьезный прорыв в разработке реактивных двигателей, способных заменить химические двигатели, чтобы повысить эффективность и сделать дальние космические полеты более реалистичными, т.к. настоящее время едва ли не большая часть массы космических аппаратов, – это топливо.

Аналитический обзор. Исходя из основ реактивного движения – чем выше температура вещества и давление внутри камеры сгорания, и чем ниже молекулярная масса газа, тем выше удельный импульс, а значит и эффективность двигателя [2].

В наше время господствуют термохимические жидкостные и твердотопливные ракетные двигатели, в которых топлива сжигаются в камере сгорания при температурах до $3000^0 \div 4000^0\text{C}$, обеспечивая удельный импульс до 4,5 км/с. Эти двигатели дали возможность выйти человеку в космос – на околоземные орбиты, но для полетов на другие планеты нужны удельные импульсы в десятки километров в секунду [3,4].

Полеты к другим планетам требуют намного большего размера космических кораблей, чем все, что были созданы человечеством ранее, включая модульную МКС. В этих кораблях необходимо обеспечивать и длительное автономное существование экипажей, и определенный запас топлива, и ресурс работы маршевых двигателей, и двигателей для маневров и коррекции орбит. А также предусмотреть доставку космонавтов в специальном посадочном модуле на поверхность иной планеты, и возврат их на основной транспортный корабль, а затем и возвращение экспедиции на Землю. Если опираться только на имеющиеся космические технологии, то минимальная масса обитаемого модуля для пилотируемого полета к Марсу, или к спутникам Юпитера и Сатурна составит примерно 90 тонн, что в 3 раза больше, чем лунные корабли начала 1970-х. Значит, ракеты-носители для их выведения на опорные орбиты для дальнейшего полета к Марсу будут намного превосходить «Сатурн-5» (стартовая масса 2965 тонн) лунного проекта «Аполлон» или советский носитель «Энергия» (стартовая масса 2400 тонн). Потребуется создать на орбите межпланетный комплекс массой до 5000 тонн. Одним словом, полет к планетам Солнечной системы на межпланетном корабле с химическими ракетными двигателями потребует колоссальных запасов топлива и от 8 месяцев до 1 года времени только в одну сторону. Это остается одной из самых серьезных проблем при планировании полетов к другим планетам.

Поиск перспективных направлений развития ракетных двигателей в последние десятилетия привел к разработке электрических реактивных двигателей, лазерных реактивных двигателей, ядерных реактивных двигателей.

Над проектами последними в этом перечне, как наиболее перспективными для больших космических кораблей, в наше время работают ученые и инженеры.

В мире уже были разработаны проекты и стендовые прототипы ядерных ракетных двигателей (ЯРД), и их доработка идет с целью получения мощной двигательной установки. В СССР был разработан РД-0410, а в США NASA уже собиралось ставить в ракету Сатурн-5 двигатель «NERVA». Но с закрытием лунной программы США, прекратилась и разработка двигателя нового типа.

ЯРД – разновидность ракетного двигателя, которая использует энергию деления или синтеза ядер для создания реактивной тяги. Создание двигателей на ядерном синтезе является более отдаленной перспективой, так как, в отличие от реакций распада ядер, где атомные реакторы были созданы почти одновременно с бомбой, термоядерные реакторы до сих пор не передвинулись из "завтра" в "сегодня", и использовать реакции синтеза можно только в стиле проекта пилотируемого ядерно-импульсного космического корабля "Орион" – бросаясь термоядерными бомбами. Традиционный ЯРД в целом представляет собой конструкцию из нагревательной камеры с ядерным реактором как источником тепла, системы подачи рабочего тела и сопла. Рабочее тело (как правило – водород) подаётся из бака в активную зону реактора, где, проходя через нагретые реакцией ядерного распада каналы, разогревается до высоких температур и затем выбрасывается через сопло, создавая реактивную тягу. Схема ядерного ракетного двигателя представлена на рис. 1 [5, 6].

По оценкам ученых ядерный ракетный двигатель может добраться до Плутона за 2 месяца и вернуться обратно за 4 месяца с затратой 75 тонн топлива, до Альфы Центавра за 12 лет, а до Эпсилон Эридана за 24,8 года [6].



Рис. 1. Схема ядерного ракетного двигателя

В 70-80-е годы прошлого века в КБ «Салют», КБ «Химавтоматики» и НПО «Луч» были созданы проекты космических ЯРД РД-0411 и РД-0410 с тягой 40 кН и 35,2 кН соответственно. В течение процесса проектирования были изготовлены реактор, холодный двигатель и стендовый прототип для проведения испытаний [7].

Возможно, что разработки ЯРД опережали свое время. Однако они не были слишком преждевременными. Ведь подготовка пилотируемых полетов к другим планетам длится уже несколько десятилетий, космические корабли и

двигательные установки для них также находятся в постоянном развитии. Ведутся исследования, прорабатываются конструктивные решения.

Со временем, работы по созданию ЯРД привели к появлению трех типов этих двигательных установок, классифицируемых в зависимости от вида топлива для реактора на твердофазные, жидкофазные, газофазные.

Твердофазный вариант двигателя является наиболее законченным. На рис. 2 изображена схема простейшего ЯРД с реактором на твердом ядерном горючем [8].

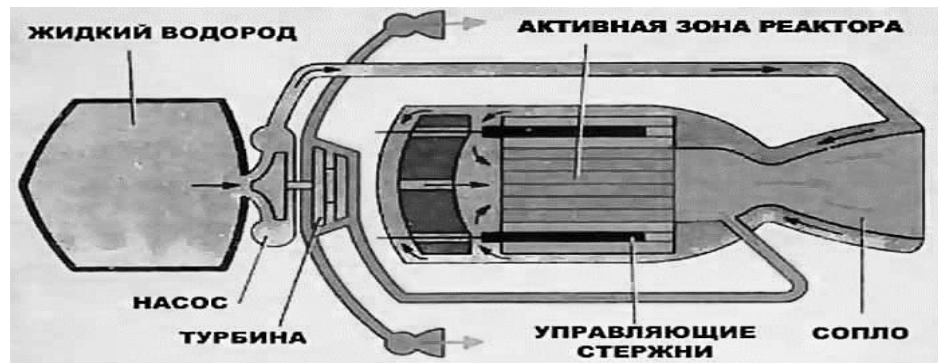


Рис. 2. ЯРД с реактором на твердом ядерном горючем

Рабочее тело располагается во внешнем баке. С помощью насоса оно подается в камеру двигателя, где распыляется с помощью форсунок и вступает в контакт с тепловыделяющим ядерным топливом. Нагреваясь, рабочее тело расширяется и с огромной скоростью вылетает из камеры через сопло.

Жидкофазный ЯРД – ядерное топливо в активной зоне реактора такого двигателя находится в жидком виде. Тяговые параметры таких двигателей выше, чем у твердофазных, за счет более высокой температуры в реакторе [8, 9].

В ядерной физике есть такое понятие как критическая масса. Если делящиеся атомы находятся очень близко друг к другу (например, их обжали давлением от специального взрыва), то получится атомный взрыв – очень много тепла в очень небольшие сроки. Если атомы обжаты не так плотно, но поток новых нейтронов от деления растет, получится тепловой взрыв. Обычный реактор в таких условиях выйдет из строя. Представим, что если взять водный раствор делящегося материала (например, солей урана) и подать их непрерывно в камеру сгорания, обеспечивая там массу больше критической, то получится непрерывно горящая ядерная "свечка", тепло от которой разгоняет прореагировавшее ядерное топливо и воду [9].

Газофазные ЯРД, в которых топливо (например, уран) и рабочее тело находится в газообразном состоянии (в виде плазмы) и удерживается в рабочей зоне электромагнитным полем. Нагретая до десятков тысяч градусов урановая плазма передает тепло рабочему телу (например, водороду), которое, в свою очередь, будучи нагретым до высоких температур и образует реактивную

струю. В СССР был начат проект газофазного ЯРД (РД-600), но он не дошёл даже до стадии макета.

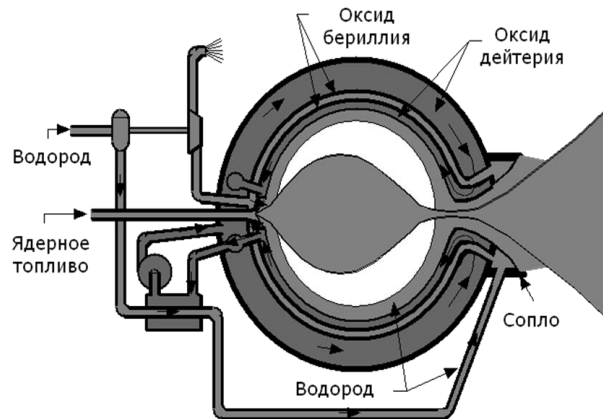


Рис. 3. Схема газофазного ЯРД открытого цикла

В рассмотренных схемах, работающих по «открытой схеме», ядерное топливо будет выбрасываться наружу, что, конечно, снижает КПД. Поэтому была придумана следующая идея, диалектически вернувшаяся к твердофазным ЯРД. Газофазное ядерное топливо удерживается в специальном контейнере. В качестве материала контейнера предложен кварц, потому что при десятках тысяч градусов тепло передается излучением и материал контейнера должен быть прозрачным. Вокруг контейнера протекает рабочее тело. Результатом стала разработка газофазного ЯРД закрытого цикла, или же «ядерная лампочка» представленная на рис.4 [9, 10, 11].

По типу ядерной реакции также различают радиоизотопный ракетный двигатель, термоядерный ракетный двигатель и собственно ядерный двигатель.

Интересным вариантом также является импульсный ЯРД, где в качестве источника энергии предлагается использовать ядерные взрывы (проект «Орион»).

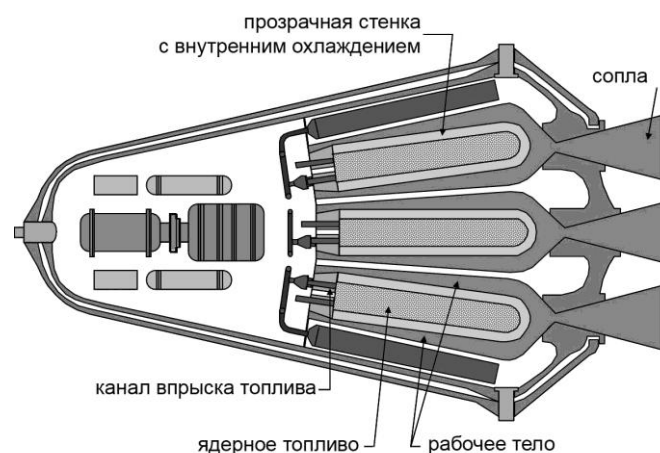


Рис. 4. Схема газофазного ЯРД закрытого цикла

Анализ ЯРД, показал, что преимуществами у такого класса двигателей являются: высокий удельный импульс; значительный энергозапас; компактность двигательной установки; возможность получения очень большой тяги – десятки, сотни и тысячи тонн в вакууме.

Основным недостатком их является высокая радиационная опасность двигательной установки: потоки проникающей радиации (гамма-излучение, нейтроны) при ядерных реакциях; вынос высокорadioактивных соединений урана и его сплавов; истечение радиоактивных газов с рабочим телом. Поэтому запуск ядерного двигателя неприемлем для стартов с поверхности Земли из-за риска радиоактивного загрязнения.

Вначале 1980-х разработчикам двигателей и ученым, причастным к исследованиям использования ядерного топлива для ракет, стало окончательно ясно, что ядерные ракетные двигатели в качестве маршевого двигателя космических аппаратов найти применение в перспективе ближайших десятилетий не сможет. Потому за достижение высоких показателей ядерных двигателей придется дорого заплатить. Нужно было найти решения многих проблем в материаловедении, металлургии, теплотехнике, прочности, радиационной и вибрационной стойкости материалов, испытательной и измерительной технике. Это требовало огромных человеческих, финансовых и временных ресурсов. Так же возникала проблема с обеспечением нужного уровня радиационной безопасности при эксплуатации космических ядерных установок, которую, не удавалось решить.

Но попытки внедрения ядерной энергетики в космические двигательные установки на этом не закончилась. Ученые в разных лабораториях мира продолжали думать про ядерные ракетные двигатели и в 2009 году, начали разрабатывать ядерную электродвигательную установку [12, 13].

Суть космического ядерного электродвигателя примерно такая же, как и на Земле. Энергия ядерной реакции используется для нагрева и работы турбогенератора-компрессора. Ядерная реакция используется для получения электричества, практически точно так же, как и на обычной атомной электростанции. А уже при помощи электричества работают электроракетные двигатели. В данной установке это ионные двигатели высокой мощности. Естественно, что проблем у ядерной установки в космосе гораздо больше, чем на Земле, и самая главная из них – это охлаждение. В обычных условиях для этого используется вода, очень эффективно поглощающая тепло двигателя. В космосе же сделать это нельзя, и ядерным двигателям требуется эффективная система охлаждения – причем тепло от них нужно отводить во внешнее космическое пространство, то есть делать это возможно только в виде излучения. Обычно для этого в космических кораблях используются панельные радиаторы – из металла, с циркулирующей по ним жидкостью теплоносителем. Увы, такие радиаторы, как правило, имеют большой вес и габариты, кроме того, они никак не защищены от попадания метеоритов [11].

В поисках более мощных ракетных двигателей существуют еще исследования в направлении создания: импульсных ядерных двигателей,

движимых отдачей небольших ядерных взрывов, происходящих в двигателе. Излучение и разлетающиеся продукты взрывов должны отражаться от сопел двигателя и создавать тягу космическому кораблю. Термоядерных ракетных двигателей, в которых вместо ядерных микровзрывов должны взрываться небольшие порции тритиевой воды. При таких реакциях, по расчетам ученых, должно получиться в сто раз больше энергии, чем при ядерных микровзрывах.

Выводы. Преимущество, заключающееся в высоком показателе удельного импульса ядерных ракетных двигателей по сравнению с химическими, очевидно. Для твердофазных моделей величина удельного импульса составляет 8-9 км/с, для жидкофазных – 14 км/с, для газофазных – 30 км/с. Однако, когда речь идет о ядерном топливе, никогда не следует забывать о его пагубном воздействии на экологию нашей планеты. Так и в случае с ядерными ракетными двигателями необходимо учитывать загрязнение атмосферы Земли. Поэтому, несмотря на существование действующих моделей ядерных ракетных двигателей, пока ни один из них так и не был задействован вне лабораторий или научных баз. Потенциал таких двигателей высочайший, однако, и риск, связанный с их использованием, тоже немалый, так что пока они существуют только в проектах. До сих пор длительность полета остается одной из самых серьезных проблем при полете к другим планетам.

Таким образом, наиболее перспективным направлением в развитии ракетных двигателей является разработка электрических реактивных двигателей, лазерных реактивных двигателей, ядерных реактивных двигателей, а также гибридных ракетных двигателей, таких как твердотельный ЯРД и ЭРД, или газофазные ЯРД и ЭРД.

Библиографические ссылки

1. Осташев А.И. Испытания ракетно-космической техники - дело моей жизни: события и факты / А.И. Осташев. – Изд. 2-е, испр. и доп. – Королёв, 2005. – 284 с.
2. Феодосьев В.И. Основы техники ракетного полета. М.: Наука, 1979.
3. Рылев Ю. 6000 изобретений XX и XXI веков, изменившие мир. М.: Эксмо. 2017.
4. Космонавтика: Энциклопедия. М.: Сов. Энциклопедия, 1985
5. Электронный ресурс. Режим доступа: <https://thealphacentauri.net/darpa-planiruet-sobrat-na-orbite-obrazec-rakety-s-yadernym-rakety-dvigatелем/>
6. Электронный ресурс. Режим доступа: https://www.nasa.gov/directorates/spacetech/game_changing_development/Nuclear_Thermal_Propulsion_Deep_Space_Exploration
7. Электронный ресурс. Акционерное общество «Конструкторское бюро химавтоматики» (АО КБХА) – один из мировых лидеров в создании жидкостных ракетных двигателей, участник всех отечественных пилотируемых программ освоения космоса. Режим доступа: <http://www.kbkha.ru/?p=8&cat=11&prod=66#>

8. Паневин И.Г., Прищепа В.И. Космические ядерные ракетные двигатели. – М.: Знание, 1978. – 64 с.
9. Коротеев А. С., Конюхов Г. В., Демянко Ю.Г. Ядерные ракетные двигатели. – М.: Норма-Информ, 2001. – 415 с.
10. Демянко Ю. Г., Конюхов Г. В., Коротеев А. С., Кузьмин Е. П., Павельев А. А. Ядерные ракетные двигатели. Москва, 2001.
11. Акимов В.Н., Коротеев А.С., Гафаров А.А. и др. Ядерные ракетные двигатели: воспоминания о будущем // Исследовательский центр имени Келдыша М.В. 1933-2003: 70 лет на передовых рубежах ракетно-космической техники. – М: Машиностроение, 2003. – С. 190-209. – 439 с.
12. NERVA (Nuclear Engine for Rocket Vehicle Application) – David Darling, 2016. Режим доступа: <https://www.daviddarling.info/encyclopedia/N/NERVA.html>
13. Коротеев А.С. Ракетные двигатели и энергетические установки на основе газофазного ядерного реактора.– Москва: «Машиностроение», 2002.

Надійшла до редколегії 15.11.2019 р.