

БАЛІСТИКИ УКРАЇНИ

Величною є картина старту ракети з шахтної установки або з платформи в океані... Спираючись на вогняний стовп, вона так легко набирає висоту, що створюється враження якоїсь простоти того, що відбувається.

Але ця простота оманлива. Вона приховує напружену працю проєктантів, балістиків, фахівців з міцності, аеродинаміків, конструкторів, технологів, виробників, випробувачів, спільними зусиллями яких створюється диво під назвою ракета.



Анатолій Подолінний
начальник комплексу,
ДП "КБ "Південне""



Анатолій Шептун
гол. наук. співр.
ДП "КБ "Південне""



Ірина Різник,
начальник сектора
ДП "КБ "Південне"",
м. Дніпропетровськ

Можливо, диво — це не найточніший термін, яким можна охарактеризувати одне з найскладніших творінь рук людських. Однак, якщо йдеться про всесвітньо відомі розробки конструкторського бюро "Південне" — неперевершену за потужністю стратегічну ракету 15A18M, ракету-носій "Зеніт", використовувану в міжнародній програмі "Морський старт", або про єдиний у світі рухомий бойовий залізничний ракетний комплекс (БЗРК), то інші слова на думку не спадають.

І все-таки старт, який так вражає нашу уяву, є не головним дивом ракетобудування, а всього лише однією з його граней. Інші ж залишаються за кадром, як і тисячі фахівців, роки праці котрих вміщено в передстартові секунди. Але давайте хоч би пунктирно згадаємо тих, хто завжди лишається в тіні.

Дивовижно високу точність, як кажуть "у десятку", забезпечують **балістики і розробники системи управління**. Стійкість польоту при великих швидкісних напорах, дії вітру, непередбаченому коливанні палива в баках і пружних коливаннях корпусу — заслуга **математиків і механіків**. Висока тягоозброєність ракети — успіх **розробників ракетних двигунів**. Надійність чергування в шахті завдяки автоматизованому пошуку несправностей — **результат праці управліців**. Герметичність паливної системи при багаторічній дії агресивних компонентів — підсумок праці **конструкторів, технологів і матеріалознавців**. Контроль систем у польоті, зокрема в щільних шарах атмосфери при 80-100-кратних перевантаженнях, коли ракету огортає непрозора для радіохвиль плазма, — надзвичайно важливе досягнення **телеметристів**. Заслуга проєктантів полягає в об'єднанні зусиль усіх учасників робіт, у виборі найпрогресивніших рішень.

Продовжувати цей список можна ще довго. Але розуміючи, що неможливо досягнути неосяжне, сьогодні ми вирішили розповісти лише про балістиків, точніше, про їхню роль у створенні ракет і участь у майбутніх проєктах.

Упродовж перших тридцяти з гаком років роботами,





Схема виведення КА ракетою-носієм "Зеніт-3SL" за програмою "Морський старт"

пов'язаними з балістикою ракет, космічних апаратів і супутників, що спускаються з орбіти (СА), керував член-кореспондент АН УРСР *М.Ф. Герасюта* (1919–1987). Саме він надовго визначив методологію досліджень і постановку завдань прикладної балістики, що сприяло створенню нових зразків ракетної техніки.

Його учнем і найближчим сподвижником став доктор технічних наук *О.О. Красовський* (1934-1994). Він забезпечував розв'язання завдань вибору траєкторії запуску стратегічних ракет, розробляв програми керування польотом і способи захисту від впливу факторів збурення на їхню дальність. Немало в цьому напрямку зробив і канд. технічних наук *П.М. Лебедєв* (1921-2001), який займався розв'язанням прикладних завдань балістики апаратів при їх польоті в атмосфері. Особливо слід відзначити проведені ним дослідження з динаміки руху СА в атмосфері навколо

центру мас.

З початку 1960-х років автори цієї статті брали участь як виконавці й керівники у роботі з балістичних досліджень і втілювали їх результати на практиці. Навколо цих проблем згуртувалась велика група вчених і провідних спеціалістів-балістиків.

Найяскравіше виявили себе *А.Ф. Бєлий, Є.І. Бушуєв, Л.Т. Грипп, В.О. Іжко, А.І. Ковбаса, Е.П. Компанієць, М.Д. Ладонкін, І.М. Лиска, В.Я. Маштак, О.В. Новиков, Ю.П. Панкратов, К.Е. Татаревський, О.В. Болілий, Г.В. Маштак, А.І. Васильєва, І.О. Ємельянова, В.І. Іванова, Т.П. Самбірська* та багато інших.

Прийнято, що основним завданням балістики ракет є розрахунок траєкторії їхнього польоту. Таке, здавалося б, буденне завдання приховує проблему великої складності. Адже від траєкторії залежать навантаження при проходженні атмосфери і, як наслідок, основні тактично-технічні

характеристики — дальність польоту, навантаження, яке виводять на орбіту, показники точності.

Отже вибір форми траєкторії польоту — це комплексне і надзвичайно складне завдання, розв'язання якого забезпечують фахівці різних організацій. Тому окрім балістиків у роботі беруть участь аеродинаміки, тепловики, проектанти, розробники системи керування, фахівці з міцності, випробувачі й навіть безпосередньо виробники ракет.

З питаннями вибору форми траєкторії польоту тісно пов'язана проблема оцінки впливу факторів збурення на енергетичні характеристики ракети — дальність польоту і вагу корисного навантаження, яке виводиться на задану орбіту. За кількістю факторів збурення (звичайно до декількох десятків!) та їхньою різноманітністю ця проблема належить до числа достатньо складних і відповідальних. Розробка методології впливу кожного фактора збурення на дальність

польоту, оцінка їхнього сумарного впливу, так само як і зведення енергетичних характеристик відповідно до вимог технічної задачі — одне з основних завдань проектування і наступних льотних випробувань.

У балістиці існує ще одна специфічна частина завдань, які стосуються *перехідних процесів*. Вони виявляються на ділянках старту, в моменти розділення ступенів, скидання обтічника і відділення об'єкта запуску. Сили, які діють під час перехідних процесів, є вкрай нестабільними, з низькою точністю визначення (наприклад, на етапі вимкнення ракетних двигунів тяга має невизначеність на рівні 30-50%) і значним розкидом у часі. Щоб врахувати ці впливи, розроблено і застосовуються спеціальні методи розрахунків. На їхній основі видаються рекомендації до конструкції відповідних вузлів ракети, систем розділення і скидання елементів.

На етапі льотних випробувань дуже відповідальною стає підготовка даних на пуск — польотне завдання. Цій роботі передують розробка програм високоточного розрахунку траєкторії з максимально повним урахуванням усіх сил, які діють на ракету. До них можна віднести й аномальне гравітаційне поле Землі, яке впливає на параметри руху на активній та пасивній ділянках польоту. До речі, саме в КБ “Південне” вперше в галузі було проведено дослідження оцінки цього впливу та дано рекомендації щодо врахування гравітаційних аномалій при розрахунку виконавчої траєкторії.

У зв'язку з тим, що кількість даних, включених в польотне завдання, сягає декількох сотень, програмний комплекс розрахунку траєкторії і формування польотного завдання розробляють з урахуванням необхідності його функціонування в автоматизованому режимі (з мінімізацією “ручних” операцій, щоб уникнути помилок через можливість впливу людського фактора на надійність розрахункових даних).

Самостійними питаннями балістики є дослідження руху СА при їхньому польоті в атмосфері. При розрахунку руху центра мас додатково аналізують кутовий рух СА навколо центра мас. За результатами цих підрахунків визначають дію на СА поздовжніх та поперечних перевантажень. Особливістю руху є зміна форми поверхні СА, викликана обгорінням теплозахисного покриття. Відповідно змінюються аеродинамічні характеристики, положення центра мас і, як наслідок, кут атаки. Це помітно ускладнює розрахунок, оскільки вимагає постійного уточнення всіх характеристик СА.

На відміну від ракет, коливання яких навколо центра мас обмежені системою керування, і не перевищують звичайно декілька градусів, під час руху СА в атмосфері його коливання сягають декількох десятків градусів (і навіть 100-150° у верхніх шарах атмосфери). Режими кутового руху СА в атмосфері повністю визначає аеродинамічна дія на нього в умовах обгоріння теплозахисного покриття з винесенням у пограничний шар продуктів випаровування теплозахисту. В аеродинамічних трубах такі умови створити неможливо. Тому розрахункова траєкторія руху СА і дії на неї навантажень потребують підтвердження результатами льотних випробувань.

Бували випадки, коли режими руху СА в атмосфері якісно відрізнялись від розрахункових оцінок. Скажімо, спостерігали зростання амплітуди коливань СА при зануренні його в атмосферу і багатократне (порівняно з розрахунковими даними) збільшення дії поперечних перевантажень. Становище було дуже серйозним. “Півден-маш” набрав обертів і забезпечив виробництво корпусів СА. І тут зупинка з незрозумілими наслідками... Потрібно було провести широкомасштабні дослідження для

уточнення розрахункової моделі кутового руху СА на ділянці інтенсивного знесення теплозахисту, що дозволило зблизити розрахункові й дослідні дані з заспокоєння коливань СА в атмосфері.

Великі труднощі було подолано при формуванні методики розрахунку траєкторії польоту в атмосфері керованого СА, який здійснює глибокий аеродинамічний маневр різної глибини та спрямованості в інтересах проведення наукових досліджень. Вплив особливостей, зумовлених знесенням теплозахисного покриття, на поточні аеродинамічні характеристики і положення центра мас апарата був настільки значним, що призводив до різкої зміни параметрів маневру і, як наслідок, до зміни траєкторії польоту і прогнозованих характеристик обгоріння поверхні, які викликали додаткову зміну його форми, аеродинамічних характеристик і навантажень, траєкторії маневру тощо.

Розрахунок траєкторій керованих в атмосфері СА виявився дуже складним. Стандартні методи його розв'язання “за один прохід” були неприйнятними через низьку точність. Проблему було вирішено введенням у розрахункову модель руху оригінальної методики послідовних наближень за визначенням фактичних поточних взаємозалежних характеристик СА (форми поверхні, аеродинамічних, положення центру мас і параметрів його руху).

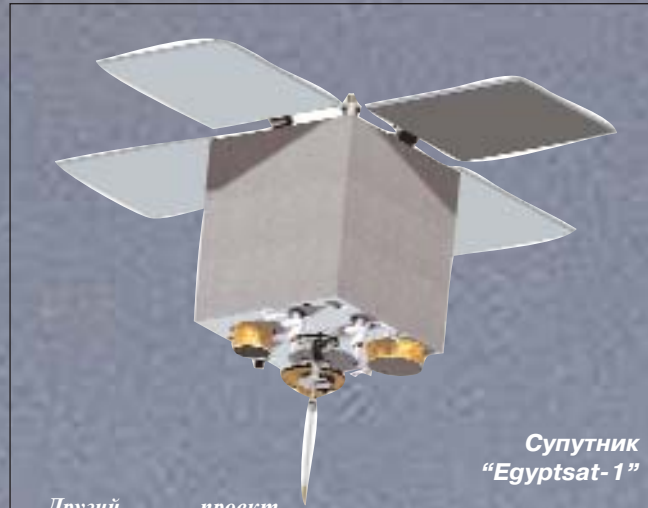
На жаль, складність опису деяких проблем балістики в доступній формі не дозволяє викласти їх у цій статті. І все-таки ризикнемо навести як приклад задачу вибору мінімальної витрати палива на траєкторії останнього ступеня ракети при виведенні групи космічних апаратів на орбіти з близькими періодами обертання, нахилами, ексцентриситетами, положеннями перигею тощо. Ця задача дотепер не має строгого розв'язання через суттєву залежність витрати палива від послідовності реалізації заданих параметрів орбіт (від передісторії руху) і часу. Алгоритм розв'язання найпростішого аналога — геометричної задачі комівояжера відомий, але він непридатний для використання в нашому випадку. Повне перебирання можливих схем руху не є можливим через непомірні затрати часу на проведення розрахунків. Балістики КБ “Південне” розв'язали і цю складну задачу з припустимою для практики точністю.

Два важливі проекти в галузі космічної діяльності було реалізовано балістичними КБ “Південне” та його партнерами. Поява цих проектів була викликана необхідністю провадити Україною самостійну космічну діяльність у галузі керування польотами національних космічних апаратів і аналізу навколосемної космічної обстановки.

Перший проект передбачав вирішення проблеми визначення параметрів орбіт національних супутників. Особливу складність викликала наявність в Україні лише одного сучасного пункту спостереження — в Євпаторії (в Росії до таких робіт звичайно залучають п'ять і більше пунктів спостереження та вимірювання). Додаткові труднощі обумовлювались проведенням вимірювань лише одного навігаційного параметра із шести необхідних для однозначного визначення елементів орбіти. Можливість керування польотом супутників за допомогою одного пункту спостереження виглядала сумнівною. Залучення до вимірювань засобів вимірювань Росії вимагало великих затрат і ставило Україну в залежність від надання послуг іншими країнами.

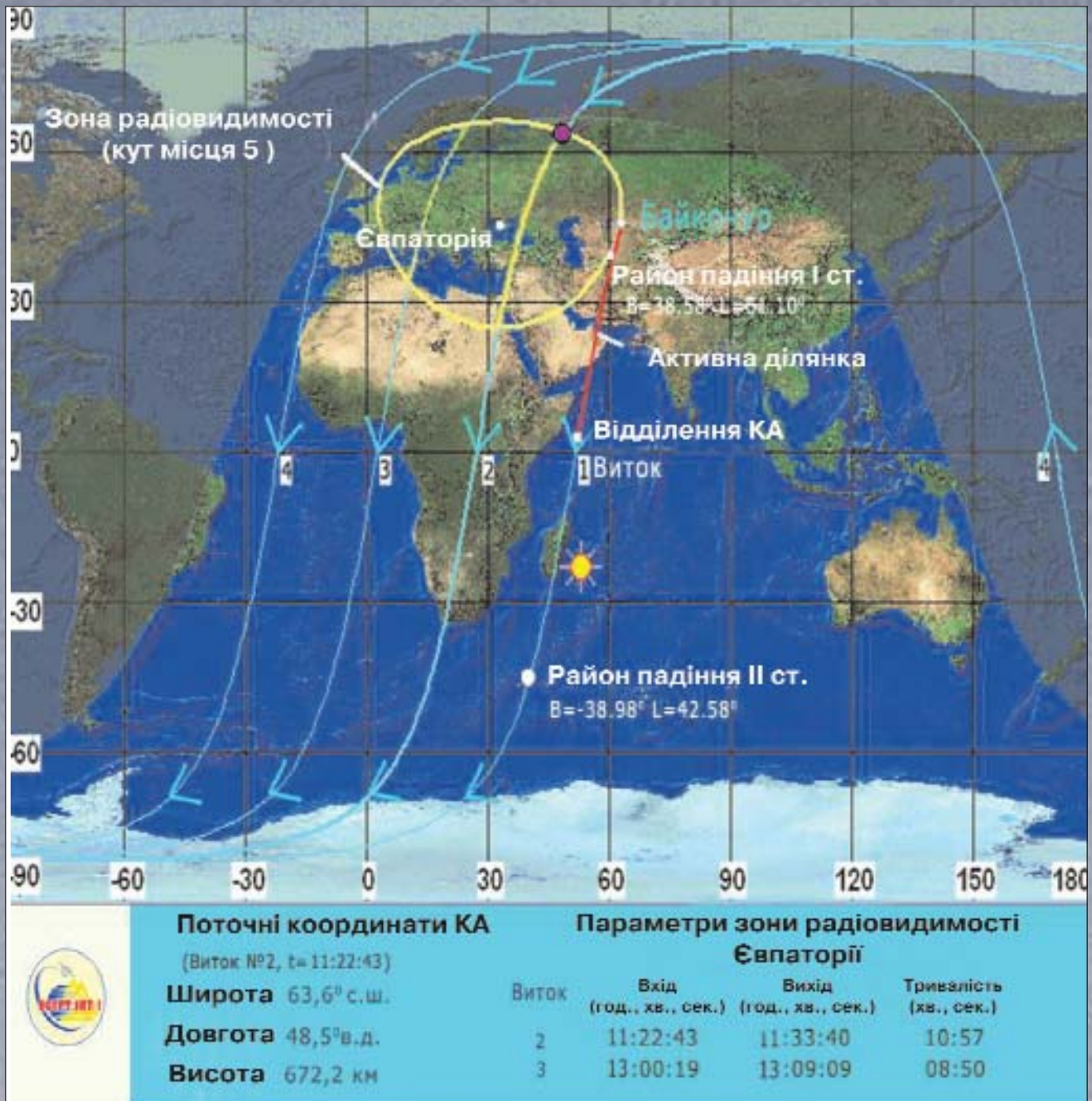
Спільними зусиллями КБ “Південне” та Інституту технічної механіки НАНУ і НКАУ (Дніпропетровськ) завдання було розв'язано.

Було розроблено методологію і створено унікальний автоматизований програмний комплекс балістико-навігаційного забезпечення польоту національних космічних апаратів. За обсягом, сервісними можливостями, автоматизацією, точністю визначення і прогнозування руху супутників на основі вимірювань одного параметра орбіти одним пунктом стеження балістичний програмний комплекс повністю забезпечує потребам практики. Він успішно використовувався при експлуатації трьох національних супутників дистанційного зондування Землі (супутники "Січ-1", "Січ-1М", "Мікросупутник"), в наступний час при експлуатації єгипетського супутника Egyptosat-1. Не дивно, що до цієї технології виявляють інтерес інші країни. Нині розробляють аналогічний комплекс для Єгипту, узгоджуються рамки співробітництва з Казахстаном.



Супутник "Egyptosat-1"

Другий проєкт



Радіовидимість орбіти супутника після виведення на сонячно-синхронну орбіту



присвячено створенню в Україні системи контролю й аналізу космічної обстановки.

Форсоване освоєння космосу зробило навколоземний простір достатньо тісним. Сьогодні на орбітах перебувають десятки тисяч дрібних об'єктів і понад дванадцять тисяч розміром від 10 см і більше. Попри те, що темпи запусків супутників останнім часом дещо знизились, прогнозувати суттєве зменшення кількості об'єктів на навколоземній орбіті передчасно.

Тому будь-яка держава, яка володіє сучасною космічною інфраструктурою і планує подальший її розвиток, повинна володіти оперативною інформацією про обстановку в космічному просторі. Передусім необхідно знати, на яких орбітах розміщені космічні об'єкти і як еволюціонують параметри цих орбіт з часом. Не менш важливою є інформація про те, чи можуть ці об'єкти становити загрозу зіткнення з вітчизняними КА в процесі їх виведення і подальшого функціонування на орбіті. Необхідним є також вирішення завдань з підтвердження факту виведення супутників на задані орбіти, відділення їх від останнього ступеня і відсутність зіткнення їх в процесі орбітального руху при груповому запуску, а в разі позазататних ситуацій — виявлення і супровід орбітальних елементів запуску.

Враховуючи прискіпливу увагу міжнародних організацій до засмічення навколоземного космосу техногенними об'єктами, необхідний постійний моніторинг польоту останніх ступенів ракет-носіїв з метою підтвердження збереження їх цілісності на орбіті.

Знання космічної обстановки надає Україні додаткові можливості для участі у міжнародних проектах і угодах з використання космічного простору.

Контроль і аналіз космічної обстановки дозволяє вирішувати проблеми, пов'язані з національною безпекою України. Багато держав уже мають у своєму розпорядженні потужний арсенал космічних засобів військового призначення. Передбачається подальше зростання їх чисельності, пов'язане з розширенням угруповання розвідувальних супутників, введенням в експлуатацію нових космічних кораблів, розміщенням на орбітах спеціальних засобів протидії. В цих умовах істотно зростає ціна інформації про цільове призначення об'єктів запуску, розміщення їх на орбітах, виконання маневрів, про можливості КА спостерігати за наземними об'єктами та впливати на них.

Особливе значення має вирішення завдання прог-

нозування районів можливого падіння потенційно небезпечних космічних об'єктів, насамперед об'єктів з ядерними енергоустановками та зі значною масою.

Створення державної системи контролю й аналізу космічної обстановки було розпочато 1997 року за Указом Президента України. Головним розробником цієї системи стало КБ "Південне", основними співвиконавцями — НДПІ "Союз" і Харківський військовий університет. У КБ "Південне" безпосередніми виконавцями роботи були визначені підрозділи балістиків. Розробка системи стала новим напрямком роботи як для КБ "Південне", так і для всієї кооперації виконавців. Особливу проблему становила відсутність аналогічних розробок в Україні.

Наприкінці 2005 року було завершено перший дуже важливий етап — введення системи в дослідну експлуатацію з Центром контролю в Євпаторії. Зараз проводять завершальну роботу над введенням її в постійну експлуатацію. Надалі передбачено розвиток системи в напрямку нарощування її функціональних можливостей.

Система вже зараз є стратегічним джерелом інформації про використання космічного простору, дотримання міжнародних угод, а це є гарантом повноцінної участі України в міжнародній космічній діяльності.

Значення створення вітчизняної системи контролю й аналізу космічної обстановки підтверджується й тим, що передові космічні держави або вже мають системи контролю космічного простору (США та Росія), або створюють їх (країни Європейського космічного агентства, Китай, Індія).

Важливим доповненням до двох згаданих проектів є створена балістиками й телеметристами КБ "Південне" і введена в експлуатацію в Національному центрі управління і випробувань космічних засобів (НЦУВ КЗ) у Євпаторії система візуалізації передстартових і польотних операцій при запусках КА на ракетах-носіях "Дніпро", "Циклон" та "Зеніт". Система дозволяє в реальному масштабі часу робити висновки про хід підготовки пуску, виконання програм польоту ракети-носія з використанням даних телеметрії про роботу життєво важливих елементів ракети (двигуна, системи живлення паливом, системи керування польотом, реалізації циклограми виконання операцій тощо). Окрім функцій забезпечення інформацією про підготовку й запуск КА, систему візуалізації використовують з рекламною метою для залучення потенційних замовників запуску космічних апаратів на українських ракетах-носіях.

Введені в експлуатацію в НЦУВ КЗ програмний комплекс балістико-навігаційного забезпечення польоту супутника, система контролю й аналізу космічної обстановки і програмні комплекси візуалізації передстартових і польотних операцій та експлуатації національних супутників забезпечують стійке вирішення всього комплексу завдань щодо запуску й експлуатації КА, аналізу космічної обстановки, попередження про небезпеку падіння фрагментів космічних об'єктів на Землю. Реалізація цих проектів вивела Україну в число тих небагатьох країн, які здійснюють балістичний супровід польоту КА й аналіз космічної обстановки власними силами. Представлені проекти повною мірою відображають передові позиції України в космічній галузі та є її надбанням.