

Научная статья  
УДК 629.7.07

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=182675>

## СПОСОБ РАСЧЕТА ВРЕМЕНИ ПОДГОТОВКИ ВОЗВРАЩАЕМЫХ БЛОКОВ РАКЕТ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ К ПОСЛЕДУЮЩИМ ПУСКАМ

Станислав Феликсович Стельмах<sup>1✉</sup>, Алексей Михайлович Астанков<sup>2</sup>,  
Александр Николаевич Суворов<sup>3</sup>, Наталья Сергеевна Демидова<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup>Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского,

Санкт-Петербург, Россия

<sup>1</sup>[vka@mil.ru](mailto:vka@mil.ru)✉

**Аннотация.** В статье рассмотрена статистика повторных пусков возвращаемых блоков многоразовых ракет-носителей Falcon 9 FT. Проанализирована динамика изменения времени подготовки возвращаемых ракетных блоков к последующим пускам. Предложен способ расчета времени подготовки возвращаемых ракетных блоков к повторным пускам на основе  $t$ -распределения Стьюдента с использованием гамма-функции Эйлера на примере статистики пусков ракет-носителей Falcon 9 FT. Проведена валидация выполненных с помощью предлагаемого способа расчетов величин временных интервалов с имеющимися статистическими данными.

**Ключевые слова:** ракета-носитель, последующий пуск, возвращаемый ракетный блок, период подготовки, динамика, временной интервал, гамма-функция Эйлера

*Для цитирования:* Стельмах С.Ф., Астанков А.М., Суворов А.Н., Демидова Н.С.

Способ расчета времени подготовки возвращаемых блоков ракет космического назначения к последующим пускам // Труды МАИ. 2024.№ 138. URL:

<https://trudymai.ru/published.php?ID=182675>

Original article

## **METHOD FOR CALCULATING THE TURNAROUND TIME FOR THE FIRST STAGE BOOSTERS**

**Stanislav F. Stelmakh**<sup>1✉</sup>, **Alexey M. Astankov**<sup>2</sup>, **Alexandr N. Suvorov**<sup>3</sup>,

**Natalia S. Demidova**<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup>Military space Academy named after A.F. Mozhaisky,

Saint Petersburg, Russia

<sup>1</sup>[yka@mil.ru](mailto:yka@mil.ru)✉

**Abstract.** Currently, the main participants in space activities are taking active steps to develop and operate reusable space systems. As a result of the reuse, the specific cost of launching a payload into target orbits is significantly reduced, and the overall time for production and preparation for launch is also reduced. The article examines the statistics of re-launches of return units of reusable Falcon 9 FT launch vehicles. The turnaround time dynamics of the first stage boosters for subsequent launches is shown. A method is proposed for calculating the preparation time of return rocket units for re-launches based on the Student  $t$ -distribution using the Euler gamma function. Validation of the

calculations of time intervals using the proposed method with the available statistical data is carried out. The discrepancy between the calculation results and real data is within the statistical error.

Data analysis shows that over the period 2021-2023, SpaceX has almost halved the turnaround time. This is due to the following factors:

- a significant increase in production capacity for components and assemblies necessary to replace the components of returned units the reusable units;
- increasing the reliability of the structures of the first stage booster and, as a consequence, minimizing the volume of maintenance and repair work;
- application of the latest and improvement of existing technologies in scheduled maintenance actions in preparation for subsequent launches.

Method for calculating the retire time for the first stage boosters will make it possible to predict the capabilities of space participants using reusable rocket launchers to deploy, build up and replenish orbital constellations. The presented method can be used in the development of methods, models, algorithms for estimating the preparation turnaround time, as well as in assessing the effectiveness of using reusable launch vehicles of various classes according to their intended purpose.

**Keywords:** launch vehicle, subsequent launch, first stage booster, turnaround time, dynamics, time interval, gamma function

**For citation:** Stelmakh S.F., Astankov A.M., Suvorov A.N., Demidova N.S. Method for calculating the turnaround time for the first stage boosters. *Trudy MAI*, 2024, no. 138.

URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=182675>

Основными критериями конкурентоспособности ракет-носителей (РН) являются масса полезного груза (ПГ), выводимого на целевые орбиты, простота конструкции, экологическая безопасность, надежность и стоимость пуска. Одним из основных способов уменьшения стоимости вывода ПГ на целевые орбиты является многократное использование оборудования РН [1-3].

Наиболее дорогостоящими составными частями РН являются узлы и агрегаты первой ступени, к которым относятся двигательные установки, корпус, системы управления, энергопитания и другие компоненты. По мнению российских и зарубежных экспертов, многократные ракетные блоки позволяют существенно снизить стоимость пусков ракет космического назначения (РКН) [4-7].

В настоящее время основные участники космической деятельности предпринимают активные шаги по разработке и эксплуатации многократных космических систем [8-10]. Лидером в этом направлении являются США. К основным результатам программ разработки и практического применения многократных средств выведения можно отнести такие американские РН, как Falcon 9 FT, Falcon Heavy, Starship, Shepard, New Glenn, Electron и другие. При этом такие РН, как Falcon 9 FT, Falcon Heavy, Electron уже несколько лет находятся в стадии серийного производства и эксплуатации, а сверхтяжелая РН Starship с многократным ускорителем Super Heavy в июне и октябре 2024 года прошла успешные летные испытания. Кроме того, во время последнего испытания многократный ускоритель Super Heavy после выведения корабля Starship на целевую орбиту благополучно приземлился на стартовую площадку космодрома Starbase (Бока-Чика) компании SpaceX, откуда и был произведен пуск указанной РН [11-13].

В результате повторного применения многоразовых блоков РКН существенно снижается удельная стоимость выведения ПГ на целевые орбиты, а также сокращается общее время производства и подготовки РН к пуску ввиду отсутствия необходимости в изготовлении двигателей, корпусов, баков горючего и окислителя, других элементов конструкции, используемых повторно [14-16]. Поэтому разработка способа, позволяющего рассчитать временной период подготовки возвращаемых ракетных блоков (ВРБ) к повторным пускам, является актуальной.

### **Анализ статистики повторных пусков ВРБ РН Falcon 9 FT**

Falcon 9 FT – семейство двухступенчатых одноразовых и частично многоразовых ракет-носителей американской частной компании SpaceX, предназначенных для запусков коммерческих спутников связи и навигации, научно-исследовательских космических аппаратов, спутников военного назначения, грузовых и пилотируемых кораблей Dragon (рисунок 1).



Рисунок 1 – Облик РН Falcon 9 FT

Первая ступень (ВРБ) РН Falcon 9 FT может использоваться повторно. Ее возвращение осуществляется на плавающие платформы, находящиеся в Атлантическом и Тихом океане на значительном (до 800 км) удалении от стартовых комплексов, или на посадочные площадки вблизи места старта [17-19].

Первое успешное приземление ВРБ РН Falcon 9 на посадочную площадку на мысе Канаверал было выполнено в декабре 2015 года. Весной 2016 года ВРБ впервые успешно приземлился на морскую платформу в Атлантике. В 2017 году тот же ВРБ после технического обслуживания был запущен повторно и успешно выполнил посадку на плавающую платформу. В период с 2010 года по настоящее время произведено более трехсот пусков РН семейства Falcon 9, в которых ВРБ запускались повторно более двухсот семидесяти раз.

В данной работе анализируется динамика пусков РН Falcon 9 FT, оснащенной последней модификацией ВРБ (блок 5) (далее – ВРБ РН), отличающейся от предыдущих версий более высокими летными параметрами (таблица 1) [20].

Таблица 1

### Основные характеристики РН Falcon 9 FT

Характеристика (параметр)	Показатель	Примечание
Количество ступеней	2	
Длина, м	70	
Диаметр, м	3,7	
Стартовая масса, т	549	
Масса ПГ, выводимого на низкую околоземную орбиту, т	17,4 (с возвращением 1-й ступени), 22,8 (без возвращения 1-й ступени)	
Стартовые площадки	SLC-40 (мыс Канаверал) LC-39A (КЦ Кеннеди)	Вывод ПГ на орбиты с наклонением 26°-146°
	SLC-4E (авиабаза Ванденберг)	Вывод ПГ на орбиты с наклонением 70°-104°
Число пусков всего (успешных) / неудачных	299 (290) / 9	Повторных пусков первой ступени 271
Места посадок	Посадочная зона №1	Канаверал

	Морские платформы «Just Read the Instructions», «A Shortfall of Gravitas»	Атлантический океан
	Посадочная зона №4	Ванденберг
	Морская платформа «Of Course, I Still Love You»	Тихий Океан
<b>Характеристики первой ступени</b>		
Сухая масса, т	22,2	
Стартовая масса, т	431,7	
Маршевые двигатели	Merlin 1D+	9 шт.
Характеристики двигателя Тяга, кН	В воздухе 854 В пустоте 914	
Удельный импульс, с	В воздухе 282 В пустоте 311	
Тип топлива	Керосин+ЖК	
Кратность применения	до 23 раз (по состоянию на август 2024 года)	
<b>Характеристики второй ступени</b>		
Сухая масса, т	4	
Стартовая масса, т	111,5	
Маршевый двигатель	Merlin 1D+Vacuum	1 шт.
Характеристики двигателя Тяга, кН	В пустоте 981	
Удельный импульс, с	В пустоте 348	
Тип топлива	Керосин+ЖК	
Стоимость запуска, млн. долл.	50	Коммерческие запуски
	67	Запуски в интересах МО США и др. правительственных заказчиков

Статистика повторных пусков ВРБ РН приведена в таблице 2 [20, 21].

Таблица 2

### Статистика повторных пусков ВРБ РН

Номер ВРБ	Даты пусков (количество суток на подготовку ВРБ к последующему пуску)	Количество пусков	Среднее время подготовки ВРБ к последующему пуску, сутки
V1051	2.03.19, 12.06.19 (102), 29.01.20 (231), 22.04.20 (84), 7.08.20 (107), 18.10.20 (72), 13.12.20 (56), 20.01.21 (38), 14.03.21 (53), 9.05.21 (56), 18.12.21 (223), 19.03.22 (91), 17.07.22 (120), 12.11.22 (118)	14	104
V1060	30.06.20, 3.09.20 (65), 24.10.20 (51), 8.01.21 (76), 4.02.21 (27), 24.03.21 (48), 29.04.21 (36), 30.06.21 (62), 2.12.21 (155), 19.01.22 (48), 3.03.22 (43), 21.04.22 (49), 17.06.22 (57), 8.10.22 (113), 3.01.23 (87), 16.07.23 (194), 24.09.23 (70), 15.02.24 (144), 24.03.24 (38), 28.04.24 (35)	20	74

B1061	16.11.20, 23.04.21 (158), 6.06.21 (44), 29.08.21 (84), 9.12.21 (102), 3.02.22 (56), 1.04.22 (57), 25.05.22 (54), 19.06.22 (25), 12.08.22 (54), 30.12.22 (140), 3.03.23 (63), 27.04.23 (55), 31.05.23 (34), 22.08.23 (83), 21.10.23 (60), 1.12.23 (41), 14.01.24 (44), 23.02.24 (40), 2.05.24 (69), 8.06.24 (37),	21	65
B1062	5.11.20, 17.06.21 (224), 16.09.21 (91), 6.01.22 (112), 8.04.22 (92), 29.04.22 (21), 8.06.22 (40), 24.07.22 (46), 19.08.22 (26), 20.10.22 (62), 28.12.22 (69), 12.02.23 (46). 9.03.23 (25), 27.05.23 (79), 28.07.23 (62), 18.10.23 (82), 28.11.23 (41), 29.01.24 (62), 16.03.24 (47), 13.04.24 (28), 18.05.24 (35)	21	65
B1067	3.06.21, 11.11.21 (161), 19.12.21 (38), 27.04.22 (129), 15.07.22 (79), 19.09.22 (66), 3.11.22 (45), 16.12.22 (43), 26.01.23 (41), 24.03.23 (57), 14.05.23 (51), 18.06.23 (35), 17.08.23 (60), 13.10.23 (57), 22.11.23 (40), 7.01.24 (46), 20.02.24 (44), 31.03.24 (40), 3.05.24 (33), 5.06.24 (33)	20	58
B1071	2.02.22, 17.04.22 (74), 18.06.22 (62), 22.07.22 (34), 5.10.22 (75), 16.12.22 (72), 31.01.23 (46), 17.03.23 (45), 12.06.23 (87), 20.07.23 (38), 12.09.23 (54), 11.11.23 (60), 8.12.23 (27), 10.02.24 (64), 2.04.24 (52), 22.05.24 (50)	16	56
B1073	14.05.22, 29.06.22 (46), 10.08.22 (42), 24.09.22 (45), 11.12.22 (78). 7.02.23 (58), 15.03.23 (36), 19.04.23 (35), 12.07.23 (84), 4.09.23 (54), 8.11.23 (65), 15.01.24 (68), 4.03.24 (49), 7.04.24 (34), 13.05.24 (36),	15	52
B1075	19.01.23, 2.04.23 (73), 10.05.23 (38), 22.06.23 (43), 8.08.23 (47), 25.09.23 (48), 29.10.23 (34), 24.12.23 (56), 29.01.24 (36), 19.03.24 (50),	10	47
B1076	26.11.22, 10.01.23 (45), 27.02.23 (48), 7.04.23 (39), 19.05.23 (42), 24.07.23 (66), 9.09.23 (47), 5.10.23 (26), 12.11.23 (38), 3.01.24 (52), 29.02.24 (57), 30.03.24 (30), 28.04.24 (29), 01.06.24 (34)	14	43

На рисунке 2 представлена динамика повторных пусков ВРБ РН.

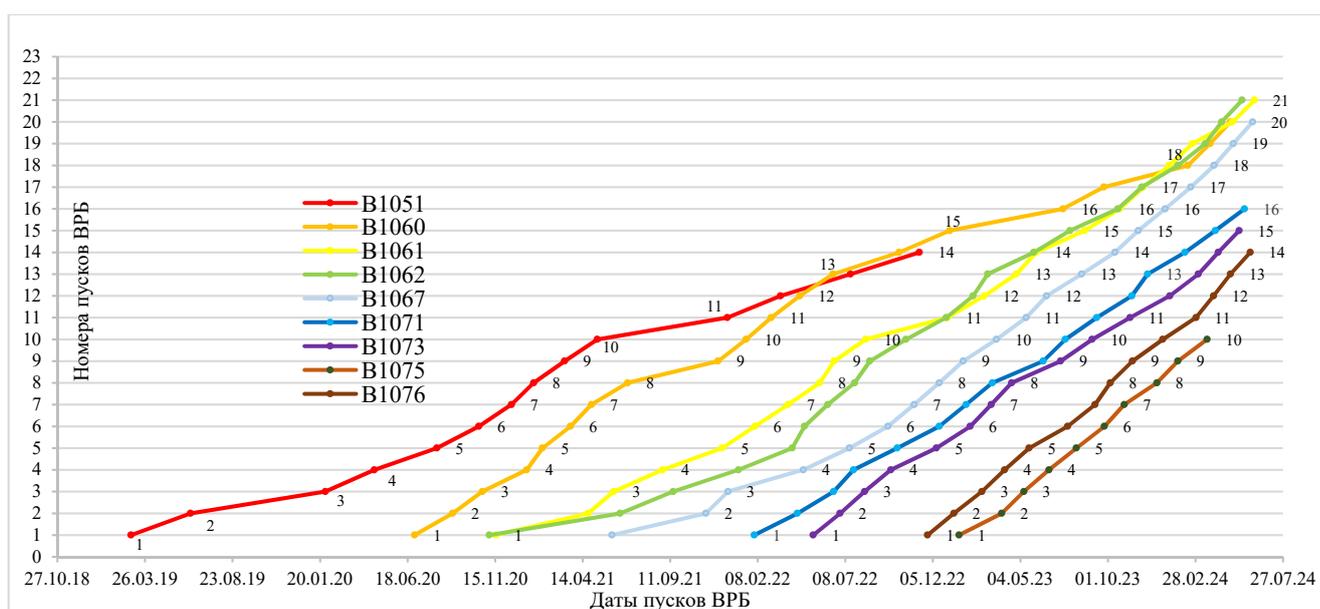


Рисунок 2 – Динамика повторных пусков ВРБ РН

Первый повторный пуск ВРБ В1051 был осуществлен 12 июня 2019 года через 102 дня после посадки на морскую платформу. Всего в период с 2019 по 2022 гг. состоялось 14 повторных пусков данного ВРБ. Средний интервал времени, требуемый на подготовку ВРБ В1051 к последующему пуску, составил 104 дня. ВРБ В1061 и В1062, впервые стартовавшие в ноябре 2020 года, запускались повторно по 22 раза (последний раз – в августе и июне 2024 года соответственно). Средний интервал времени, требуемый на подготовку данных ВРБ к последующим пускам, составил 65 дней.

Диаграмма, отражающая динамику времени подготовки ВРБ РН к последующим пускам, представлена на рисунке 3.

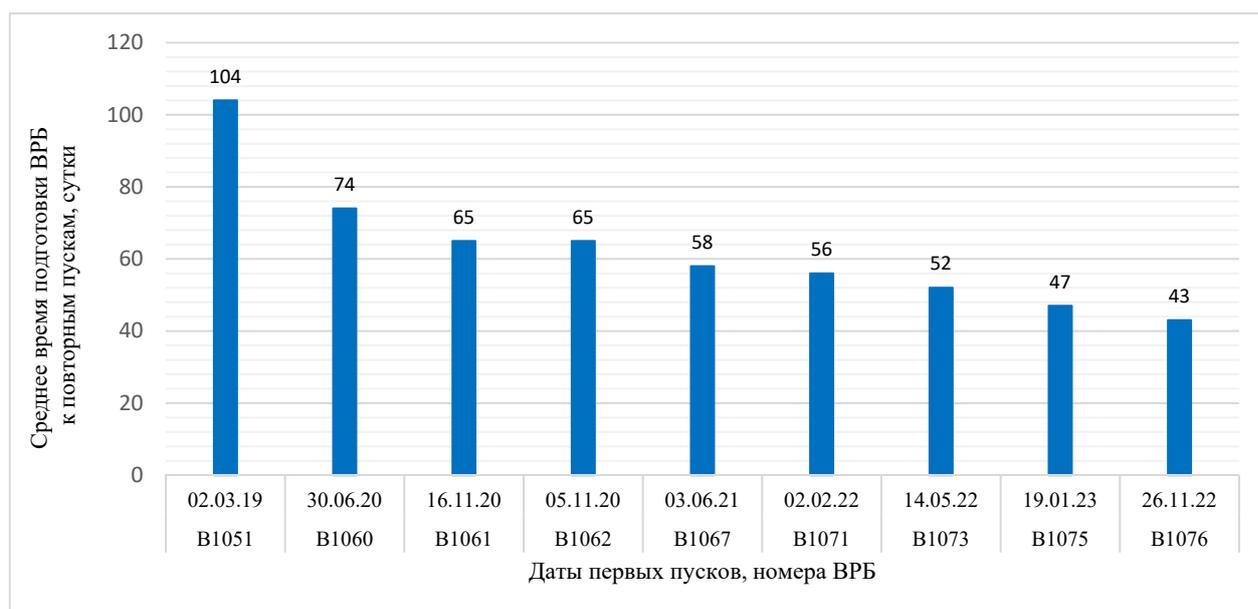


Рисунок 3 – Время подготовки ВРБ РН к последующим пускам (2019-2022 гг.)

Анализ данных, представленных на рисунках 2-3, показывает, что с момента первого повторного пуска РН в марте 2019 года по настоящее время средний период подготовки ВРБ к последующему пуску сократился более, чем в два раза (со 104 суток до 43-47 суток).

## Способ расчета времени подготовки возвращаемых блоков к последующим пускам на примере РН Falcon 9 FT

Для расчета средних временных интервалов, необходимых для подготовки ВРБ РН к повторным пускам, рассматривается следующий способ.

Принимается следующая гипотеза: количество повреждений ВРБ, подлежащих устранению для его повторного пуска, может быть определено с помощью следующего выражения [21]:

$$\Pi = K + \alpha n + \Theta, \quad (1)$$

где  $K$  – количество повреждений (неисправностей) узлов и агрегатов ВРБ, требующих восстановления для последующего пуска;  $\alpha$  – статистический коэффициент возникновения повреждений (неисправностей);  $n$  – число последующих пусков ВРБ;  $\Theta$  – количество случайных (нехарактерных) повреждений (неисправностей).

Время подготовки ВРБ к повторному пуску предлагается определять как:

$$t = \beta \Pi + \tau, \quad (2)$$

где  $\beta$  – коэффициент пропорциональности между количеством устраняемых повреждений (неисправностей) и временем, которое требуется для их устранения;  $\tau$  – время, необходимое для выполнения операций, не связанных с устранением повреждений (неисправностей) ступени, возникших в результате предыдущего пуска.

Примем, что  $t$  – случайная величина, которая согласно закону больших чисел подчиняется нормальному закону распределения. Тогда плотность вероятности повторного пуска РН, которое произойдет через время  $t$ , определяется как [22]:

$$\varphi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad (3)$$

где  $\mu$  – эмпирическое среднее (среднее время между повторными пусками блока);  $\sigma$  – среднее квадратическое отклонение от среднего времени между повторными пусками ВРБ.

Так как в статистике для данной выборки (время между пусками, таблица 2) величины  $\mu$  и  $\sigma$  неизвестны, воспользуемся  $t$ -распределением Стьюдента [22, 23].

Пусть  $t_1 \dots t_n$  – независимые случайные величины, где  $t_n \in N(t, \mu, \sigma)$ ;  $n$  – число повторных пусков. Совокупность  $(t_1 \dots t_n)$  можно понимать как выборку объемом  $n$  из генеральной совокупности, в котором признак  $t$  распределен по нормальному закону  $N(t, \mu, \sigma)$ . Рассмотрим функцию распределения данной выборки:

$$X^2 = \frac{1}{\sigma^2} \sum_{i=1}^n (t_i - \mu)^2 \quad (4)$$

Распределение  $T = X / Y$  с независимыми величинами  $X$  и  $Y$ , где  $X$  – нормальное распределение с законом  $N(X, 0, 1)$ , а  $Y = X/\sqrt{n}$  (с  $n$ -степенями свободы) называется  $t$ -распределением Стьюдента и имеет плотность вероятности повторного

пуска ВРБ, осуществленного через время  $t$ , которая может быть определена на основании следующего выражения [23]:

$$\varphi(t) = \frac{\Gamma(n + \frac{1}{2})}{\sqrt{\pi n} \Gamma(\frac{n}{2})} (1 + \frac{t^2}{n})^{-\frac{n+1}{2}}, \quad (5)$$

где  $\Gamma(x)$  – гамма-функция Эйлера; переменные  $X^2$  и  $t$  – табулированные величины.

В качестве исходных данных рассмотрим выборку из 30 повторных пусков ВРБ РН (таблица 2).

Определим эмпирическое среднее (среднее время между всеми пусками соответствующих ВРБ):

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_n. \quad (6)$$

В результате расчетов величина  $\mu$  равна 61 суткам.

Далее с помощью выражения (4) определим эмпирическую дисперсию для  $n-1$  степени свободы [23, 24]:

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (t_n - \mu)^2. \quad (7)$$

Так как коэффициент Стьюдента для объема выборки  $n = 30$   $t_s = 2$  (табличное значение), а  $\sigma = \frac{S}{\sqrt{n}}$ , среднее ожидаемое время между всеми повторными пусками соответствующих ВРБ с вероятностью 95 % будет находиться во временном интервале  $t$ :

$$t = \mu \pm \Delta\mu, \quad (8)$$

$$\text{где } \Delta\mu = t_S \frac{S}{\sqrt{n}} = 10.$$

Значение ожидаемого временного интервала между повторными пусками ВРБ при данной выборке, рассчитанное на основе предлагаемого способа, составит величину  $t$ , равную  $61 \pm 10$  суток, что подтверждается анализом представленных статистических данных (таблица 3, рисунок 4).

Таблица 3

**Среднее время на подготовку к повторным пускам ВРБ РН**

Номер ВРБ	Время на подготовку ВРБ к повторному пуску, сут	Количество повторных пусков ВРБ	Среднее время на подготовку ВРБ к повторному пуску, сут
2021			
В 1051	370	4	93
В 1060	404	5	81
В 1061	388	4	97
В 1062	315	2	158
В 1067	199	2	100
В 1071	0	0	0
В 1073	0	0	0
В 1075	0	0	0
В 1076	0	0	0
Итого для всех ВРБ	1676	17	99
2022			
В 1051	329	3	110
В 1060	310	5	62
В 1061	386	6	65
В 1062	468	8	59
В 1067	362	5	73
В 1071	317	5	64
В 1073	211	4	53
В 1075	0	0	0
В 1076	0	0	0
Итого для всех ВРБ	2383	36	67

2023			
В 1051	0	0	0
В 1060	351	3	117
В 1061	336	6	56
В 1062	335	6	56
В 1067	341	7	49
В 1071	357	7	51
В 1073	332	6	56
В 1075	283	6	48
Итого для всех ВРБ	2686	49	55

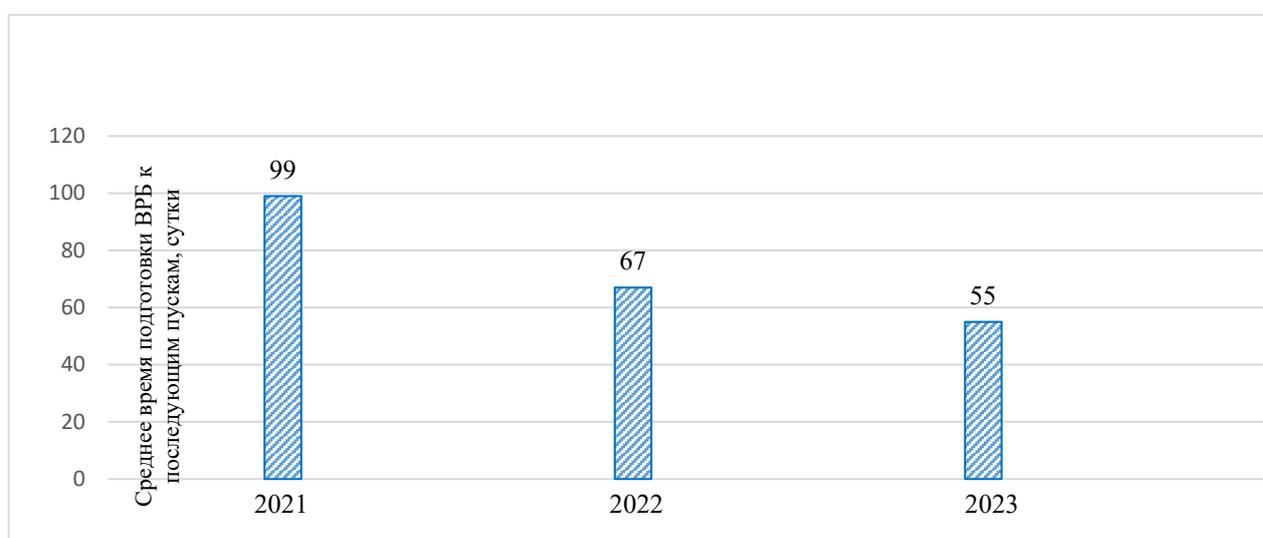


Рисунок 4 – Время подготовки ВРБ РН к последующим пускам (2021-2023 гг.)

Анализ данных показывает, что за период 2021-2023 годов компания SpaceX почти в два раза сократила среднее время подготовки ВРБ РН к последующим пускам, что обусловлено следующими факторами:

- значительным наращиванием мощностей компании по производству узлов и агрегатов РН, необходимых для замены составных частей возвращаемых блоков;
- повышением надежности конструкций ВРБ РН и, как следствие, минимизацией объема выполняемых на них ремонтно-восстановительных работ;

– применением новейших и совершенствованием существующих технологий в регламентных работах, проводимых на ВРБ при их подготовке к повторным пускам.

**Заключение.** Рассмотренный в работе способ расчета средних временных интервалов, требуемых для подготовки ВРБ РН к повторным пускам, позволит прогнозировать возможности участников космической деятельности, использующих многоразовые РКН, по развертыванию, наращиванию и восполнению орбитальных группировок.

Проведено сравнение выполненных с помощью предлагаемого способа расчетов величин временных интервалов с имеющимися статистическими данными. Расхождение результатов расчетов с реальными данными находится в пределах статистической погрешности.

Таким образом, представленный способ может применяться при разработке методов, моделей, алгоритмов оценивания времени подготовки ВРБ к повторным пускам, а также при проведении оценки эффективности применения многоразовых РН различных классов по назначению.

### **Список источников**

1. Болдырев К.Б., Грибакин В.А., Карчин А.Ю., Пирогов С.Ю., Султанов А.Э. Ракеты-носители. – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2018. – 385 с.
2. Клименко Н.Н., Каткалов В.Б., Морозова М.Л. Перспективы многоразовых транспортных космических систем. Часть II // Воздушно-космическая сфера. 2022. № 1. С. 72-83.

3. Медведев А.А. Предложения по повышению конкурентоспособности ракет-носителей среднего и тяжелого классов за счет применения многоразовых элементов в отечественных средствах выведения // Космонавтика и ракетостроение. 2018. № 3 (102). С. 111-121.
4. Карчин А.Ю., Болдырев К.Б., Султанов А.Э., Прокопенко Е.А. Основы устройства ракет космического назначения. – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2019. – 180 с.
5. Хуснетдинов И.Р. Анализ тенденций развития отечественных и зарубежных ракет-носителей сверхтяжелого класса // Труды МАИ. 2014. № 73. <https://trudymai.ru/published.php?ID=48480>
6. Zhang M., Xu D., Yue S., Tao H. Design and dynamic analysis of landing gear system in vertical takeoff and vertical landing reusable launch vehicle. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers // Journal of Aerospace Engineering, October 2018, vol. 233. DOI: [10.1177/0954410018804093](https://doi.org/10.1177/0954410018804093)
7. Horvath T.J., Aubuchon V.V., Rufer S., Campbell C., Schwartz R., Mercer, C.D., Ross M. Advancing Supersonic Retro-Propulsion Technology Readiness: Infrared Observations of the SpaceX Falcon 9 First Stage // AIAA SPACE and Astronautics Forum and Exposition, September 2017. DOI: [10.2514/6.2017-5294](https://doi.org/10.2514/6.2017-5294)
8. Коротеев А.С., Нестеров В.М., Елисеев И.О., Балашова А.В. Эффективность использования и проблемы спасения первых ступеней ракет-носителей // Полет. 2018. № 2. С. 3-11.
9. Ганиев Т.А., Карякин В.В. Космическая политика мировых и региональных держав. – М.: Архонт, 2020. – 175 с.

10. Buchholz K. The Countries with the Most Satellites in Space. URL: <https://www.statista.com/chart/17107/countries-with-the-most-satellites-in-space/>
11. Краснослободцев В.П., Кузьмин Ю.Н., Раскин А.В., Тарасов И.В., Байкин В.А. Компания «Space-X» и программа коммерческих пилотируемых полётов США // Двойные технологии. 2020. № 3 (92). С. 16-19.
12. Абельжанов Р.Н., Ахмедьяров А.Г. Анализ восстановительных операций многоразовой ступени ракеты Falcon 9 для повторного запуска // XVI Всероссийская научно-техническая конференция «Проблемы разработки, изготовления и эксплуатации ракетно-космической техники и подготовки инженерных кадров для авиакосмической отрасли» (Омск, 12–13 апреля 2022): сборник трудов. – Омск: Омский государственный технический университет, 2022. С. 8-14.
13. Соколов Н.Л. Метод расчета приближенно-оптимальных траекторий движения космического аппарата на активных участках выведения на спутниковые орбиты // Труды МАИ. 2014. № 75. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=49689>
14. Кретов А.С., Чижухин В.Н., Ковалевский М.М., Мехоношин Ю.Г. К обоснованию выбора способа спасения блоков ракет-носителей // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2021. № 1. С. 3-11.
15. Кузнецов Ю.Л., Украинцев Д.С. Анализ влияния схемы полёта ступени с ракетно-динамической системой спасения на энергетические характеристики двухступенчатой ракеты-носителя среднего класса // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С. П. Королёва. 2016. № 1. С. 73-80.

16. Пшеничников И.В, Смирнов Д.П., Дошанова Д.Р. Экономические аспекты перехода к многоразовым средствам выведения // Экономика космоса. 2022. № 1. С. 40-44.
17. Харланов А.С. Влияние SpaceX на пилотируемую отечественную космонавтику и рынок коммерческих запусков // Инновации и инвестиции. 2021. № 3. С. 340-344.
18. Тимофеев П.М. Сравнение методов возвращения первой ступени многоразовой ракеты // Труды МАИ. 2020. № 113. <https://trudymai.ru/published.php?ID=118079>. DOI: [10.34759/trd-2020-113-06](https://doi.org/10.34759/trd-2020-113-06)
19. Гостев А.Ю., Колосов В.А., Медведев А.А., Назаров С.С., Шохов Г.В. Перспективный способ спасения многоразового ускорителя первой ступени ракет-носителей вертикальной посадки // Космонавтика и ракетостроение. 2022. № 3 (126). С. 51-60.
20. Лукьянова С. Д. Выбор способа спасения многоразового ускорителя первой ступени ракеты-носителя "Falcon-9" // СXXXIX студенческая международная научно-практическая конференция «Научное сообщество студентов XXI столетия. Технические науки» (Новосибирск, 04 июля 2024): сборник трудов. – Новосибирск: Изд-во Сибирская академическая книга, 2024. С. 57-63.
21. Стельмах С.Ф., Андронов В.Г., Коптев Д.С. Методика оценивания времени подготовки возвращаемой ступени ракеты космического назначения к повторному пуску на примере ракеты-носителя Falcon 9 FT // Известия Юго-Западного государственного университета. 2021. № 3. С. 160-179.
22. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: КНОРУС, 2010. – 664 с.

23. Арнольд В.И. Группы Эйлера и арифметика геометрических прогрессий. – М.: МЦНМО, 2003. – 44 с.

24. Lange K., Little R., Taylor Jeremy M.G. Robust Statistical Modeling Using the t Distribution // Journal of the American Statistical Association, 1989, no. 408, pp. 881-896.  
DOI: [10.1080/01621459.1989.10478852](https://doi.org/10.1080/01621459.1989.10478852)

## References

1. Boldyrev K.B., Gribakin V.A., Karchin A.Yu., Pirogov S.Yu., Sultanov A.E. *Rakety-nositeli* (Launch vehicles), Saint Petersburg, VKA imeni A.F. Mozhaiskogo, 2018, 385 p.
2. Klimenko N.N., Kat'kalov V.B., Morozova M.L. Perspektivy mnogorazovykh transportnykh kosmicheskikh sistem. Chast' II, *Vozdushno-kosmicheskaya sfera*, 2022, no. 1, pp. 72-83.
3. Medvedev A.A. Predlozheniya po povysheniyu konkurentnosposobnosti raket-nositelei srednego i tyazhelogo klassov za schet primeneniya mnogorazovykh elementov v otechestvennykh sredstvakh vyvedeniya, *Kosmonavtika i raketostroenie*, 2018, no. 3 (102), pp. 111-121.
4. Karchin A.Yu., Boldyrev K.B., Sultanov A.E., Prokopenko E.A. *Osnovy ustroystva raket kosmicheskogo naznacheniya* (Basics of space rocket design), Saint Petersburg, VKA imeni A.F. Mozhaiskogo, 2019, 180 p.
5. Khusnetdinov I.R. *Trudy MAI*, 2014, no. 73. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=48480>
6. Zhang M., Xu D., Yue S., Tao H. Design and dynamic analysis of landing gear system in vertical takeoff and vertical landing reusable launch vehicle. Proceedings of the

Institution of Mechanical Engineers, *Journal of Aerospace Engineering*, October 2018, vol. 233. DOI: [10.1177/0954410018804093](https://doi.org/10.1177/0954410018804093)

7. Horvath T.J., Aubuchon V.V., Rufer S., Campbell C., Schwartz R., Mercer, C.D., Ross M. Advancing Supersonic Retro-Propulsion Technology Readiness: Infrared Observations of the SpaceX Falcon 9 First Stage, *AIAA SPACE and Astronautics Forum and Exposition*, September 2017. DOI: [10.2514/6.2017-5294](https://doi.org/10.2514/6.2017-5294)

8. Koroteev A.S., Nesterov V.M., Eliseev I.O., Balashova A.V. *Polet*, 2018, no. 2, pp. 3-11.

9. Ganiev T.A., Karyakin V.V. *Kosmicheskaya politika mirovykh i regional'nykh derzhav*. (Space policy of world and regional powers), Moscow, Arhont, 2020, 175 p.

10. Buchholz K. *The Countries with the Most Satellites in Space*. URL: <https://www.statista.com/chart/17107/countries-with-the-most-satellites-in-space/>

11. Krasnoslobodtsev B.P., Kuz'min Yu.N., Raskin A.V., Tarasov I.V., Baikin V.A. *Dvoynye tekhnologii*, 2020, no. 3 (92), pp. 16-19.

12. Abel'zhanov R.N., Akhmed'yarov A.G. *XVI Vserossiiskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya «Problemy razrabotki, izgotovleniya i ekspluatatsii raketno-kosmicheskoi tekhniki i podgotovki inzhenernykh kadrov dlya aviakosmicheskoi otrasli»*: sbornik trudov. Omsk, Omskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2022, pp. 8-14.

13. Sokolov N.L. *Trudy MAI*, 2014, no. 75. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=49689>

14. Kretov A.S., Chizhukhin V.N., Kovalevskii M.M., Mekhonoshin Yu.G. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Aviatsionnaya tekhnika*. 2021, no. 1, pp 3-11.

15. Kuznetsov Yu.L., Ukraintsev D.S. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta imeni akademika S. P. Koroleva*, 2016, no. 1, pp. 73-80.
16. Pshenichnikov I.V, Smirnov D.P., Doshchanova D.R. *Ekonomika kosmosa*, 2022, no. 1, pp. 40-44.
17. Kharlanov A.S. *Innovatsii i investitsii*, 2021, no. 3, pp. 340-344.
18. Timofeev P.M. *Trudy MAI*, 2020, no. 113. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=118079>. DOI: [10.34759/trd-2020-113-06](https://doi.org/10.34759/trd-2020-113-06)
19. Gostev A.Yu., Kolosov V.A., Medvedev A.A., Nazarov S.S., Shokhov G.V. *Kosmonavtika i raketostroenie*, 2022, no. 3 (126), pp. 51-60.
20. Luk'yanova S. D. *CXXXIX studencheskaya mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Nauchnoe soobshchestvo studentov XXI stoletiya. Tekhnicheskie nauki»*: sbornik trudov. Novosibirsk, Izd-vo Sibirskaya akademicheskaya kniga, 2024, pp. 57-63.
21. Stel'makh S.F., Andronov V.G., Koptev D.S. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta*, 2021, no. 3, pp. 160-179.
22. Venttsel' E.S. *Teoriya veroyatnostei (Probability theory)*, Moscow, KNORUS, 2010, 664 p.
23. Arnol'd V.I. *Gruppy Eilera i arifmetika geometricheskikh progressii (Euler groups and arithmetic progressions)*, Moscow, MCNMO, 2003, 44 p.
24. Lange K., Little R., Taylor Jeremy M.G. Robust Statistical Modeling Using the t Distribution, *Journal of the American Statistical Association*, 1989, no. 408, pp. 881-896. DOI: [10.1080/01621459.1989.10478852](https://doi.org/10.1080/01621459.1989.10478852)

Статья поступила в редакцию 25.08.2024

Одобрена после рецензирования 26.08.2024

Принята к публикации 25.10.2024

The article was submitted on 25.08.2024; approved after reviewing on 26.08.2024;  
accepted for publication on 25.10.2024