

Методика определения «оптимального» коэффициента лобового сопротивления отделяющихся частей ракет-носителей при движении на пассивном участке траектории, обеспечивающего попадание в заданный эллипс рассеивания

Technique for determining the "optimal" drag coefficient of the separating parts of launch vehicles when moving on a passive section of the trajectory, ensuring a hit in a given scattering ellipse

Кротова / Krotova L.

Людмила Владимировна

(bessenok84@mail.ru)

Государственный испытательный космодром

МО РФ (1 ГИК МО РФ),

научный сотрудник научно-испытательного центра.

г. Мирный Архангельской обл.

Ключевые слова: ракета-носитель – launch vehicle; отделяющиеся части – separating parts; эллипсы рассеивания – scattering ellipses; активный участок траектории – active part of the trajectory; пассивный участок траектории – passive part of the trajectory.

Рассматривается новый подход к определению размеров площадей эллипсов рассеивания отделяющихся частей, определению размеров составляющих фактических эллипсов рассеивания, зависящих от влияния значимых возмущающих факторов на активном и пассивном участках полета, который может быть использован для минимизации площадей фактических эллипсов рассеивания за счет модификации существующих алгоритмов систем управления ракет-носителей. Материалы статьи основываются на информации, полученной путем обработки фактических материалов опытных данных, имеющихся на космодроме Плесецк.

A new approach to determining the size of the areas of the scattering ellipses of the separating parts, determining the size of the components of the actual scattering ellipses, depending on the influence of significant disturbing factors on the active and passive flight sections, which can be used to minimize the areas of the actual scattering ellipses by modifying the existing algorithms of the SU PH, is considered. The materials of the article are based on information obtained by processing the actual materials of experimental data available at the Plesetsk cosmodrome.

Введение

Задача минимизации размеров эллипсов рассеивания отделяющихся частей (ОЧ) ракет-носителей (РН) в современной реальности стоит достаточно остро. При ежегодно возрастающей хозяйственной

деятельности все больше внимания уделяется вопросам обеспечения безопасности и экологии, включающим в себя, помимо прочего, оперативный поиск, а также последующие сбор и утилизацию ОЧ с целью минимизации экологического ущерба.

Существует несколько путей сокращения размеров эллипсов рассеивания ОЧ РН, например, учет изменений массово-аэродинамических и конструктивно-баллистических характеристик ОЧ в результате их совершенствования, выбор оптимальной траектории движения ракеты или выбор момента отделения ОЧ.

Однако, вне зависимости от выбранного способа сокращения площади эллипса рассеивания ОЧ РН, важнейшим фактором для успешного решения этой задачи является уточнение фактического рассеивания точек падения (ТП) ОЧ РН, его зависимости от начальных параметров движения ОЧ, а также возмущающих факторов, оказывающих на них непосредственное воздействие.

Для уточнения фактического рассеивания ТП ОЧ РН была проведена работа с использованием большого количества статистического материала отклонений ТП отделяющихся частей носителей типа «Союз», эксплуатируемых на космодроме «Плесецк». Исследованию была подвергнута единая выборка отклонений ТП боковых блоков (ББ) (как наиболее представительная) в количестве 680 элементов [1].

Проведенный анализ результатов работы показал, что центры группирования фактических точек падения (ФТП) ОЧ РН и размеры их эллипсов рассеивания в значительной степени зависят от сезонного фактора (месяца запуска) и имеют существенный разброс в пределах выделенного района падения (РП). Отклонения координат центров группирования ФТП от координат центра расчетного эллипса и размеры

полуосей фактических эллипсов рассеивания, полученные по результатам статистической обработки в зависимости от месяца запуска, представлены на рисунке 1.

Из анализа рисунка 1 следует, что существует характерная зависимость отклонений точек падения по дальности и по боку от сезонного фактора.

При этом очевидно, что существует целый ряд возмущающих факторов (помимо сезонных), действующих на РН и ОЧ, которые могут существенно отклонять траекторию полета ОЧ, а соответственно, и ТП. В некоторых случаях эти возмущения могут изменить даже характер движения ракеты космического назначения (РКН). Такие случаи возникают при значительных возмущениях начальных условий либо при действии возмущающих сил и моментов, соизмеримых по величине с основными силами и моментами, действующими на РКН в ее невозмущенном движении. Эти факторы можно разделить на следующие группы:

I группа включает в себя возмущающие факторы, влияние которых паритует система управления: отклонение начальных масс ступеней ракеты на момент отделения ОЧ, отклонение секундного расхода топлива, отклонение атмосферного давления от стандартного, отклонение коэффициента лобового сопротивления РН, перекос тяги двигателей i -й ступени в плоскости I-III, II-IV, отклонение точного момента времени отделения ОЧ от РН, воздействие импульса после отделения ОЧ РН.

II группа включает в себя возмущающие факторы, вносимые самой системой управления: отклонения параметров и инструментальные ошибки автомата угловой стабилизации, ошибки систем комплекса командных приборов.

Стоит отметить, что отклонения параметров движения, вызванные возмущениями II группы факторов, система управления парировать практи-

чески не может, поэтому отдельно они не рассматриваются, а будут условно включены вместе с факторами I группы в группу I-II.

После завершения АУТ и отделения ОЧ от РН на них воздействует III группа возмущающих факторов: геофизические факторы, аэродинамические факторы, движение ОЧ вокруг центра масс, изменение массы ОЧ, воздействие характеристик ветрового поля, изменение площади характерного сечения, разрушение ОЧ на фрагменты.

Зависимость фактических отклонений ТП ОЧ РН от возмущающих факторов, действующих на ОЧ при отделении от РН в конце АУТ

Информация об отклонениях начальных параметров движения ОЧ от расчетных значений, полученная по результатам пусков РН в процессе летных испытаний, позволяет уточнить характеристики начальных параметров движения ОЧ и, соответственно, повысить точность прогнозирования координат ФТП.

В качестве одной из составляющих, определяющих фактические размеры эллипсов рассеивания ОЧ РН, были рассмотрены кинематические параметры движения (вернее, их отклонения от расчетных) РН на момент отделения ОЧ от РН в конце АУТ. Исходные данные для определения отклонений кинематических параметров движения ОЧ РН на момент отделения на АУТ получены по результатам статистической обработки внешнетраекторной информации (ВТИ) пусков РН типа «Союз», произведенных с космодрома «Плесецк». При этом в расчетах принималось, что все контролируемые параметры и ошибки их измерения в каждом пуске РКН являются независимыми случайными величинами, подчиненными нормальному закону распределения.

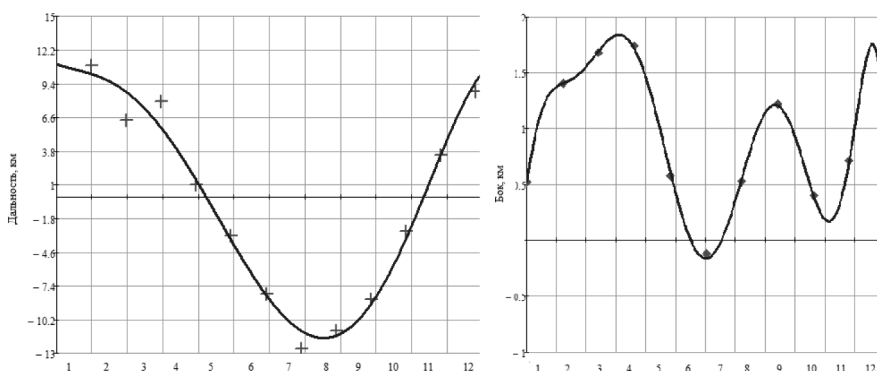


Рис. 1. Отклонения центров группирования ФТП ББ по дальности и по боку от центра расчетного эллипса в зависимости от месяца запуска

Основанием для объединения статистических выборок отклонений полных вариаций кинематических параметров в единую являются следующие факторы:

1. Носители конструктивно относятся к РН типа Р-7А.
2. Программы движения всех РН («Союз-У», «Союз-2»), результаты пусков которых использовались в расчётах, по углам тангажа, рыскания и программам набора характеристической скорости на АУТ имеют максимальное соответствие.

3. Опытные статистические данные были приведены к единым условиям за счет того, что к статистической обработке привлечены не сами координаты положения центра масс РКН, а их отклонения от расчетных значений.

Статистической обработке подвергались выборки с числом пусков не менее тринадцати. Оценка отклонений полных вариаций кинематических параметров движения $\Delta q(t)$ производилась путем анализа разностей действительных параметров движения, полученных по данным ВТИ $q_i^{\text{ВТИ}}(t)$ и их расчетных значений $q_i^{\text{РАСЧ}}(t)$, использующихся в баллистической документации.

$$\Delta q(t) = q_i^{\text{ВТИ}}(t) - q_i^{\text{РАСЧ}}(t) \quad (1)$$

где

$$q_1 = \Delta V_x, q_2 = \Delta V_y, q_3 = \Delta V_z, q_4 = \Delta X, q_5 = \Delta Y, q_6 = \Delta Z$$

При этом принято допущение, что величина погрешности средств измерений НАП была равна 0.

Для оценки статистических данных были построены доверительные интервалы математического ожидания и среднеквадратического отклонения (СКО) величины q_i , соответствующие доверительной вероятности $\beta=0,9973$, как наиболее полно охватывающей всю выборку кинематических параметров. При этом учитывалось, что даже при относительно небольшом числе слагаемых (порядка $10 \div 20$), закон распределения суммы можно приближенно считать нормальным [3].

Исходя из принятого допущения, что величина q_i распределена по нормальному закону, получим математическое ожидание (МО) M_i , дисперсию D и СКО σ полных вариаций кинематических параметров движения:

$$M_i = \frac{1}{n} \sum_1^n q_i, \quad (2)$$

$$D = \frac{1}{n-1} \sum_1^n (q_i - M_i)^2, \quad (3)$$

$$\sigma = \sqrt{D/n}, \quad (4)$$

Доверительный интервал математического ожидания определяется по формуле:

$$I_\beta = (M_i - t_\beta \sigma; M_i + t_\beta \sigma), \quad (5)$$

где t_β – коэффициент доверительной вероятности.

Доверительный интервал для СКО определяется аналогично доверительному интервалу математического ожидания:

$$I_\beta = (D - t_\beta \sigma_D; D + t_\beta \sigma_D), \quad (6)$$

где СКО дисперсии определяется по формуле:

$$\sigma_D = \sqrt{\frac{2}{n-1}} D. \quad (7)$$

Для проверки правильности полученных доверительных интервалов был использован закон распределения Стьюдента, на основании того, что для малых выборок ($n < 30$) замена неизвестного распределения случайной величины нормальным законом может привести к неоправданному сужению доверительного интервала, т.е. к повышению точности оценки.

Сравнительный анализ доверительных интервалов, полученных с использованием нормального закона распределения и распределения Стьюдента, показал, что расхождение минимально, чем подтвердил правильность определения доверительных интервалов. При этом доверительный интервал, рассчитанный с использованием распределения Стьюдента, имеет более широкий диапазон значений, что связано с повышением точности оценки.

Результатом проведенной работы по обработке выборки статистических данных кинематических параметров движения РКН типа «Союз» на моменты времени прохождения функциональных команд стала система допусков, так называемая всепогодная «трубка» траекторий, приведенная в таблицах 1 и 2.

Как уже было сказано ранее, исходными данными для определения отклонений кинематических параметров движения ОЧ РН на АУТ стали выборки отклонений полных вариаций кинематических параметров РКН на момент отделения ОЧ, полученные по результатам обработки ВТИ пусков РН, произведенных с космодрома «Плесецк». При этом учитывалось, что ряд возмущений I и II группы факторов, таких, как отклонения секундного расхода компонентов ракетного топлива, перекося тяги ДУ в плоскостях стабилизации, отклонения атмосферного давления от стандартного, отклонения параметров системы угловой стабилизации (СУС) и инструментальной ошибки автомата угловой стабилизации, ошибки системы комплекса командных приборов учтен в СУ РКН и компенсируется приборами СУС, регулирования кажущейся скорости (РКС) и системой управления расходования топлива (СУРТ). Однако, существуют и те факторы, которые СУ не парирует. Именно эти факторы и будут рассмотрены далее.

Таблица 1

Система допусков для отклонений полных вариаций кинематических параметров движения по нормальному закону распределения

Команда	$\Delta X, \text{м}$	$\Delta Y, \text{м}$	$\Delta Z, \text{м}$	$\Delta V_x, \text{м/с}$	$\Delta V_y, \text{м/с}$	$\Delta V_z, \text{м/с}$
Разделение 1-2	$\pm 995,2$	$\pm 496,9$	$\pm 584,8$	$\pm 14,3$	$\pm 9,7$	± 8
Разделение ГО	$\pm 3905,4$	$\pm 2319,8$	$\pm 905,8$	$\pm 40,5$	$\pm 40,1$	$\pm 8,5$
Разделение 2-3	$\pm 10078,7$	$\pm 5576,7$	$\pm 1077,3$	$\pm 58,8$	$\pm 20,4$	$\pm 6,5$
Разделение ХО	$\pm 6331,1$	$\pm 3782,3$	$\pm 1116,1$	$\pm 32,2$	$\pm 15,8$	$\pm 5,6$
Разделение ГБ	$\pm 36226,9$	$\pm 10558,9$	$\pm 7393,1$	$\pm 15,1$	$\pm 41,5$	± 7

Таблица 2

Система допусков для отклонений полных вариаций кинематических параметров движения по закону распределению Стьюдента

Команда	$\Delta X, \text{м}$	$\Delta Y, \text{м}$	$\Delta Z, \text{м}$	$\Delta V_x, \text{м/с}$	$\Delta V_y, \text{м/с}$	$\Delta V_z, \text{м/с}$
Разделение 1-2	$\pm 1215,2$	$\pm 606,8$	$\pm 714,1$	$\pm 17,5$	$\pm 11,9$	$\pm 9,8$
Разделение ГО	$\pm 4768,9$	$\pm 2832,7$	$\pm 1106,1$	$\pm 49,4$	$\pm 48,9$	$\pm 10,4$
Разделение 2-3	$\pm 12307,1$	$\pm 6809,7$	$\pm 1315,4$	$\pm 71,8$	$\pm 25,0$	$\pm 7,9$
Разделение ХО	$\pm 9657,2$	$\pm 5715,6$	$\pm 1686,6$	$\pm 48,6$	$\pm 23,9$	$\pm 8,5$
Разделение ГБ	$\pm 45822,6$	$\pm 13355,8$	$\pm 9351,4$	$\pm 19,1$	$\pm 52,5$	$\pm 8,8$

Таблица 3

Разброс отклонений времен срабатывания датчиков контроля отделения ОЧ РН типа «Союз»

Наименование, $t_{\text{ДАТ}}$	Расчетный интервал времени срабатывания датчиков контроля отделения ОЧ РН, с	Среднее время срабатывания датчиков контроля отделения ОЧ РН, с
Интервал $t_{\text{ВОД}} - t_{\text{НОШ}}$	0,37-0,60	0,55
Интервал $t_{\text{II-III}} - t_{\text{ОС}}$	1,05-1,09	1,07
Интервал $t_{\text{ГО}} - t_{\text{СО}}$	1,2-1,7	1,45
Интервал $t_{\text{ХО}} - t_{\text{РС}}$	0-0,02	0,019

Таблица 4

Значения отклонений ТП ОЧ РН по дальности и по боку при учете времени срабатывания датчиков контроля отделения ОЧ РН

Наименование, $t_{\text{ДАТ}}$	Среднее время срабатывания датчиков контроля отделения ОЧ РН, с	Среднее значение отклонения по дальности при учете времени срабатывания датчиков, ΔL , км	Среднее значение отклонения по боку при учете времени срабатывания датчиков, ΔZ , км
Интервал $t_{\text{ВОД}} - t_{\text{НОШ}}$	0,55	5,522	-0,082
Интервал $t_{\text{II-III}} - t_{\text{ОС}}$	1,07	7,192	0,213
Интервал $t_{\text{ГО}} - t_{\text{СО}}$	1,45	10,455	0,072
Интервал $t_{\text{ХО}} - t_{\text{РС}}$	0,019	0,163	0,038

Зависимость фактических отклонений ТП ОЧ РН от времени срабатывания датчиков контроля отделения ОЧ РН

В настоящее время при проведении апостериорного анализа пусков РКН используются значения момента времени события (отделения ОЧ), при этом не учитываются данные телеметрической информации с соответствующих датчиков отделения, что дает очень большую ошибку в расчете отклонений ФТП. Для компенсации этой ошибки предлагается уточнять момент фактического отделения ОЧ. Для этого определяется составляющая вектора кинематических параметров движения на момент отделения ОЧ, зависящая от момента времени разделения. В этом случае формула определения фактического времени события примет вид:

$$t_{\text{факт},i,j} = t_{\text{СОБ}i} + \Delta t_{\text{ДАТ},i,j}, \quad (8)$$

где $t_{\text{факт},i,j}$ – фактическое время отделения i -й ОЧ j -го фрагмента ОЧ;

i – индекс ОЧ (ББ, ЦБ, ГО, ХО);

j – порядковый номер фрагмента ОЧ (4 ББ, 1 ЦБ, 2 ГО, 3 ХО);

$t_{\text{СОБ}i}$ – момент времени события для i -й ОЧ;

$t_{\text{ДАТ},i,j}$ – среднее показание n -го датчика j -ого фрагмента для i -й ОЧ по данным телеметрической информации (ТМИ).

С учетом этого вектор кинематических параметров движения РН на момент отделения ОЧ $\bar{X} = \{t, X, Y, Z, V_x, V_y, V_z\}$ будет иметь вид:

$$\bar{X} = \bar{X}^{\text{АВТ}} + \Delta \bar{X}^{\Delta t}, \quad (9)$$

где $X^{\text{АВТ}} = \{t, X^{\text{АВТ}}, Y^{\text{АВТ}}, Z^{\text{АВТ}}, V_x^{\text{АВТ}}, V_y^{\text{АВТ}}, V_z^{\text{АВТ}}\}$ – вектор кинематических параметров движения РКН на момент отделения ОЧ;

$\Delta X^{\Delta t} = \{\Delta t, \Delta X^{\Delta t}, \Delta Y^{\Delta t}, \Delta Z^{\Delta t}, \Delta V_x^{\Delta t}, \Delta V_y^{\Delta t}, \Delta V_z^{\Delta t}\}$ – составляющая вектора, зависящая от фактического момента времени отделения i -й ОЧ;

$$\Delta t = \Delta t_{\text{СОБ}i}.$$

Расчеты по уточнению момента времени отделения ОЧ от РН, в ходе которых были проанализированы статистические данные о фактическом времени срабатывания датчиков, показали, что величина разброса отклонений времени срабатывания датчиков от времени события имеет следующие значения (таблица 3),

где $t_{\text{ВОД}}$ – момент времени выключения основных двигателей для ББ;

$t_{\text{II-III}}$ – момент выдачи команды на отделение блока II ступени для ЦБ;

$t_{\text{ГО}}$ – момент времени прохождения команд на пиросредства отделения для ГО;

$t_{\text{ХО}}$ – момент времени выдачи команды из БЦВК на отделение ХО.

$t_{\text{НОШ}}$ – время срабатывания датчиков определения начала отделения шаровых опор (НОШ), установленных на каждом ББ (по три датчика на каждом блоке – 1а, 2а, 3а);

$t_{\text{ОС}}$ – время срабатывания датчиков раскрытия стыка связи блока II ступени с блоком III ступени (6 датчиков – ОС1-ОС6);

$t_{\text{СО}}$ – время срабатывания датчиков сигнала о сбросе створок ГО (4 датчика – СО11, СО12, СО21, СО22);

$t_{\text{РС}}$ – время срабатывания датчиков раскрытия стыковых панелей ХО (3 датчика – РС1-2, РС2-3, РС3-1).

Анализ показал, что учет среднего фактического значения срабатывания датчиков дает фактические отклонения, приведенные в таблице 4.

Данные отклонения были получены методом конечных разностей при получении соответствующих значений координат ТП ОЧ РН по дальности и по боку, при использовании значений вектора кинематических параметров на момент отделения ОЧ от РН и уточненного вектора, полученного путем внесения соответствующего смещения времени в момент отделения ОЧ. Из проведенного анализа следует, что уточнение момента времени разделения ОЧ с использованием информации ТМИ позволяет получить наиболее достоверные значения кинематических параметров на фактический момент отделения ОЧ, что, в свою очередь, дает возможность уточнения прогнозирования центра группирования фактических точек падения ОЧ и значительно повысит точность прогноза (около 27 % для ББ).

Зависимость фактических отклонений ТП ОЧ РН от импульса после отделения

Также в ходе проведения исследования были выявлены определенные закономерности расположения ФТП «связанных» ОЧ РН (боковых блоков, створок ГО, панелей ХО) относительно друг друга. В связи с этим было сделано предположение, что данные закономерности напрямую связаны с влиянием составляющих вектора импульса разделения, действующего на ОЧ при отделении, направленных по соответствующим осям связанной системы координат. Для учета и последующей компенсации ошибки, вызванной данной составляющей, предлагается уточнять относительные скорости движения центра масс ОЧ при отделении от РН. Для этого необходимо сформировать вектор кинематических параметров, учитывающий импульс разделения:

$$\Delta \bar{V}_{\text{ОЧ}} = \{\Delta V_{\text{ОЧ}x}^I, \Delta V_{\text{ОЧ}y}^I, \Delta V_{\text{ОЧ}z}^I\}, \quad (10)$$

Используя закон сохранения количества движения, можно сформировать условия разделения в виде:

$$m_{PH} \bar{V}_{PH} = m_{OЧ} \bar{V}_{OЧ} + m_{PH-OЧ} \bar{V}_{PH-OЧ}, \quad (11)$$

где \bar{V}_{PH} – вектор кинематических параметров РН в момент отделения ОЧ по данным ВТИ;

m_{PH} – масса РН в момент отделения ОЧ;

$\bar{V}_{OЧ}$ – вектор кинематических параметров ОЧ в момент отделения от РН с учетом импульса разделения;

$m_{OЧ}$ – масса ОЧ в момент отделения;

$\bar{V}_{PH-OЧ}$ – вектор кинематических параметров РН после отделения ОЧ по ВТИ;

$m_{PH-OЧ}$ – масса РН после отделения ОЧ.

Отсюда следует, что:

$$V_{OЧ} = \frac{m_{PH} \bar{V}_{PH} - m_{PH-OЧ} \bar{V}_{PH-OЧ}}{m_{OЧ}}, \quad (12)$$

$$\bar{V}_{OЧ} = \bar{V}_{PH} + \Delta \bar{V}'^I, \quad (13)$$

$\Delta \bar{V}'^I$ – составляющая вектора кинематических параметров ОЧ в момент отделения от РН за счет импульса разделения.

Значения относительных скоростей движения центров масс ОЧ при отделении от РН можно рассчитать с использованием следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} \Delta \bar{V}'^I = \frac{m_{PH} \bar{V}_{PH} - m_{PH-OЧ} \bar{V}_{PH-OЧ} - \bar{V}_{PH}}{m_{OЧ}}, \\ \Delta \bar{V}'^I = \sqrt{(\Delta V'_X)^2 + (\Delta V'_Y)^2 + (\Delta V'_Z)^2} \end{cases}, \quad (14)$$

Как показала практика, направление воздействия составляющей вектора импульса разделения зависит от положения ОЧ. Наиболее наглядным примером является I ступень РН типа «Союз».

В процессе отделения I ступени РН типа «Союз» в «пакете» на все ББ в ССК действует составляющая вектора импульса разделения по оси ОХ, на блоки «Б» и «Г» действует составляющая вектора импульса разделения по оси ОУ, на блоки «В» и «Д» действует составляющая вектора импульса разделения по оси ОZ. Направление импульса определяет «отставание» блоков «В» и «Д» от «Б» и «Г» по дальности, а также больший «разлет» по направлению блоков «В» и «Д» относительно блоков «Б» и «Г», что дает характерную картину ТП ОЧ РН (рис. 3) [1].

Расчетные значения относительных скоростей движения центра масс ББ относительно ЦБ при отделении от РКН в связанной системе координат приведены в таблице 5.

Из таблицы видно, что на отделяющиеся ББ РН в процессе разделения действуют составляющие вектора импульса разделения, направленные по соответствующим осям. При этом на все блоки действует составляющая по оси ОХ, на блоки «Б» и «Г» так же действует составляющая по оси ОУ, а на блоки «В» и «Д» действует составляющая по оси ОZ. Расчеты показали, что учет импульса после отделения при формировании вектора начальных условий на момент отделения ОЧ повысит точность прогноза координат ТП на ~15 % (около 3 км по дальности). С учетом всего вышеизложенного, для наиболее точного прогнозирования ТП послепусковое определение полных вариаций кинематических параметров движения ОЧ РН на момент отделения (помимо уже учтенных в СУ РН возмущающих факторов), должно учитывать отклонения, обусловленные следующими возмущениями:

- разбросом момента времени разделения;
- влиянием импульса после отделения ОЧ РН.

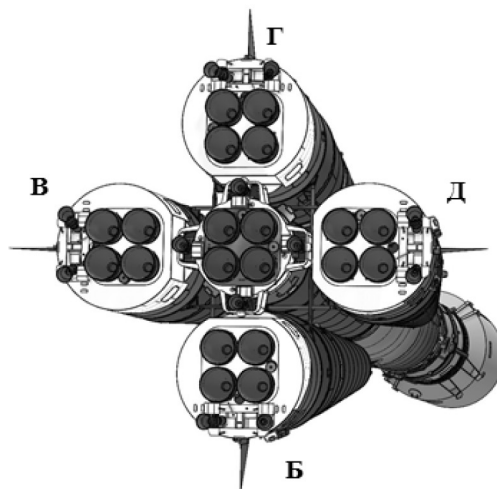


Рис. 2. Взаимное расположение в «пакете» ББ РКН типа «Союз»

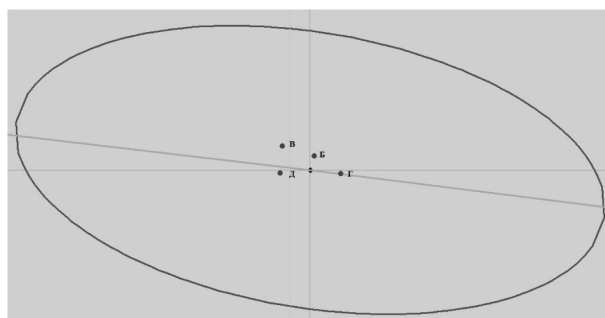


Рис. 3. Характерное расположение ТП ББ РН «Союз-2» (пуск 16.03.2020 года)

Таблица 5

Расчетные значения относительных скоростей движения центра масс боковых блоков относительно центрального блока при отделении от РКН «Союз-2»

Боковой блок	ΔV_X^I , м/с	ΔV_Y^I , м/с	ΔV_Z^I , м/с
Б	- 6 ($\pm 0,015$)	- 6 ($\pm 0,151$)	0 ($\pm 0,1555$)
В	-6 ($\pm 0,015$)	0 ($\pm 0,1555$)	-6 ($\pm 0,151$)
Г	-6($\pm 0,015$)	6 ($\pm 0,151$)	0 ($\pm 0,1555$)
Д	-6 ($\pm 0,015$)	0 ($\pm 0,1555$)	6 ($\pm 0,151$)

Таблица 6

Размеры «эллипсов АУТ»

Месяц	Отклонения от центра фактического эллипса рассеивания			
	ΔL_{MAX}	ΔZ_{MAX}	ΔL_{MIN}	ΔZ_{MIN}
январь	6,79	0,975	-3,853	-2,642
февраль	2,52	0,406	-3,662	-2,222
март	2,49	0,668	-2,798	-4,6
апрель	3,53	-1,7	-1,95	-2,887
май	3,78	-1,12	-3,757	-2,806
июнь	2,95	-0,22	-2,819	-1,37
июль	2,36	1,039	-2,318	-1,86
август	2,28	0,316	-2,636	-1,439
сентябрь	3,24	0,724	-4,21	-2,96
октябрь	3,95	0,562	-3,617	-2,891
ноябрь	2,35	-0,52	-2,343	-1,883
декабрь	6,24	-0,07	-4,785	-2,104

При этом вектор кинематических параметров движения ОЧ на момент отделения в конце АУТ примет вид:

$$\bar{X}_{\text{СУМ}}^{\text{АУТ}} = \{t + \Delta t, X_{\text{СУМ}}^{\text{АУТ}}, Y_{\text{СУМ}}^{\text{АУТ}}, Z_{\text{СУМ}}^{\text{АУТ}}, V_{X_{\text{СУМ}}}^{\text{АУТ}}, V_{Y_{\text{СУМ}}}^{\text{АУТ}}, V_{Z_{\text{СУМ}}}^{\text{АУТ}}\}, \quad (15)$$

где

$$X_{\text{СУМ}}^{\text{АУТ}} = X^{\text{АУТ}} + \Delta X^{\Delta t}, \quad (16)$$

$$Y_{\text{СУМ}}^{\text{АУТ}} = Y^{\text{АУТ}} + \Delta Y^{\Delta t}, \quad (17)$$

$$Z_{\text{СУМ}}^{\text{АУТ}} = Z^{\text{АУТ}} + \Delta Z^{\Delta t}, \quad (18)$$

$$V_{X_{\text{СУМ}}}^{\text{АУТ}} = V_X^{\text{АУТ}} + \Delta V_X^{\Delta t} + \Delta V_X^I, \quad (19)$$

$$V_{Y_{\text{СУМ}}}^{\text{АУТ}} = V_Y^{\text{АУТ}} + \Delta V_Y^{\Delta t} + \Delta V_Y^I, \quad (20)$$

$$V_{Z_{\text{СУМ}}}^{\text{АУТ}} = V_Z^{\text{АУТ}} + \Delta V_Z^{\Delta t} + \Delta V_Z^I, \quad (21)$$

где $X^{\text{АУТ}}, Y^{\text{АУТ}}, Z^{\text{АУТ}}, V_X^{\text{АУТ}}, V_Y^{\text{АУТ}}, V_Z^{\text{АУТ}}$ – вектор кинематических параметров движения РКН на момент отделения ОЧ;

$\Delta X^{\Delta t}, \Delta Y^{\Delta t}, \Delta Z^{\Delta t}, \Delta V_X^{\Delta t}, \Delta V_Y^{\Delta t}, \Delta V_Z^{\Delta t}$ – отклонения составляющей вектора, зависящие от фактического момента времени отделения i -й ОЧ;

$\Delta V_X^I, \Delta V_Y^I, \Delta V_Z^I$ – отклонения составляющей вектора, зависящие от влияния импульса после отделения ОЧ РН.

Апостериорное определение полных вариаций кинематических параметров движения ОЧ РН на момент отделения с учетом вышеперечисленных возмущений проводилось посезонно методом конечных разностей, с помощью которого отклонения параметров движения определялись как разность значений параметров возмущенного и невозмущенного движения ракеты. Так же, с учетом проведенных ранее исследований, при расчетах учитывалась зависимость положения центров группирования ФТП ОЧ РН и размеров их эллипсов рассеивания от сезонного

фактора (месяца запуска). Результаты статистической обработки объединенной выборки полных вариаций кинематических параметров на момент отделения ББ (как наиболее представительной) РКН типа «Союз» с учетом фактического времени отделения ступени, импульса после отделения ступени, сезонного фактора использовалось для наиболее точного определения размеров эллипсов рассеивания, обусловленных этими возмущениями.

Зависимость фактических отклонений ТП ОЧ РН от возмущающих факторов, действующих на ОЧ РН на ПУТ

Для определения доли влияния групп возмущающих факторов в рассеивание ОЧ РН эллипсы рассеивания ФТП ОЧ РН были условно разделены на две составляющие:

- эллипс рассеивания, обусловленный возмущениями I, II группы («эллипс АУТ»);
- эллипс рассеивания, обусловленный возмущениями III группы («эллипс ПУТ»).

Размеры полуосей фактических эллипсов рассеивания, обусловленных возмущениями I, II группы были определены с использованием верхних и нижних пределов значений полных вариаций кинематических параметров на момент отделения ББ РКН. Данные расчетов приведены в таблице 6.

Для наибольшей наглядности соотношение размеров фактических эллипсов и «эллипсов АУТ» приведено на рисунке 4 [1].

Далее по известным размерам фактических эллипсов рассеивания и рассчитанных эллипсов рассеивания, обусловленных возмущениями I, II группы («эллипс АУТ»), были определены составляющие фактических эллипсов рассеивания – эллипсы рассеивания, обусловленные возмущениями III группы («эллипс ПУТ»), в соответствии с месяцем запуска. Полученные размеры эллипсов рассеивания, обусловленных возмущениями на ПУТ, представлены в таблице 7.



Рис. 4. Соотношения размеров фактических эллипсов и «эллипсов АУТ»

Таблица 7

Размеры «эллипсов ПУТ»

Месяц	ΔL_{MAX}	ΔZ_{MAX}	ΔL_{MIN}	ΔZ_{MIN}
январь	2,28	8,37	-5,21	-6,71
февраль	10,31	9	-9,17	-7,18
март	11,9	9,06	-11,59	-5,13
апрель	9,82	7,63	-11,4	-3,05
май	12,52	9,01	-12,54	-5,09
июнь	13,23	8,47	-13,36	-6,88
июль	13,74	6,32	-13,79	-5,5
август	12,56	5,96	-12,2	-4,84
сентябрь	14,86	7,13	-13,88	-4,9
октябрь	11,49	7,19	-11,83	-4,87
ноябрь	10,66	6,86	-10,67	-4,46
декабрь	7,35	8,74	-8,8	-6,56

Таблица 8

Размеры площадей «эллипсов АУТ и ПУТ» и фактического эллипса рассеивания в зависимости от месяца запуска

Месяц	Январь	Февраль	Ноябрь	Декабрь	Май	Июнь	Июль	Август	Март	Апрель	Сентябрь	Октябрь
$S_{ФТП}$, км ²	266,14	379,14	259,43	369,98	404,39	419,47	372,28	292,72	439,72	248,77	446,54	376,33
$S_{АУТ}$, км ²	30,22	12,77	8,84	18,82	23,2	7,2	10,66	6,78	21,87	19,74	21,54	20,52
$S_{ПУТ}$, км ²	88,66	247,56	189,76	194,04	277,64	320,65	255,49	210,08	261,74	177,92	271,5	220,9

Таблица 9

Процентное соотношение площадей эллипсов рассеивания в зависимости от месяца запуска

Месяц	Январь	Февраль	Ноябрь	Декабрь	Май	Июнь	Июль	Август	Март	Апрель	Сентябрь	Октябрь
Соотношение $S_{ФТП}$ к $S_{РАСЧ}$, %	32,09	45,71	31,28	44,61	48,76	50,58	44,89	35,29	53,02	29,99	53,84	45,37
Соотношение $S_{АУТ}$ к $S_{ФТП}$, %	11,36	3,37	3,41	5,09	5,74	1,72	2,86	2,32	4,97	7,94	4,82	5,45
Соотношение $S_{ПУТ}$ к $S_{ФТП}$, %	33,31	65,29	73,15	52,45	68,66	76,44	68,63	71,77	59,53	71,52	60,8	58,7

Для сравнительной оценки было определено процентное соотношение составляющих «эллипсов АУТ и ПУТ» относительно размеров фактического эллипса рассеивания в соответствии с месяцем запуска (таблицы 8–9), а также их сравнение с размерами расчетного эллипса рассеивания, приведенными в технической документации и составляющими в среднем $\approx 830 \text{ км}^2$.

Анализ таблиц 8–9 показал, что площадь фактического эллипса рассеивания на каждый месяц значительно меньше (в процентном соотношении) расчетного эллипса рассеивания, при этом прослеживается влияние возмущающих факторов на процентное соотношение размеров данных эллипсов относительно фактических.

Было проведено графическое моделирование влияний возмущений с учетом сезонного фактора (рисунки 5–6).

Как видно из рисунка 5, размеры фактических сезонных эллипсов рассеивания значительно меньше расчетного эллипса рассеивания, при этом наибольшее влияние на формирование размеров фактических сезонных эллипсов имеют возмущающие факторы на ПУТ. Это подтверждает анализ процентного соотно-

шения площадей эллипсов рассеивания, зависящих от возмущающих факторов на АУТ и ПУТ, представленного на рисунке 6. Кроме того, из рисунка 5 очевидно существование зависимости размеров эллипсов рассеивания (зависящих от возмущающих факторов на АУТ и ПУТ) от сезонного фактора.

Для большей наглядности оценки влияния составляющих групп возмущающих факторов, воздействующих на ОЧ РН на АУТ и ПУТ, а также визуализации доли их влияния относительно размеров фактического эллипса рассеивания, было проведено моделирование объединения площадей всех «эллипсов АУТ и ПУТ» годового цикла относительно условно выбранного района ББ с условным наименованием «Вашка», как наиболее часто используемого на космодроме Плесецк (рисунок 7) [4].

При этом на рисунке:

- наружный эллипс – площадь РП «Вашка», $S=2502,85 \text{ км}^2$;
- средняя огибающая эллипса – объединенная площадь сезонных «эллипсов ПУТ», $S=828,88 \text{ км}^2$;
- центральная огибающая эллипса – объединенная площадь сезонных «эллипсов АУТ», $S=112,24 \text{ км}^2$.

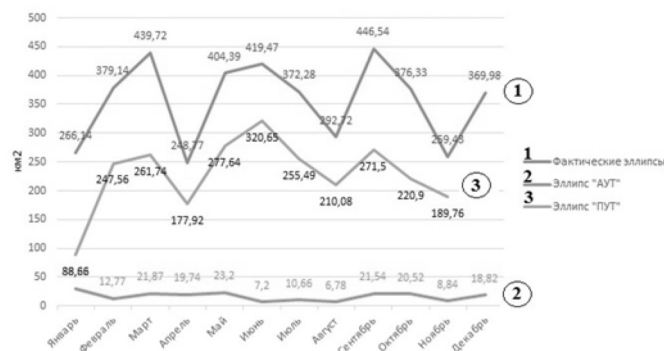


Рис. 5. Соотношение абсолютных значений площадей эллипсов рассеивания в зависимости от возмущающих факторов

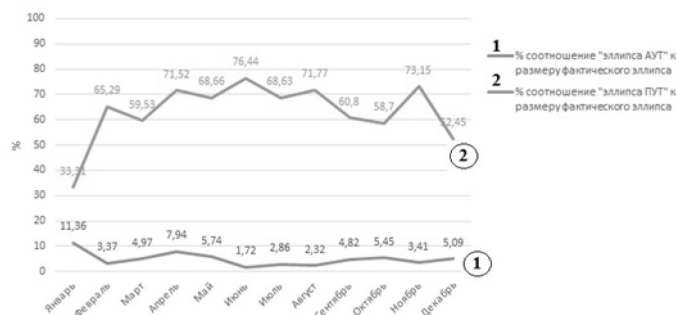


Рис. 6. Процентное соотношение площади эллипсов рассеивания, зависящих от возмущающих факторов на АУТ и ПУТ, к площади фактического эллипса рассеивания

На рисунке 6 наглядно отражены доли влияния возмущающих факторов I, II и III групп. Очевидно, что значительную долю влияния на размеры фактического эллипса рассеивания оказывают возмущения III группы, о чем свидетельствуют размеры «эллипса ПУТ», значительно превышающие размеры «эллипса АУТ».

Стоит отметить, что одновременный учет большого числа возмущающих факторов существенно усложняет правые части уравнений движения на ПУТ. Кроме того, учет некоторых возмущающих факторов, таких как воздействие характеристик ветрового поля, изменение площади характерного сечения и т.д., практически невозможен. Поэтому было решено, что целесообразно перейти к такому коэффициенту, который бы позволил осредненно учитывать все неопределенные возмущающие факторы, оказывающие влияние на движение ОЧ РН на пассивном участке траектории, такие как аэродинамическое сопротивление атмосферы, сложное движение ББ вокруг центра масс, изменение площади характерного сечения (миделя), воздействие характеристик ветрового поля и изменение массы отделяющихся частей на всем участке свободного падения. Этот коэффициент был назван «оптимальным» баллистическим коэффициентом. Его использование при решении системы уравнений движения на ПУТ, позволит определять координаты точки падения ОЧ с минимальными отклонениями от ФТП, т.е. более достоверно.

«Оптимальный» баллистический коэффициент ОЧ рассчитывался по формуле [5,6,7]:

$$S_6^{\text{опт}} = \frac{C_{x\text{опт}} S_M}{2m_{\text{ОЧ}}}, \quad (22)$$

где $C_{x\text{опт}}$ – «оптимальный» коэффициент лобового сопротивления;

S_M – площадь характерного сечения (миделя);

$m_{\text{ОЧ}}$ – масса отделяющейся части.

Из формулы следует, что одними из основных составляющих при расчете «оптимального» балли-

стического коэффициента являются масса ОЧ на момент отделения и коэффициент лобового сопротивления. Учет разброса массы ОЧ на момент отделения возможен при наборе достаточной выборки статистических данных по данному параметру. При этом стоит учитывать, что масса ОЧ на момент отделения состоит из «сухой» массы (массы конструкции) и массы остатков КРТ, в значительной степени зависящей от сезонного фактора. Статистическая обработка значений «сухих» масс ББ РН типа «Союз» показала незначительный разброс «сухой» массы в пределах до 110 кг в диапазоне от 3750 до 3860 кг, что дает изменение отклонения по дальности в пределах полукилометра. Более интересная картина была получена при обработке статистического материала по остаткам КРТ в ББ РН типа «Союз». Эти данные приведены на графиках рисунка 8.

Анализ графиков показывает неравномерность значений масс остатков КРТ в зависимости от месяца запуска, при этом наименьшее количество остатков КРТ остается в летний период (что дает изменение по дальности в сторону недолета ≈ 2 км), а наибольшее в зимний (что дает изменение по дальности в сторону перелета ≈ 3 км). Исходя из этого, можно сделать однозначный вывод о сезонной зависимости остатков КРТ, что в свою очередь подтверждает целесообразность перехода к «оптимальному» баллистическому коэффициенту.

Как уже было отмечено ранее, вторым возмущающим фактором, оказывающим значительное влияние на баллистический коэффициент, является «оптимальный» коэффициент лобового сопротивления, напрямую зависящий от ряда факторов, таких как высота отделения ОЧ РН, плотность атмосферы, давление и воздействие ветровой составляющей на протяжении всего движения ОЧ РН на ПУТ после отделения.

«Оптимальный» коэффициент лобового сопротивления при учете всех возмущающих факторов имеет вид:

$$C_{x\text{опт}} = k_{\text{атм}} C_{x\alpha}, \quad (23)$$

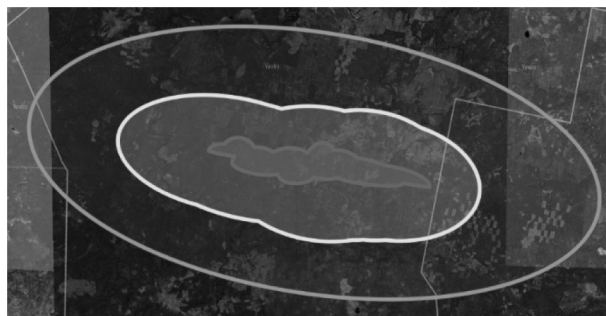


Рис. 7. Визуализация площадей огибающих эллипсов рассеивания, зависящих от возмущающих факторов на АУТ и ПУТ, и площади отчужденного РП с условным наименованием «Вашка»

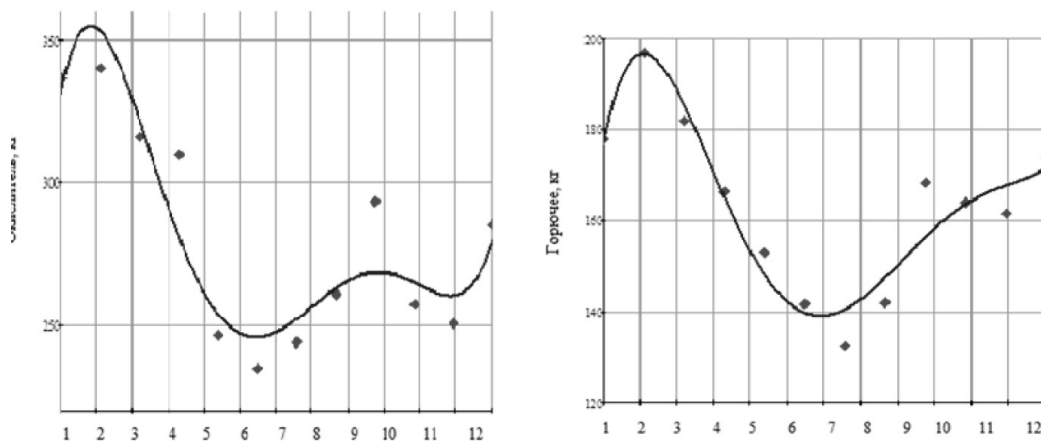


Рис. 8. График зависимости остатков окислителя и горючего в баках ББРН типа «Союз» от месяца запуска

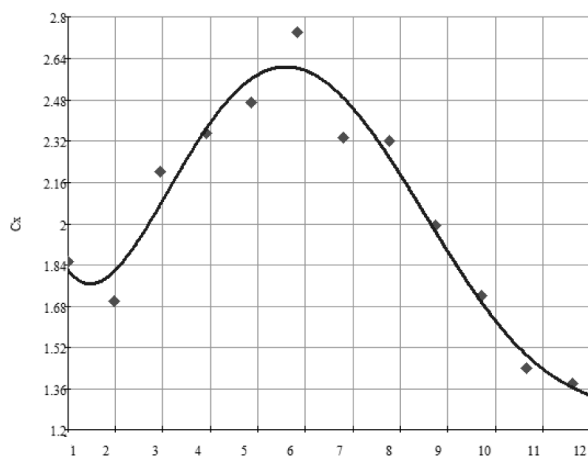


Рис. 9. Зависимость значений «оптимального» коэффициента лобового сопротивления от месяца запуска

Таблица 10

Среднее значение «оптимального» коэффициента лобового сопротивления $C_{x\text{опт}}$

Месяц	Оптимальное значение $C_{x\text{опт}}$	Месяц	Оптимальное значение $C_{x\text{опт}}$	Месяц	Оптимальное значение $C_{x\text{опт}}$
январь	1,85	май	2,47	март	2,2
февраль	1,7	июнь	2,74	апрель	2,35
ноябрь	1,44	июль	2,33	сентябрь	1,99
декабрь	1,38	август	2,32	октябрь	1,72

где $k_{атм}$ – сезонная уставка, зависящая от плотности атмосферы, давления и воздействия ветровой составляющей;

$C_{ха}$ – коэффициент лобового сопротивления.

Коэффициент лобового сопротивления определяется по формуле:

$$C_{ха} = C_x \cos \alpha + C_y \sin \alpha, \quad (24)$$

C_x – коэффициент продольной силы;

C_y – коэффициент нормальной силы;

α – угол атаки.

Значения «оптимального» коэффициента лобового сопротивления были определены с учетом имеющихся статистических данных по рассеиванию ОЧ РН на космодроме Плесецк. Данные значения подбирались методом итерации (последовательного приближения) таким образом, чтобы, решая систему уравнений движения на ПУТ, получить значения фактических точек группирования по месяцам. Таким образом были определены диапазоны значений «оптимального» коэффициента лобового сопротивления, использование которых при решении системы уравнений движения на ПУТ позволило определять координаты точки падения в реальном масштабе времени (РМВ) по известным значениям кинематических параметров с минимальными отклонениями от ФТП для каждого месяца запуска. Средние значения «оптимального» коэффициента лобового сопротивления по месяцам представлены в таблице 10 и на рисунке 9.

Анализ данных таблицы 10 и рисунка 9 показывает, что значение «оптимального» коэффициента лобового сопротивления неравномерно в течение годового цикла и достигает максимального значения в июне. Это подтверждает вывод о необходимости использования в расчете движения ОЧ на ПУТ значений «оптимального» коэффициента лобового сопротивления соответствующего месяца запуска, а также нецелесообразности использования осреднённого коэффициента лобового сопротивления при прогнозе ФТП ввиду его невысокой точности. Особая значимость применения «оптимального» коэффициента лобового сопротивления обусловлена тем фактом, что в полетных алгоритмах СУ РН в настоящее время используется осредненное значение для построения программной траектории выведения.

Проведенный анализ показал, что использование «оптимального» баллистического коэффициента, позволяющего учитывать совокупное влияние таких возмущающих факторов, как изменение значений массы ОЧ на момент отделения и «оптимального» коэффициента лобового сопротивления при определении эллипса рассеивания, обусловленного возмущениями III группы, позволит более достоверно определять, а также прогнозировать фактические ТП ОЧ. Что даст возможность сократить площадь рассеивания в ~3 раза. Это в значительной мере превышает размеры

области эллипса рассеивания, обусловленного возмущениями I и II группы. т.е. на АУТ.

Выводы

Итогом проведенной работы стали результаты статистической обработки практической выборки отклонений координат ФТП ОЧ РН по дальности и боку, основанной на фактических статистических данных групп возмущающих факторов, воздействующих на ОЧ РН на момент отделения в конце АУТ и на ПУТ.

Проведенный в ходе работы анализ статистических данных неуправляемого движения РН позволил разработать методику оценки полных вариаций кинематических параметров движения РН и оценить степень влияния начальных условий на рассеивание ОЧ РН (до 4,5 %). При этом было определено, что большое влияние на разброс кинематических параметров движения, а, следовательно, и на достоверность определения начальных условий движения ОЧ, имеет фактическое время разделения ОЧ с РН, а также импульс после отделения. При этом вклад учета фактического времени разделения и импульса после действия составляют до 40 % изменения размеров эллипса рассеивания, обусловленного возмущениями на АУТ.

Анализ результатов статистической обработки отклонений ФТП ОЧ РН позволил выявить определенную сезонную закономерность в рассеивании ОЧ. А обработка накопленной статистической выборки «сухих» масс ОЧ и остатков КРТ на момент отделения позволила более достоверно определить «оптимальный» коэффициент лобового сопротивления и, соответственно, «оптимальный» баллистический коэффициент.

Исходя из всего вышесказанного, был сделан вывод о том, что влияние возмущающих факторов на рассеивание ФТП ОЧ РН может быть учтено и минимизировано за счет модификации существующих алгоритмов СУ РН [4,8]. Суть данной модификации заключается в том, что на борту РН может быть реализована возможность управления режимом работы ДУ с контролем расчёта тяги по данным ТМИ, позволяющая ОЧ РН с наименьшими отклонениями попадать в заданный эллипс рассеивания. При этом необходимый момент времени выключения ДУ рассчитывается в реальном времени на борту РН исходя из имеющихся на борту запасов КРТ и сезонных уставок, зависящих от «оптимального» коэффициента лобового сопротивления.

Данный подход реализован в заявке на изобретение «Устройство управления тягой двигательных установок ракет космического назначения «Союз-2», «Ангара» на основе оценки текущих значений тяги в полете по данным телеметрической информации для попадания отделяющихся частей в заданную область» Регистрационный №2022106487.

Литература

1. Влияние сезонного фактора на закономерности рассеивания фактических точек падения отделяющихся частей ракет-носителей типа Р-7А / В.В. Гончаров, Л.В. Кротова, В.В. Спиридонов, М.Ю. Михайлов // Сборник 4 ЦНИИ Минобороны России. Выпуск 164, Т. 1. – 2021. – С. 42–52.
2. Слезкинский, С. К. Теория полета ракет. Выпуск V. Учебное пособие / С.К. Слезкинский, А.Я. Качановский. – Ленинград : Издательство «ЛВИКА им. А. Ф. Можайского», 1970. – 103 с.
3. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей / Е.С. Вентцель. – Москва : Наука, 1969. – 576 с.
4. Кротова, Л. В. Обеспечение попадания отработавших ступеней ракет космического назначения в заданный эллипс рассеивания путем модификации полетных алгоритмов системы управления / Л.В. Кротова, А.Ю. Николаев, В.В. Дуга // Авиакосмическое приборостроение. – 2022. – № 4. – С. 3–16.
5. Аверкиев, Н. Ф. Основы теории полета летательных аппаратов / Н.Ф. Аверкиев, С.А. Богачев, С.А. Васьков. – Санкт-Петербург : ВКА им. А.Ф. Можайского, 2013. – 242 с.
6. Власов, С. А. Теория полета космических аппаратов / С.А. Власов, А.В. Кульвиц, А.Н. Скрипников. – Санкт-Петербург : ВКА им. А.Ф. Можайского, 2018. – 412 с.
7. Проблемные вопросы использования трасс запусков космических аппаратов и районов падения отделяющихся частей ракет космического назначения: монография / В.В. Авдошкин, Н.Ф. Аверкиев, А.А. Ардашев [и др.] ; под ред. А.С. Фадеева, Н.Ф. Аверкиева. – Санкт-Петербург : ВКА имени А.Ф. Можайского, 2016. – 371 с.
8. Ракетные двигательные установки. Устройство, принципы действия. Особенности эксплуатации. Учебное пособие. – Министерство обороны, 1992. – 20 с.