

## ПОДХОД К РАЗРАБОТКЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПАССИВНОГО УЧАСТКА ТРАЕКТОРИИ ДЛЯ ОТДЕЛИВШИХСЯ ЧАСТЕЙ РАКЕТЫ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

А.С. Пачин

pachin.as@ya.ru

SPIN-код: 5425-4376

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

---

### Аннотация

Статья посвящена практическим вопросам сокращения размеров районов падения отделяющихся частей (ОЧ) ракет космического назначения (РКН). Рассмотрены факторы, действующие на ОЧ РКН при их пассивном полете и приводящие к отклонениям траектории полета ОЧ от номинала. Приведены способы определения количественных значений рассмотренных факторов при математическом моделировании полета. Показана важность сбора, обработки и анализа измерительной информации как телеметрической, так и внешнетраекторной. Предложен подход к разработке и усовершенствованию математической модели движения ОЧ РКН на пассивном участке траектории путем учета действующих факторов.

### Ключевые слова

Математическая модель, пассивный участок траектории, баллистика, ракета космического назначения, отделяющаяся часть, измерительная информация, внешние воздействующие факторы

Поступила в редакцию 18.06.2019

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019

---

**Введение.** Для запусков космических объектов (автоматических космических аппаратов, пилотируемых кораблей, межпланетных станций и т. п.) используются многоступенчатые баллистические ракеты — ракеты космического назначения (РКН). В ходе полета РКН происходит сброс отработавших элементов конструкции: ступеней, створок головного обтекателя и хвостового отсека, двигательной установки системы аварийного спасения. Отработавшие элементы конструкции РКН совершают пассивный полет в специально отведенные районы падения.

В настоящее время остро стоит вопрос проведения работ по реальному сокращению размеров районов падения (РП) отделяющихся частей (ОЧ) РКН при запусках с космодромов Байконур, Плесецк и Восточный. Например, размер типового района для падения отделяющихся частей первых ступеней РКН типа «Союз» и «Циклон-3» составляет в длину 50 км вдоль трассы полета и 30 км в ширину (удаление от точки старта 300...350 км). С увеличением дальности полета ОЧ РКН растут и размеры районов падения.

Разработка методов сокращения размеров РП ОЧ связана с необходимостью проведения математического моделирования полета ОЧ РКН с расчетом

траектории полета ОЧ (неуправляемый и управляемый спуски) с оценкой эффективности различных методов сокращения размеров РП ОЧ.

Таким образом, необходимо рассмотреть и проанализировать факторы, действующие на ОЧ РКН при их пассивном полете и приводящие к отклонениям траектории полета ОЧ от номинала.

**Предпосылки моделирования и основные допущения.** Для создания наиболее полной модели движения ОЧ необходимо учитывать силы, действующие на ОЧ в полете, а также предусмотреть влияние различных процессов на параметры траектории [1]. В первую очередь, следует учитывать факторы, которые оказывают значительное влияние на рассеивание ОЧ:

- отклонения параметров атмосферы от стандартных, таких как плотность, температура, давление;
- ветер;
- разброс начальных условий пассивного движения ОЧ на момент выдачи команд системы управления РКН на отделение;
- действие механизма разделения ОЧ и РКН;
- действие аэродинамических сил и моментов, возникающих в ходе полета в плотных слоях атмосферы;
- разрушение ОЧ на пассивном участке траектории;
- дренаж компонентов топлива, что влечет за собой уменьшение массы ОЧ и появление некоторой силы тяги и момента вокруг центра масс;
- сброс массы через сопло увода (одно или несколько), что также приводит к появлению тяги и моменту вокруг центра масс.

В настоящий момент времени в полной мере учесть в математической модели названные факторы не представляется возможным. Однако для ряда источников рассеивания существуют различные модели и методики, позволяющие учитывать те или иные аспекты при моделировании движения.

Значительное влияние на отклонение параметров траектории ОЧ оказывает неточность знания параметров атмосферы в исследуемом районе полета [2]. Основной моделью, задающей стандартные параметры атмосферы в зависимости от заданной высоты, является ГОСТ 4401–81 «Атмосфера стандартная. Параметры» [3]. В дополнение к нему существует ГОСТ 24631–81 «Атмосферы справочные», устанавливающий закономерности изменения с высотой параметров атмосферы с учетом сезона и широты рассматриваемой местности. Основные качественные и количественные закономерности пространственного и годового распределения параметров атмосферы в обоих полушариях земли, а также среднеширотные скорости зонального и меридионального ветров устанавливает ГОСТ Р 53460–2009. Это глобальная справочная атмосфера для высот от 0 до 120 км, применяемая для аэрокосмической практики. Ее моделирование позволяет задавать параметры атмосферы, силу и направление ветра в зависимости от сезона, долготы, широты и высоты рассматриваемой области пространства.

Для уточнения математической модели возможных разбросов начальных условий движения ОЧ конкретной РКН необходимо проанализировать измери-

тельную информацию по серии предыдущих пусков носителя, полученную при проведении внешнетраекторных измерений и на основе анализа измерительной информации вычислить вариации времени выдачи команд (т. е. времени начала пассивного участка траектории) и кинематических параметров траектории. С помощью статистической обработки полученных результатов можно уточнить начальные условия движения ОЧ.

Наибольшую трудность для моделирования представляет разрушение ОЧ. Этот процесс имеет множество неопределенностей, которые нельзя описать математически. Одним из способов приблизительного учета влияния данного явления на параметры траектории является задание высоты разрушения и параметров фрагментов, на которые разрушается ОЧ. Необходимую для этого информацию следует определять и постоянно уточнять на основе статистической обработки результатов измерений параметров траектории на пассивном участке.

Для учета рассеивания точек падения, вызванного аэродинамическими силами, на пассивном участке траектории необходимо рассматривать как движение центра масс (ЦМ) ОЧ, так и угловое движение относительно ЦМ. Изменение углового положения ОЧ приводит к изменению аэродинамических характеристик, а значит, и действующих аэродинамических сил, что в дальнейшем приведет к изменению траектории и, как следствие, координат точки падения ОЧ. Для расчета параметров углового движения ОЧ необходимы характеристики, определение которых часто затруднено. К ним относятся такие характеристики, как масса, площадь мишени, аэродинамические коэффициенты, положение ЦМ и центра давления, моменты инерции. В данной ситуации представляется целесообразным ограничиться рассмотрением движения только ЦМ при представлении ОЧ в виде материальной точки. Изменение траектории в результате углового движения может быть учтено введением в имитационную модель диапазонов возможного изменения соответствующих аэродинамических коэффициентов.

Действие механизма разделения ОЧ и РКН в математической модели можно задать как в импульсной постановке, т. е. путем добавления к начальным условиям движения приращения скорости, так и во временной, задавая время, в течение которого происходит разделение, и действующие при этом силы.

Дренаж компонентов топлива и сброс массы через сопло увода влекут появление силы тяги, действующей на центр масс, и вращательного момента вокруг центра масс [5]. Названные факторы возможно оценить по остаткам компонентов топлива в баках, которые состоят из невыработанных рабочих запасов, гарантийных запасов и незабора и приводятся в баллистическом расчете предприятия — изготовителя РКН. Оценить реальные остатки топлива можно только при обработке телеметрической информации, а действующие при их расходовании (выбросе) силы на ОЧ — при анализе внешнетраекторной информации, получаемой с помощью бортовых (навигационной аппаратуры потребителей, аппаратуры спутниковой навигации) и наземных средств (радиолокационных станций).

Таким образом, при разработке математической модели движения ОЧ необходимо учитывать перечисленные выше факторы, влияющие на параметры траектории ОЧ и рассеивание. Это позволит наиболее точно прогнозировать точки падения ОЧ и характеристики рассеивания.

В соответствии с Постановлением Правительства Российской Федерации «О единых государственных системах координат» [6], баллистические расчеты должны проводиться в общеземной геоцентрической системе координат «Параметры Земли 1990 года». Поэтому за основу математической модели движения ОЧ РКН следует принять систему обыкновенных дифференциальных уравнений движения в общеземной геоцентрической системе координат [7]. Данная модель приведена в [8].

Усовершенствование и дополнение математической модели модулями, позволяющими учитывать полный комплекс приведенных выше возмущающих факторов для каждого вида ОЧ РКН, приводят к возможности моделирования неориентированного пассивного полета ОЧ. В результате модель позволяет определить, чем опытная траектория отличается от расчетной, рассчитать изохронные вариации параметров траектории ОЧ. Это дает возможность осуществить апостериорную (послеполетную) оценку и статистическую обработку летно-технических характеристик ОЧ и РКН в целом, выявить систематику отклонений опытной траектории от расчетной и на основе полученных результатов выработать рекомендации по улучшению характеристик создаваемой ракетно-космической техники, а также внести коррективы в саму модель.

Особенность разрабатываемой математической модели состоит в том, что она приспособлена к использованию результатов обработки измерительной информации и исследованию сил, действующих на пассивном участке траектории ОЧ. Это позволяет по мере накопления опытных данных уточнять саму модель, оценивать точность и кучность точек падения ОЧ РКН определенного типа по серии пусков относительно расчетного эллипса, уточнять действующие аэродинамические силы, учитывать характеристики ОЧ конкретного изделия.

В дальнейшем (после обработки и анализа результатов серии пусков РКН различного типа к настоящему времени и корректировки модели) разрабатываемая математическая модель может быть усовершенствована для моделирования управляемого спуска ОЧ РКН с целью сокращения районов падения.

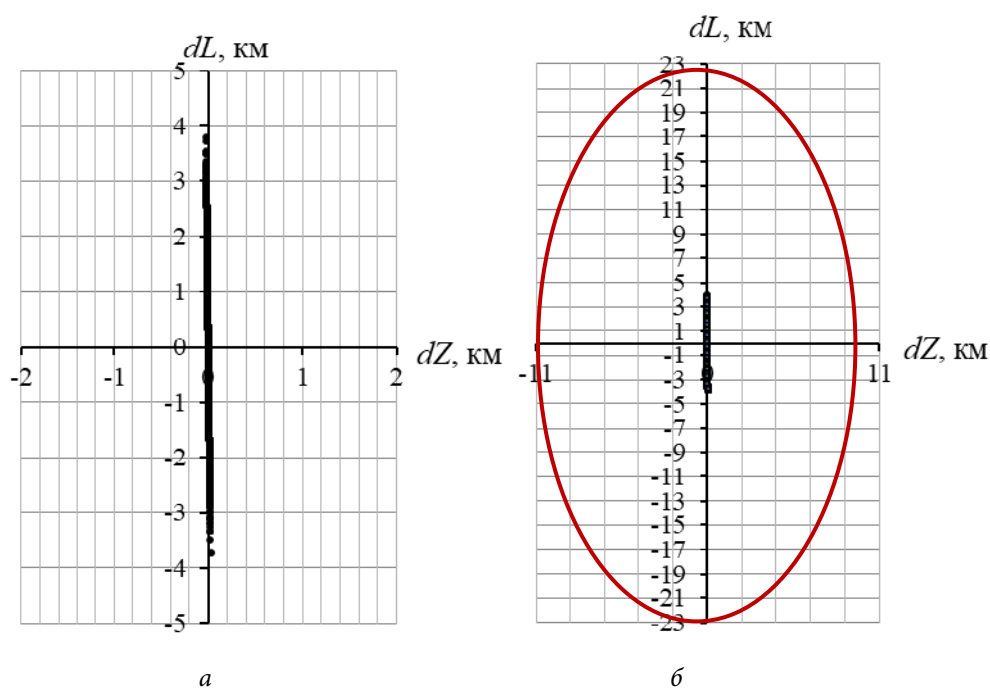
Для оценки влияния отклонения плотности атмосферы от стандартных значения, ветра и разброса начальных условий движения на рассеивание ОЧ были проведены соответствующие расчеты на основе математической модели, приведенной в [8], при следующих допущениях:

- поверхность Земли — общеземной эллипсоид (ОЗЭ);
- гравитационное поле Земли — нормальное с учетом двух гармоник;
- разрушение ОЧ не учитывается;
- ОЧ рассматривается как материальная точка постоянной массы;
- импульс отделения ОЧ не учитывается;
- параметры атмосферы определяются по ГОСТ 4401–81 и ГОСТ Р 53460–2009.

В качестве исходных данных задана следующая информация:

- геодезические координаты точки старта РКН;
- масса ОЧ;
- коэффициент силы лобового сопротивления ОЧ;
- начальные условия движения ОЧ;
- математические ожидания и среднеквадратичные отклонения изохронных вариаций параметров вектора состояния на момент отделения ОЧ;
- геодезические координаты расчетной точки падения ОЧ (точки прицеливания) и азимут большой полуоси района падения;
- размеры выделенного района падения ОЧ.

**Расчеты и результаты моделирования.** На рис. 1–5 представлены рассчитанные зоны рассеивания, полученные при статистическом моделировании 10000 точек падения. В табл. 1–10 для рассмотренных случаев приведены оценки некоторых статистических характеристик рассеивания, рассчитанных по алгоритму, приведенному в [9]. Представленные в таблицах значения рассчитаны для отклонений по дальности и по направлению полученных точек падения в исходных ( $dL$ ,  $dZ$ ) и в главных осях рассеивания ( $dL_1$ ,  $dZ_1$ ).



**Рис. 1.** Зона рассеивания, соответствующая случаю «Атмосфера по ГОСТ 4401–81, отклонения плотности  $\pm 10\%$ »:

*a* — в масштабе; *б* — в сравнении с выделенным РП

В табл. 1, 2 приведены характеристики рассеивания для рассмотренного случая.

Таблица 1

**Характеристики рассеивания, рассчитанные в исходных осях рассеивания для случая «Атмосфера по ГОСТ 4401–81, отклонения плотности  $\pm 10\%$ »**

Ось	$\bar{M}$ , м	$\bar{\sigma}$ , м	min, м	max, м
$dL$	25	1039	-3715	3808
$dZ$	0	7	-23	26

Таблица 2

**Характеристики рассеивания, рассчитанные в главных осях рассеивания для случая «Атмосфера по ГОСТ 4401–81, отклонения плотности  $\pm 10\%$ »**

Ось	$\bar{\sigma}$ , м	$3\bar{\sigma}$ , м	$\alpha$ , град
$dL_1$	1039	3118	0,4
$dZ_1$	0	1	

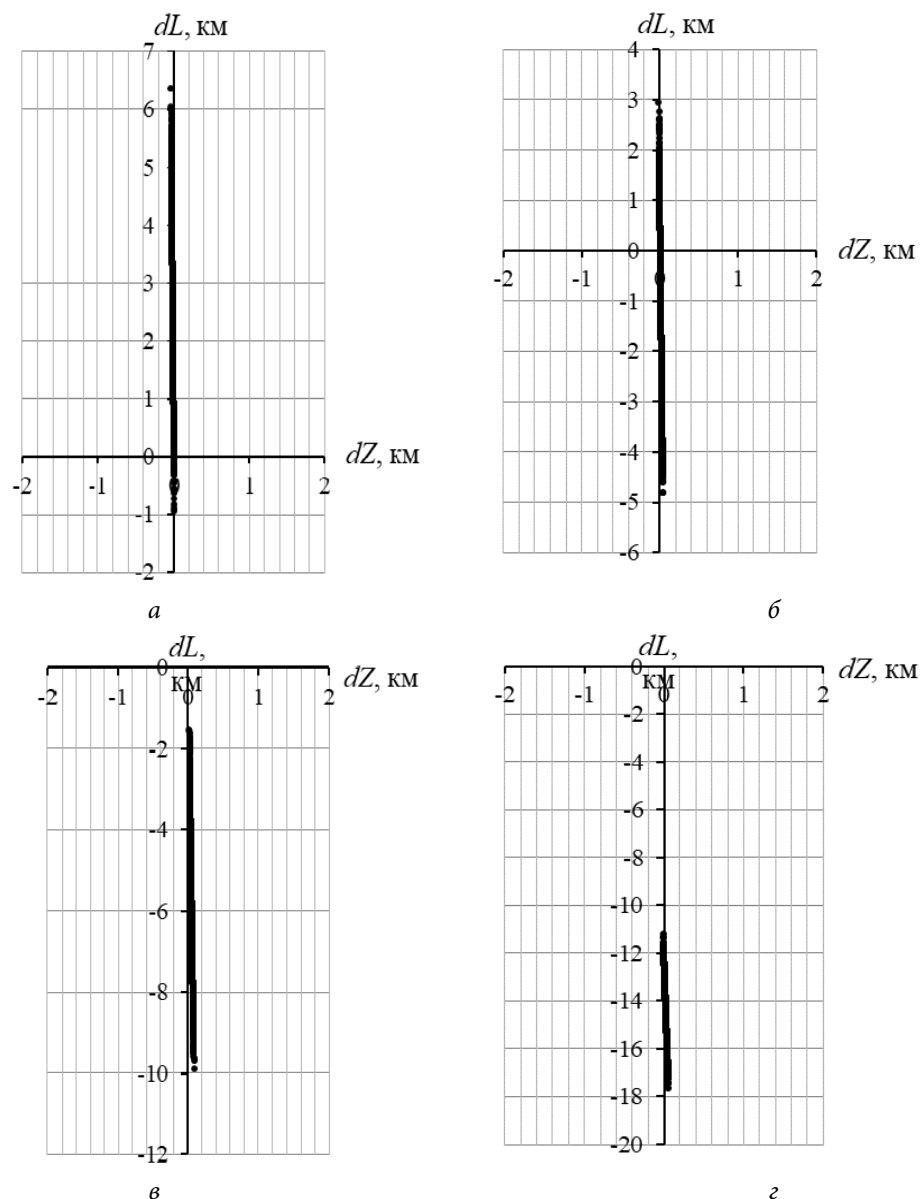
На рис. 1 и из табл. 1, 2 видно, что отклонения плотности атмосферы в пределах  $\pm 10\%$  приводят к отклонению точек падения ОЧ по дальности симметрично относительно центра группирования на  $\pm 3,8$  км и незначительному отклонению по направлению, составляющему несколько десятков метров. В главных осях рассеивания боковой разброс практически отсутствует. Поворот главных осей рассеивания вызван вращением Земли.

На рис. 2 и в табл. 3, 4 отражено влияние сезонного изменения плотности атмосферы на рассеивание точек падения отделяющейся части, а на рис. 3 и в табл. 5, 6 показано влияние ветра на разброс точек падения в различные сезоны.

Таблица 3

**Характеристики рассеивания, рассчитанные в исходных осях рассеивания для случая «Атмосфера по ГОСТ Р 53460–2009, отклонения плотности  $\pm 10\%$ » для различных сезонов**

Сезон	Ось	$\bar{M}$ , м	$\bar{\sigma}$ , м	min, м	max, м
Зима	$dL$	2 659	999	-932	6 364
	$dZ$	-18	6	-38	5
Весна	$dL$	-1 030	1 082	-4 809	2 960
	$dZ$	11	7	-15	38
Лето	$dL$	-5 805	1 172	-9 883	-1 526
	$dZ$	50	9	17	84
Осень	$dL$	-14 437	869	-17 621	-11 175
	$dZ$	20	9	-14	56

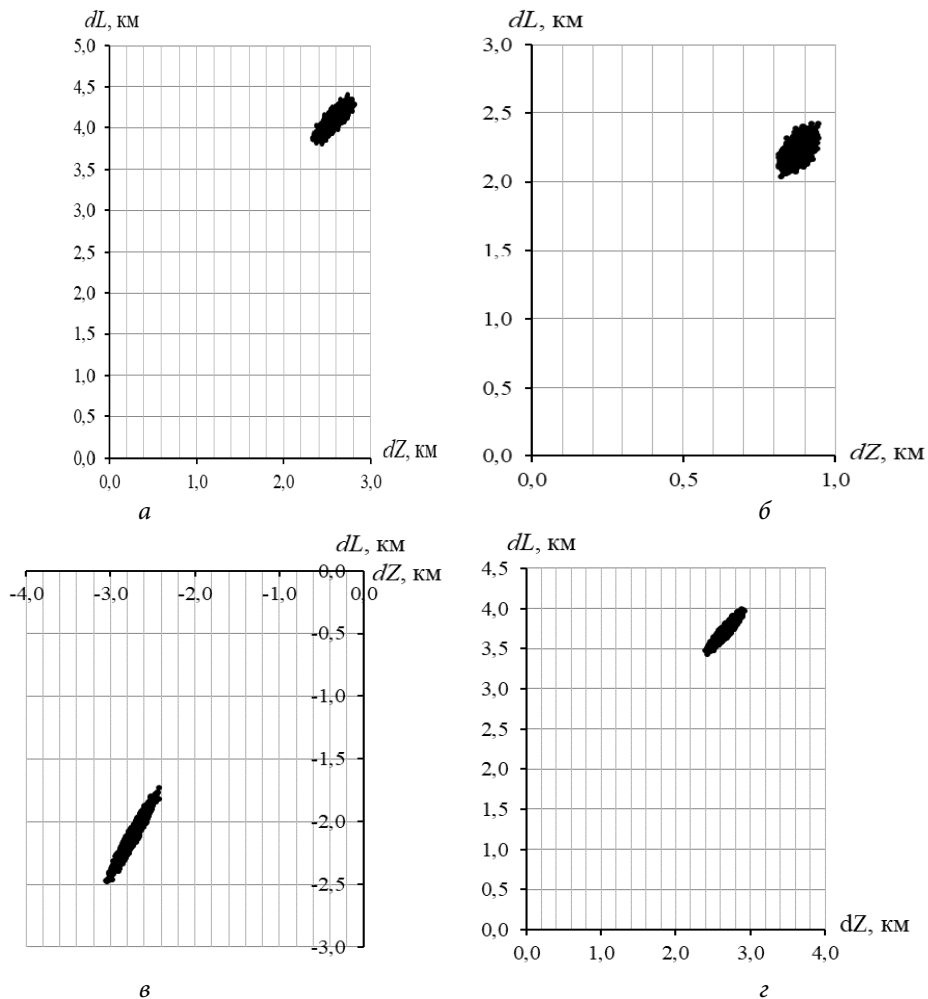


**Рис. 2.** Зоны рассеивания, соответствующие случаю «Атмосфера по ГОСТ Р 53460–2009, отклонения плотности  $\pm 10\%$ » для различных сезонов:  
*a* — зима; *б* — весна; *в* — лето; *г* — осень

Анализ рис. 2 и табл. 3, 4 показал, что при изменении сезона от зимы к осени зона рассеивания смещается по дальности ближе к точке старта. Это связано с сезонным изменением плотности. Отклонения по направлению не значительны. Отклонение плотности атмосферы на  $\pm 10\%$  от номинальных значений приводит к «вытягиванию» зоны рассеивания точек падения ОЧ по дальности до 8,5 км. Также отметим, что боковой разброс в главных осях рассеивания близок к нулю.

**Характеристики рассеивания, рассчитанные в главных осях рассеивания для случая «Атмосфера по ГОСТ Р 53460–2009, отклонения плотности  $\pm 10\%$ » для различных сезонов**

Сезон	Ось	$\bar{\sigma}$ , м	$3\bar{\sigma}$ , м	$\alpha$ , град
Зима	$dL_1$	999	2 996	0.3
	$dZ_1$	0	1	
Весна	$dL_1$	1 082	3 245	0.4
	$dZ_1$	0	1	
Лето	$dL_1$	1 172	3 516	0.5
	$dZ_1$	0	1	
Осень	$dL_1$	869	2 608	0.6
	$dZ_1$	0	0	



**Рис. 3. Зоны рассеивания, соответствующие случаю «Атмосфера по ГОСТ 4401–81, отклонения скорости ветра  $\pm 10\%$ » для различных сезонов: а — зима; б — весна; в — лето; г — осень**



Таблица 5

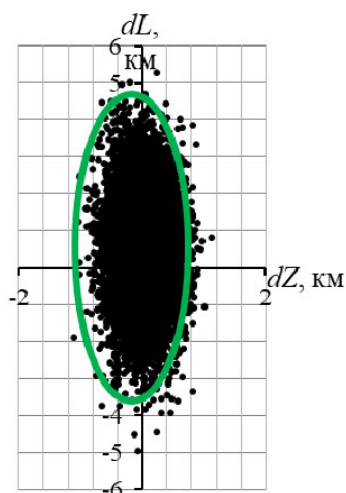
**Характеристики рассеивания, рассчитанные в исходных осях рассеивания для случая «Атмосфера по ГОСТ 4401–81, отклонения скорости ветра  $\pm 10\%$ » для различных сезонов**

Сезон	Ось	$M$ , м	$\bar{\sigma}$ , м	min, м	max, м
Зима	$dL$	4 102	76	3 811	4 401
	$dZ$	2 572	66	2 330	2 814
Весна	$dL$	2 236	49	2 041	2 425
	$dZ$	880	19	814	943
Лето	$dL$	-2 121	102	-2 476	-1 731
	$dZ$	-2 743	86	-3 052	-2 427
Осень	$dL$	3 718	76	3 436	3 998
	$dZ$	2 660	72	2 399	2 924

Таблица 6

**Характеристики рассеивания, рассчитанные в главных осях рассеивания для случая «Атмосфера по ГОСТ 4401–81, отклонения скорости ветра  $\pm 10\%$ » для различных сезонов**

Сезон	Ось	$\bar{\sigma}$ , м	$3\bar{\sigma}$ , м	$\alpha$ , град
Зима	$dL_1$	96	288	-39,8
	$dZ_1$	31	92	
Весна	$dL_1$	50	150	-12,9
	$dZ_1$	15	46	
Лето	$dL_1$	132	397	-40,1
	$dZ_1$	17	51	
Осень	$dL_1$	102	306	-43,3
	$dZ_1$	20	59	



**Рис. 4.** Зона рассеивания, соответствующая случаю «Атмосфера по ГОСТ 4401–81, разброс НУД  $\pm 3\sigma$ »

На рис. 3 и из табл 5, 6 видно, что влияние ветра приводит к смещению зоны рассеивания точек падения ОЧ и по дальности и по направлению, а также к ее повороту примерно на  $40^\circ$  зимой, весной, осенью и примерно на  $13^\circ$  летом. На рис. 3 видно, что зимой, весной и осенью преобладают ветра западного направления, летом — восточного. Отметим, что полученные зоны рассеивания имеют относительно небольшие размеры: в главных осях рассеивания разброс по дальности составляет несколько сотен метров, а по направлению — десятки метров.

На рис. 4 видно, что зона рассеивания для модели стандартной атмосферы является

симметричной относительно центра выделенного района падения (точки прицеливания). Это обусловлено тем, что данная модель атмосферы принята при расчете точки прицеливания боковых блоков (ББ) при подготовке расчетно-баллистических материалов предприятием-изготовителем РКН.

Таблица 7

**Характеристики рассеивания, рассчитанные в исходных осях рассеивания для случая «Атмосфера: ГОСТ 4401–81, разброс НУД  $\pm 3\sigma$ »**

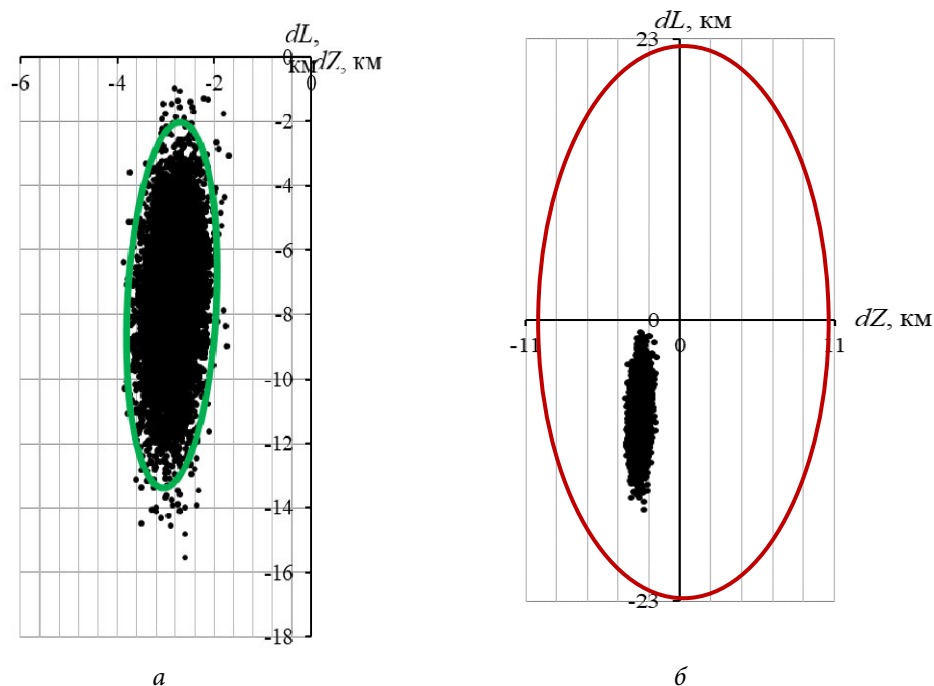
Ось	$M$ , м	$\bar{\sigma}$ , м	min, м	max, м
$dL$	554	1 330	-4 957	5 293
$dZ$	6	289	-1 109	1 131

Таблица 8

**Характеристики рассеивания, рассчитанные в главных осях рассеивания для случая «Атмосфера: ГОСТ 4401–81, разброс НУД  $\pm 3\sigma$ »**

Ось	$\bar{\sigma}$ , м	$3\bar{\sigma}$ , м	$\alpha$ , град
$dL_1$	1 330	3 990	0,3
$dZ_1$	289	867	

Учет разброса начальных условий движения ББ привел к рассеиванию точек падения на  $\pm 5$  км по дальности и  $\pm 1,1$  км по направлению.



**Рис. 5.** Зона рассеивания, соответствующая случаю «Атмосфера по ГОСТ Р 53460–2009, сезон лето, отклонения плотности  $\pm 10\%$ , отклонения скорости ветра  $\pm 10\%$ , разброс НУД  $\pm 3\sigma$ »: *a* — в масштабе; *б* — в сравнении с выделенным РП

Таблица 9

**Характеристики рассеивания, рассчитанные в исходных осях рассеивания для случая «Атмосфера по ГОСТ Р 53460–2009, сезон: лето, отклонения плотности  $\pm 10\%$ , отклонения скорости ветра:  $\pm 10\%$ , разброс НУД  $\pm 3\sigma$ »**

Ось	$\bar{M}$ , м	$\bar{\sigma}$ , м	min, м	max, м
$dL$	-7 635	1 914	-15 527	-976
$dZ$	-2 858	301	-3 862	-1 708

Таблица 10

**Характеристики рассеивания, рассчитанные в главных осях рассеивания для случая «Атмосфера по ГОСТ Р 53460–2009, сезон лето, отклонения плотности  $\pm 10\%$ , отклонения скорости ветра  $\pm 10\%$ , разброс НУД  $\pm 3\sigma$ »**

Ось	$\bar{\sigma}$ , м	$3\bar{\sigma}$ , м	$\alpha$ , град
$dL_1$	1 915	5 745	-1,7
$dZ_1$	296	887	

На рис. 5 видно, что совокупность рассмотренных факторов полета ОЧ приводит к смещению, повороту и увеличению зоны рассеивания точек падения.

Из рассмотренных факторов полета ОЧ наибольшее влияние на рассеивание точек падения оказывает разброс НУД. Следует отметить, что все полученные зоны рассеивания лежат внутри заданного района падения.

**Выводы.** На пассивном участке траектории на ОЧ РКН начиная с момента отделения действуют различные факторы, влияющие на параметры траектории и характеристики рассеивания ОЧ.

Учет перечисленных факторов в математической модели движения ОЧ в большинстве случаев возможен только на основе апостериорного анализа и статистической обработки измерительной информации, поступающей как с борта РКН (телеметрическая информация), так и от технических средств измерений (внешнетраекторных), размещенных на конечном участке полета ОЧ РКН, а также опытных данных о фактических точках падения ОЧ.

Среди рассмотренных в расчетной части факторов полета наибольшее влияние на рассеивание точек падения ОЧ оказывает разброс начальных условий движения.

Разрабатываемую модель можно совершенствовать в ходе проведения пусков РКН, накапливая и обрабатывая измерительную информацию.

## Литература

- [1] Сихарулидзе Ю.Г. Баллистика и наведение летательных аппаратов. М., Бином, 2014.
- [2] Аппазов Р.Ф., Сытин О.Г. Методы проектирования траекторий носителей и спутников Земли. М., Наука, 1987.
- [3] ГОСТ 4401-81. Атмосфера стандартная. Параметры. М., Издательство стандартов, 2004.

- [4] Овчинников А., ред. Первый космодром России. М., Согласие, 1996.
- [5] Лебедев А.А., Герасюта Н.Ф. Баллистика ракет. М., Машиностроение, 1970.
- [6] Постановление Правительства РФ № 1463 от 28 декабря 2012 г. «О единых государственных системах координат».
- [7] Параметры Земли 1990 года (ПЗ-90.11). М., Военно-топографическое управление Генерального штаба Вооруженных сил Российской Федерации, 2014.
- [8] Аверкиев Н.Ф., Коваленко Ю.А. Алгоритмы прогнозирования движения космических аппаратов. СПб., ВКА им. А.Ф. Можайского, 2004.
- [9] Казаковцев В.П., Жилейкин В.Д. Обработка стрельб. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009.

**Пачин Алексей Сергеевич** — студент кафедры «Динамика и управление полетом ракет и космических аппаратов», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**Научный руководитель** — Сергеев Сергей Александрович, начальник отдела «Анализ летно-технических характеристик средств выведения», ФГУП «ЦНИИмаш», Королев, Российская Федерация.

**Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:**

Пачин А.С. Подход к разработке математической модели пассивного участка траектории для отделившихся частей ракеты космического назначения. *Политехнический молодежный журнал*, 2019, № 9(38). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2019-9-524>

## APPROACH TO THE DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL OF THE PASSIVE TRAJECTORY FOR THE SEPARATED PARTS OF A SPACE ROCKET

A.S. Pachin

pachin.as@ya.ru

SPIN-code: 5425-4376

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

---

### Abstract

*The article is devoted to practical issues of reducing the size of the falling areas of the separating parts (SP) of space rockets (SR). The factors are considered acting on the SR's SP during their passive flight and leading to deviations of the SP flight path from the nominal. Methods for determining the quantitative values of the considered factors in mathematical modeling of flight are presented. The importance of the collection, processing and analysis of measuring information both telemetric and external trajectory is shown. An approach is proposed to the development and improvement of the mathematical model of the SR's SP on the passive section of the trajectory taking into account the existing factors.*

### Keywords

*Mathematical model, passive part of the trajectory, ballistics, space rocket, separating part, measurement information, external factors*

Received 18.06.2019

© Bauman Moscow State Technical University, 2019

---

### References

- [1] Sikharulidze Yu.G. Ballistika i navedenie letatel'nykh apparatov [Ballistics and guidance of aircraft]. Moscow, Binom Publ., 2014 (in Russ.).
- [2] Appazov R.F., Sytin O.G. Metody proektirovaniya traektoriy nositeley i sputnikov Zemli [Engineering methods for carrier and satellite trajectory]. Moscow, Nauka Publ., 1987 (in Russ.).
- [3] GOST 4401-81. Atmosfera standartnaya. Parametry [State standard 4401-81. Standard atmosphere. Parameters]. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 2004 (in Russ.).
- [4] Ovchinnikov A., ed. Pervyy kosmodrom Rossii [First Russian spaceport]. Moscow, Soglasie Publ., 1996 (in Russ.).
- [5] Lebedev A.A., Gerasyuta N.F. Ballistika raket [Rocket ballistic]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1970 (in Russ.).
- [6] Postanovlenie Pravitel'stva RF № 1463 ot 28 dekabrya 2012 g. "O edinykh gosudarstvennykh sistemakh koordinat" [RF Government Regulation no. 1463 of 28.12.2012 "On unified state coordinate systems"] (in Russ.).
- [7] Parametry Zemli 1990 goda (PZ-90.11) [Earth parameters 1990]. Moscow, Voennotopograficheskoe upravlenie General'nogo shtaba Vooruzhennykh sil Rossiyskoy Federatsii Publ., 2014 (in Russ.).
- [8] Averkiev N.F., Kovalenko Yu.A. Algoritmy prognozirovaniya dvizheniya kosmicheskikh apparatov [Forecasting algorithms for spacecraft movement]. Sankt-Petersburg, VKA im. A.F. Mozhayskogo Publ., 2004 (in Russ.).
- [9] Kazakovtsev V.P., Zhileykin V.D. Obrabotka strel'b [Shooting processing]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2009 (in Russ.).

**Pachin A.S.** — Student, Department of Dynamics and Flight Control of Rockets and Spacecraft, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

**Scientific advisor** — Sergeev S.A., Head of Department of Analysis of Flight Performance of Launch Vehicles, FSUE TSNIIMASH, Korolev, Russian Federation.

**Please cite this article in English as:**

Pachin A.S. Approach to the development of a mathematical model of the passive trajectory for the separated parts of a space rocket. *Politekhnicheskiy molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2019, no. 9(38). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2019-9-524.html> (in Russ.).