

ОБЗОР МИССИЙ МАНЕВРИРУЮЩИХ НАНОСПУТНИКОВ

Первое в мире успешное применение двигательной установки (ДУ) на борту космического аппарата (КА) произошло в ходе выполнения миссии по фотографированию обратной стороны Луны с помощью автоматической межпланетной станции Луна-3 в 1959 году. Большинство современных КА имеют в своём составе ДУ для поддержания заданной ориентации или изменения параметров орбиты. В настоящее время эта тенденция стала распространяться и на наноспутники (НС). С момента появления первых НС по настоящее время было запущено (или планируется к запуску в 2022 году) 48 миссий НС с ДУ [1]. Количество миссий НС с ДУ по отношению к общему числу запущенных и планируемых к запуску НС по годам представлено на рис. 1.

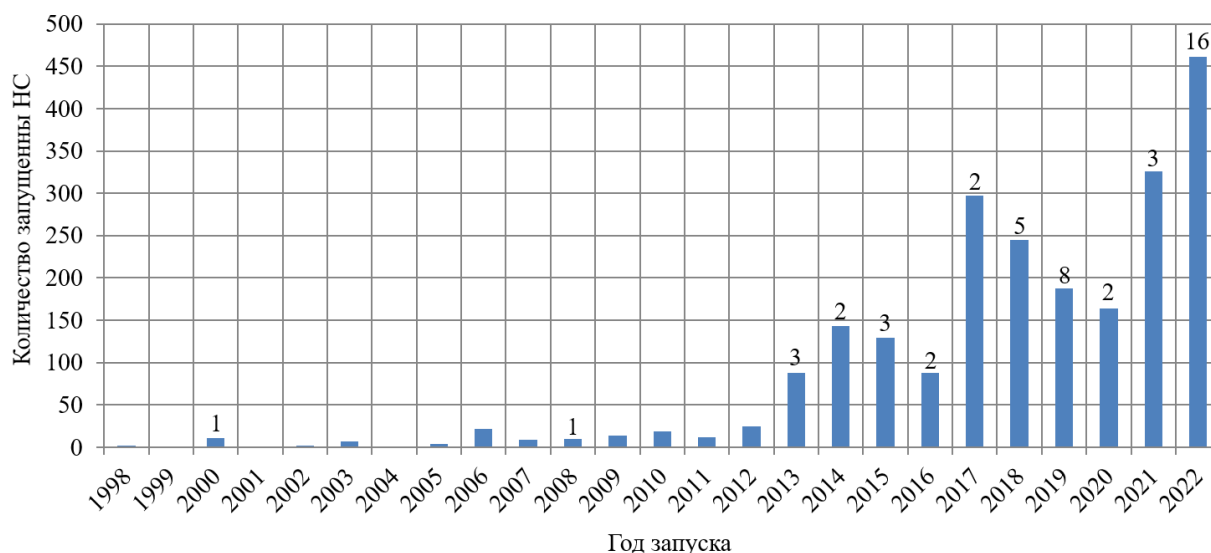


Рис. 1. Статистика запущенных и планируемых к запуску НС

Область задач, которые могут решаться с помощью ДУ, установленных на НС является традиционной для всех классов КА и зависят от целевой задачи миссии, это: поддержание заданного относительного расстояния между НС, поддержание заданной ориентации НС, коррекция и увод с орбиты.

Двигательные установки НС можно классифицировать по типу источника энергии [2]:

- электрореактивные ДУ;
- химические ДУ.
- ДУ на сжатом газе;

На рис.2 приведено распределение ДУ для НС по типу источника энергии.

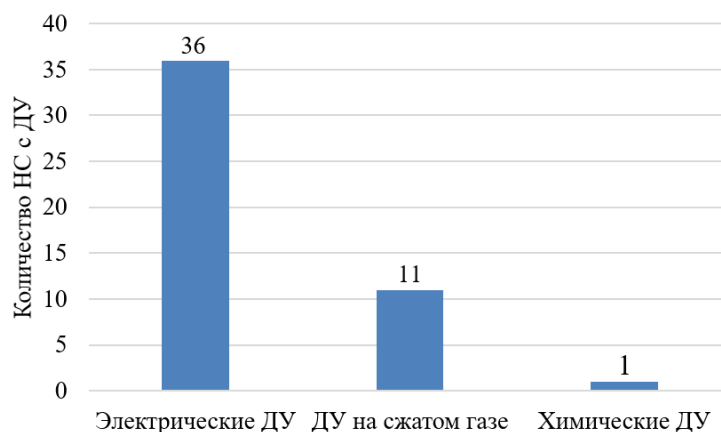


Рис. 2. Распределение ДУ для НС по типу источника энергии

Из рис. 2 видно, что самыми популярными являются электрореактивные двигательные установки (ЭДУ). Это объясняется тем, что они имеют компактный размер, так как рабочее тело занимает сравнительно с другими типами ДУ небольшой объём. При этом ЭДУ обладают большим запасом характеристической скорости (табл.1). Малый интерес к химическим ДУ объясняется тем, что они имеют сложную конструкцию и требуют большего объёма на борту НС.

Краткое описание двигательных установок для наноспутников

В электрореактивной двигательной установке (ЭДУ) применяется один из механизмов по ускорению рабочего тела в соответствии с которым ЭРД делятся на три основных класса: электротермические, электростатические, электромагнитные [3]; все они нашли применение на борту НС. Отличительной особенностью ЭДУ (за исключением электротермических) является высокая скорость истечения рабочего тела из сопла ДУ (до 10^4 м/с) и возможность многократного включения. К недостаткам ЭДУ относится малая тяга (порядка 10^{-3} Н) и большие энергетические затраты при работе ЭДУ. В электротермических ДУ энергия служит для подогрева рабочего тела. Преимуществом этого типа ДУ является простота и минимальные энергетические затраты на создание тяги по сравнению с другими ЭРД. В Самарском университете разрабатывается НС SamSat-M с электротермической ДУ [4]. В электростатических ДУ происходит к ускорение заряженных частиц одного знака с помощью электрического поля. ДУ такого типа была установлена на НС AeroCube-8 [5]. Принцип работы электромагнитных ДУ основан на взаимодействии магнитного поля с электрическим током, текущим поперёк поля. В результате этого взаимодействия возникает сила Ампера, которая разгоняет атомы (ионы) рабочего тела. Примером использования этого типа ДУ являются НС BRICSat-P [6], Lunar IceCube [7].

Принцип работы химических двигательных установок (ХДУ) основан на экзотермической реакции, основными типами которой являются: горение, разложение, рекомбинация. В соответствии с типом используемого топлива ХДУ классифицируют на жидкостные и твёрдотопливные ДУ. В миссиях НС используются только твёрдотопливные двигательные установки (ТДУ). Внутри камеры сгорания помещается твёрдое топливо, которое сгорает в процессе функционирования ТДУ. Продукты горения попадают в сопло, откуда выбрасываются наружу и создают тягу. Достоинствами ТДУ является простота конструкции и малые энергетические затраты для включения ТДУ, к недостаткам относятся: отсутствие контроля процесса горения и одноразовая возможность её запуска. Примером использования ТДУ является миссия НС D-SAT, в которой отработывается в том числе и сведение НС с орбиты [8].

ДУ на сжатом газе является самой простой из всех рассмотренных типов. Сжатый газ подаётся в сопла ДУ, где при обычной температуре в процессе расширения потенциальная энергия сжатого газа превращается в кинетическую энергию реактивной струи. Преимуществом этой ДУ является простота и надёжность, к недостаткам относится монотонно уменьшающийся профиль тяги с течением времени. ДУ на сжатом газе применялись в миссии поддержания относительного расстояния между НС CanX-4 и CanX-5 [9].

В табл. 1 представлены НС с ДУ, которые были рассмотрены выше с указанием их основных характеристик: удельная тяга ($I_{уд}$), тяга (τ), суммарный запас характеристической скорости (ΔV), потребляемая энергия (W), тип топлива.

Таблица 1. Характеристики ДУ НС

Название миссии	Тип ДУ	Область применения ДУ	$I_{уд}$, м/с	τ , мН	ΔV , м/с	W , Вт	Топливо
Lunar IceCube	Электромагнитная	Коррекция орбиты	22000	1,24	2900	75	Йод
AeroCube-8	Электростатическая	Отработка ДУ	11700	0,1	-	1,5	Ионная жидкость
BRICSat-P	Электромагнитная	Поддержание ориентации НС	29400	0,02	300	10	Никель
D-SAT	Твердотопливная	Увод с орбиты	-	-	-	-	Перхлорат аммония
CanX-4, CanX-5	На сжатом газе	Поддержание строя НС	340	40	14	-	Гексафторид серы
SamSat-M	Электротермическая	Коррекция орбиты	1300	9,81	60	0,5-1	Водно-спиртовая жидкость

Заключение

Двигательные установки начинают активно применяться на борту НС и с годами эта тенденция увеличивается. Использование ДУ продлевает срок активного существования НС на орбите и расширяется спектр решаемых задач. Наиболее часто на борту НС устанавливаются ЭДУ. Это объясняется их конструктивными особенностями, которые удачно сочетаются с массогабаритными ограничениями НС.

Библиографический список

1. Nanosats Database [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.nanosats.eu> (дата обращения 08.06.2022).
2. Akshay Reddy Tummala, Atri Dutta. An Overview of Cube-Satellite Propulsion Technologies and Trends // *Aerospace*. – 2017. – Т. 4, Вып. 4. – С. 1-30.
3. Кафедра теории двигателей летательных аппаратов СГАУ [Электронный ресурс]. – Двигательные и энергетические установки космических аппаратов: Введение в специальность. – URL: <http://tdla.ssau.ru/uop.html> (дата обращения 08.06.2022).
4. Белоконов И.В., Ивлиев А.В., Богатырев А.М., Кумарин А.А., Ломака И.А., Симаков С.П. Выбор проектного облика двигательной установки наноспутника // *Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение*. 2019. Т. 18, No 3. С.29-37.
5. SpaceFlight101 [Электронный ресурс]. – AeroCube 8. – URL: <https://spaceflight101.com/spacescraft/aerocube-8/> (дата обращения 08.06.2022).
6. eoPortal Directory [Электронный ресурс]. – BRICSat-P. – URL: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/b/bricsat-p> (дата обращения 08.06.2022).
7. 47th Lunar and Planetary Science Conference (2016) / P.E. Clark [и др.] // *Lunar Ice Cube Mission: Determining Lunar Water Dynamics with a First Generation Deep Space CubeSat*. – С.1043.
8. eoPortal Directory [Электронный ресурс]. – D-SAT. – URL: eoPortal Directory [Электронный ресурс]. – BRICSat-P. – URL: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/b/bricsat-p> (дата обращения 08.06.2022).
9. Jesse K. Eyer, Christopher J. Damaren, Robert E. Zee, Elizabeth Cannon. A formation flying control algorithm for the CanX-4&5 low Earth orbit nanosatellite mission // *Space Technology*. 2007. Т. 27, No 4. С.147-158.