ИЗСЛЕДВАНЕ НА ДИНАМИКАТА НА МЕЖДУНАРОДНАТА КОСМИЧЕСКА СТАНЦИЯ ПРИ НАВЛИЗАНЕ В ПЛЪТНИТЕ СЛОЕВЕ НА АТМОСФЕРАТА

Петър Гецов

Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
e-mail: pgetsovp@mail.bg; getsovp@space.bas.bg

Ключови думи: *Международна космическа станция, финален маньовър, плътни слоеве, атмосфера*

Резюме: *В доклада са разгледани въпросите и сроковете, свързани с прекратяване на съществуването на Международната космическа станция. Определени са параметрите на финалния маньовър при навлизането в плътните слоеве на атмосферата.*

STUDY OF THE DYNAMICS OF THE INTERNATIONAL SPACE STATION UPON ENTRY INTO THE DENSE LAYERS OF THE ATMOSPHERE

Petar Getsov

Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: pgetsovp@mail.bg; getsovp@space.bas.bg

Keywords: *International Space Station, final maneuver, dense layers, atmosphere*

Abstract*: The report examines the issues and timelines related to the termination of the International Space Station. The parameters of the final maneuver upon entering the dense layers of the atmosphere are determined.*

Въведение

Създаването на Международната Космическа Станция (МКС) е много интересен момент от еволюцията на космическите изследвания. През първите години непосредствено след извеждането от орбита през 2001 г. на станцията Мир – руския предшественик на МКС, на борда и се провеждат множество международни проекти. Историята на пилотираните полети до този момент е преди всичко космическа надпревара. Руснаците заложиха на „дългосрочните полети“ с космически станции, а американците – по пътя на „кратките полети“. Това бяха два различни подхода и логика на конкуренцията.

Един от положителните аспекти на МКС е, че се създаде програма на сътрудничество, единствено съществуваща и до днес. МКС е мисия, посветена на човешкото сътрудничество и взаимодействието между хората извън границите на езиците и културата. Повече от 25 години има хора в Космоса, 7 дни в седмицата и 365 дни в годината, което доказва, че може да се намира решение вместо да се воюва. Времето обаче минава и оборудването остарява.

Характеристики на МКС

Международната космическа станция представлява най-големият изкуствен обект в орбита около Земята. Нейната настояща конфигурация, тегло и размери са следните:

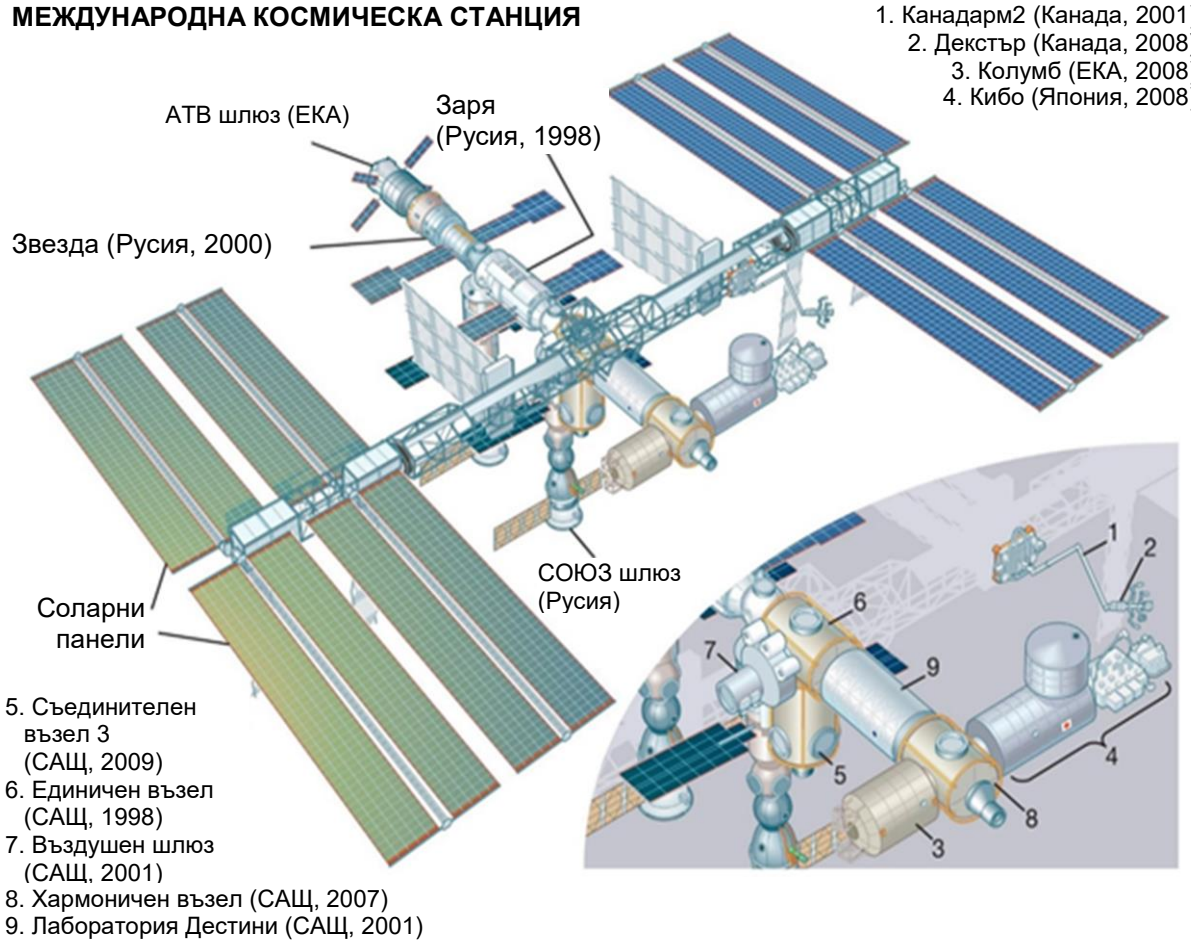
- Физическите мащаби на МКС се равняват приблизително на площта на футболно игрище [1];
- Общо тегло (маса): Около 420 000 kg (420 t) (без теглото на временно скачените транспортни и екипажни кораби);
- Дължина на централната ферма: 109 m;
- Размах на крилата (слънчевите панели): 73 m;

- Херметизиран обем: 1005 m^3;
- Обитаем обем: Около 388 m^3 (свободното пространство, в което екипажът живее и работи).

Orbital Radar

Станцията е разделена на два основни, взаимно свързани сегмента – Руски орбитален сегмент (ROS) и Американски орбитален сегмент (USOS), който интегрира и модулите на Европейската (ESA), Японската (JAXA) и Канадската (CSA) космически агенции. Общо комплексът включва 16 херметизирани модула.

На фиг. 1 е показан пълния състав на структурната схема на основните модули на МКС по компоненти и как отделните херметични цилиндри се напасват в обща система [2].



Фиг. 1. Схема на компонентите на МКС

Жизнен цикъл на Международната Космическа Станция

На борда на този огромен комплекс се поддържа постоянен работен режим на екипаж от 6 до 7 астронавти и космонавти.

Планираният край на експлоатацията на МКС е в края на 2030 г., а самото контролирано извеждане от орбита (деорбитиране) и изгаряне в атмосферата ще се случи през януари 2031 г.

В Конгреса на САЩ се обсъжда вариант за удължаване на срока до 2032 г., за да няма времеви прозорец без работеща станция в орбита преди появата на частните търговски наследници. Въпреки това официалният график към момента остава януари 2031 г. [1]

Основният фактор за края на мисията е умората на метала. Поради непрекъснатото преминаване от сянка към слънчева светлина на всеки 90 min (температурни разлики от +120°C до -120°C), по корпуса се появяват микропукнатини и загуби на херметичност, което прави поддръжката неефективна и опасна спрямо новите частни космически станции.[5, 6]

Тъй като станцията е твърде тежка, за да бъде свалена безопасно само от руските кораби „Прогрес“ (както се планираше първоначално). През лятото на 2024 г. НАСА обяви че е избрала компанията на Илон Мъск да построи модул способен да изтласка МКС към земната

атмосфера, което ще позволи нейното унищожаване след извеждането и от експлоатация през 2031 г. НАСА сключи договор със SpaceX за създаването на U.S. Deorbit Vehicle (USDV). Това ще бъде модифициран кораб Dragon, снабден с голям резервоар и общо 46 двигателя Draco. Той ще се скачи с МКС една-две години преди края и ще бъде основната задвижваща сила за финалния удар. Този модул ще забави МКС и ще позволи да направи прецизно връщане в атмосферата над Тихия океан далеч от континентите.[1]

Станцията ще бъде свалена в почти пълния си настоящ състав (цялата съвкупност от американски, руски, европейски и японски модули, фермовите конструкции и слънчевите панели), с обща маса около 450 t.

Някои по-малки компоненти, оборудване и исторически артефакти ще бъдат прибрани на Земята с товарни кораби преди финала. Освен това, към МКС ще бъде скачен специалният кораб U.S. Deorbit Vehicle (USDV) [1].

За контролирано извеждане на обект с мащабите на МКС не е необходимо да бъде прекратено движението напълно (което би изисквало колосално количество гориво), а само да се снижи перигеят (най-ниската точка на орбитата) дълбоко в плътните слоеве на атмосферата.

В периода (2028–2031 г.) станцията ще прекрати да коригира орбитата си нагоре и под влиянието на земната атмосфера и постепенно ще слезе от 400 km до около 280 km. Последният екипаж ще я напусне при достигане на критична височина. Двигателите на USDV ще създадат мощна серия от спирачни импулси.

Финален маньовър за навлизане на МКС в плътните слоеве на атмосферата

За финалната маневра за навлизане в атмосферата е необходим спирачен импулс ($\triangle v$) от порядъка на 50 до 60 m/s (около 180–215 km/h промяна в скоростта. На пръв поглед това е малко, на фона на орбиталната скорост на МКС от 7.67 km/s или 27 000 km/h, но е напълно достатъчно да "забие" станцията в атмосферата под точен ъгъл [3].

Преходът по елиптичната траектория от точката на импулса (400 km) до първия контакт с атмосферата (100 km) отнема около 33.7 min, а пълното движение до перигея (50 km) е точно полупериодът на елипсата – 44.4 min (44 min и 26 s) [3].

Периодът на обиколка по новата елиптична траектория се определя от Третия закон на Кеплер:

- $T = 2\pi\mu a3$
- Голяма полуос: a = 6 596 km
- Гравитационен параметър: μ = 398 600 km3/s2

$T = 2\pi 398\ 6006\ 5963 = 2\pi 719\ 956.7 \approx 5\ 331.3$ секунди (≈ 88.85 минути).

Маньовърът се извършва в най-високата точка (апогея). Движението от апогея до най-ниската точка (перигея) (50 km) отнема точно половината от пълния период:

T апогей→перигей $2T = 25\ 331.3 \approx 2\ 665.6$ s ≈ 44.43 min (44 min. 26 s.)

За начало на атмосферно навлизане в космонавтиката се приема височина

h_{entry} = 100 km (Линията на Карман).

Времето, за което апаратът преминава последния участък от 100 km до перигея (50 km), при ексцентрицитет $e \approx 0.0265$ е около 10.7 min [4].

От момента на спирачния импулс до първия контакт с плътната атмосфера изтичат:

$t_{навлизане} = 44.43 - 10.7 \approx 33.73$ min (≈ 33 min 44 s)

След този 34-минутен преход аеродинамичното съпротивление бързо забавя апарата и го разрушава в рамките на следващите 5–10 min.

Термичното разпадане и интензивното аеродинамично спиране започват около 42 до 43 min след подаването на спирачния импулс.

При навлизане в атмосферата с първа космическа скорост (около 7.8 km/s или 28 000 km/h), температурата на повърхността на топлинния щит достига между 1 400°C и 1 650°C, а в газовия слой непосредствено пред апарата въздухът се йонизира в плазма с температура над 6 000°C – по-горещо от повърхността на Слънцето.

Често срещано заблуждение е, че апаратът се нагрява от триенето с въздуха. В действителност над 80–90% от топлината се генерира от ударна компресия (адиабатно сгъстяване).

Движейки се с 23 пъти скоростта на звука, апаратът блъска въздушните молекули пред себе си толкова бързо, че те нямат време да се раздалечат.

Въздухът се сгъстява драстично за части от секундата, което води до скок в температурата и превръщането му в светещ плазмен слой.

Ударната вълна (плазмен слой 6000°C – 7000°C) се образува броени сантиметри пред челната част на станцията поради свръхзвуковата компресия.

Челния топлинен щит е подложен на температура от 1400°C до 1650°C. Това е най-натоварената точка от конструкцията. Съвременните материали (като PICA-X при Crew Dragon) издържат на тези температури чрез аблация (постепенно контролирано изгаряне и отнемане на топлината).

Челни ръбове и крила са подложени на температура 1200°C – 1500°C.

Задната страна (подветрена зона) – 300°C – 600°C. Зоната е закрита от челната ударна вълна, затова изпитва значително по-ниски термични натоварвания.

По-голямата част от МКС ще изгори от триенето в атмосферата поради огромната температура, но най-плътните и масивни титанови и стоманени елементи ще паднат в океана.

Алуминият, от който е изградена по-голямата част от корпуса на МКС, се топи при едва 660°C, а стоманата – при около 1 400°C. Затова при навлизане без топлинен щит модулите омекват, разкъсват се от аеродинамичните сили и се изпаряват напълно между 80 km и 40 km височина [5, 6].

Целият процес на прекратяването на съществуването на МКС ще осигури насочването на станцията към т.нар. Точка Немо в Южния Пасифик (Южния Тихи океан) [1], явяващо се най-отдалеченото от суша и хора място на планетата, което ще позволи останките от станцията да не засегнат обекти от корабоплаването и инфраструктурата. Точката Немо се намира на приблизително 2688 km от най-близката суша, а МКС, която се намира на приблизително 400 km над земната повърхност, е по-близо до тази точка, отколкото всеки човек на сушата. Дълбочината на океана в тази област достига приблизително 4000 m.

Изводи

Поради доброто състояние на основните системи има международни споразумения между НАСА, Европейската космическа агенция (ESA), Япония (JAXA) и Канада (CSA) удължиха участието си до 2030 г. Русия (Роскосмос) потвърди участието си поне до 2028 г. [1]

Планираното извеждане на МКС през 2031 г. ще отбележи края сътрудничество без граници в областта на космическите изследвания, която стана неизменна част от всекидневието на земните жители и сфера на националните интерес.

В повечето случаи МКС ще бъде заменена от национални или съюзни станции имащи двойно назначение.

Литература:

1. https://www.nasa.gov/international-space-station
2. Encyclopaedia Britannica / Universal Images Group via Getty Images)
3. Ivanov N.M, A.A.Dimitrievskii, L.N.Lisenko at all, Balistika i navigatsia kosmicheskih apparatov, Moskva, Mashinostroenie, 1986, 296 p.
4. Getsov P, DETERMINATION OF INTERNATIONAL SPACE STATION ORBIT CORRECTION FUEL CONSUMPTION WITH PROGRESS SHIP, Доклади на Българската академия на науките Comptes rendus de l'Acad´emie bulgare des Sciences, 2024,ENGINEERING SCIENCES
5. Peter Getsov, Dimitar Teodosiev, Nikolay Zagorski, Garo Mardirossian, Dimo Zafirov, IMPACT OF SPACECRAFT AND ISS ENGINES ON EXPERIMENTAL SAMPLES OF VARIOUS MATERIALS MOUNTED ON THE OUTER SURFACE OF THE ZVEZDA MODULE, Bulgarian Academy of Sciences. Space Research and Technology Institute, Aerospace Research in Bulgaria. 36, 2024, Sofia
6. Dimitar Teodosiev, Anna Bouzekova-Penkova, Korneli Grigorov, Rumen Nedkov, Peter Tzvetkov, Boyko Tsyntsarski, Angelina Kosateva, Stanislav Klimov, Valery Grushin, STRUCTURAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF GLASS-CARBON COATINGS AFTER AN EXTENDED STAY ON THE INTERNATIONAL SPACE STATION (ISS), Доклади на Българската академия на науките Comptes rendus de l'Acad´emie bulgare des Sciences Tome 74, No 2, 2021
7. https://www.bing.com/search?q=Orbital+Radar&FORM=ANAB01&PC=LCTS