

Исследование траектории спуска в агрегатах экстренной эвакуации космонавтов на стартовых комплексах

© Б.М. Новожилов

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Рассмотрена актуальная проблема безопасности работы экипажа пилотируемого космического корабля и технического персонала в период предстартовой подготовки пилотируемых запусков на космических стартовых комплексах. Проанализированы известные разработки агрегатов экстренной эвакуации, предназначенных для спасения людей в аварийных ситуациях, выполненные в РФ и США. Показано, что в перспективных российских космических ракетных комплексах целесообразно применение агрегатов экстренной эвакуации рельсового типа с вагонеткой, которая движется по направляющей системе, выполненной в виде кривой наискорейшего спуска — брахистохроны. Проведены расчеты, подтверждающие возможность такой системы обеспечивать минимальное время спуска и отвода вагонетки с людьми на безопасное расстояние от стартового сооружения и создавать благоприятные условия для гашения скорости движения вагонетки на конечном участке траектории спуска. Впервые выполнено исследование траектории спуска на основе брахистохроны применительно к агрегатам экстренной эвакуации, позволившее определить параметры направляющей системы агрегатов экстренной эвакуации. Даны рекомендации для перспективного проектирования направляющих систем.

Ключевые слова: стартовый комплекс, безопасность, экстренная эвакуация, траектория спуска, брахистохрона

Введение. С развитием пилотируемой космонавтики предъявляют все более высокие требования к наземной космической инфраструктуре ракетно-космических комплексов, особенно в области обеспечения безопасности труда. Работа людей при проведении предстартовой подготовки ракеты космического назначения на космическом стартовом комплексе сопряжена с повышенной опасностью, связанной с особенностями построения стартового комплекса и его эксплуатацией. Так, при выполнении операций подготовки к пуску пилотируемых космических кораблей на башне обслуживания возможно возникновение ситуаций, когда требуется экстренная эвакуация экипажа пилотируемого космического корабля и технического персонала [1]. Это обуславливает необходимость создания специальных объектов наземной космической инфраструктуры для спасения космонавтов и персонала в случае аварийной ситуации на стартовом комплексе.

Важность решения этой задачи возрастает в связи с коммерциализацией космических полетов [2] и развитием нового перспективного направления пилотируемой космической отрасли, связанного с полетами в космос непрофессиональных космонавтов, — космического туризма [3, 4].

Специальным объектом наземной космической инфраструктуры, который предназначен для экстренной эвакуации людей с высотных агрегатов стартового сооружения в случае аварийной ситуации, возникшей на этапе предстартовой подготовки, является агрегат экстренной эвакуации (далее — агрегат). С его помощью осуществляется быстрый вывод людей в безопасное место. Разработка агрегатов для космических стартовых комплексов — актуальная задача мирового масштаба.

Цель настоящей работы заключается в рассмотрении возможности использования кривой наискорейшего спуска применительно к направляющим системам агрегата рельсового типа на основе анализа существующих систем экстренной эвакуации космонавтов и технического персонала с башни обслуживания стартового комплекса.

Анализ проблемы. Общий принцип действия агрегатов основан на гравитационном спуске экипажа и персонала в защищенное сооружение стартового комплекса или на безопасное расстояние от него. Система экстренной эвакуации может входить в состав агрегата посадки и эвакуации космонавтов или является отдельным агрегатом.

При анализе различных систем экстренной эвакуации их положительные и отрицательные характеристики, в том числе требования, которым они должны удовлетворять, рассматриваются комплексно. Основное требование — максимальное сокращение времени эвакуации людей [5].

Опыт построения систем экстренной эвакуации с высотных агрегатов стартового комплекса в России и США показывает, что в стационарных системах агрегат может быть выполнен либо на основе прямолинейного наклонного желоба со спуском в защищенное сооружение (стартовый комплекс многоразовой транспортной космической системы «Энергия» — «Буран») [6, с. 112], либо на основе тросовой системы с отводом экипажа на безопасное расстояние (стартовый комплекс Shuttle) [7]. Для передвижных башен обслуживания (например, стартовый комплекс «Союз») в агрегате можно применять вертикальный «эластичный чулок». Необходимая автономность таких систем достигается вследствие использования гравитации — спуска под действием собственной массы эвакуируемых людей.

В результате сравнительного анализа вариантов построения стационарных агрегатов установлено, что применительно к климатиче-

ским условиям РФ более предпочтительно использовать наклонный желоб, однако этому варианту свойственны существенные недостатки. Основным недостатком — сложность гашения скорости эвакуируемого человека в конце участка спуска по желобу при наличии смазывания поверхности скольжения. Замеры скорости при испытаниях наземного комплекса эвакуации на стартовом комплексе многоуровневой транспортной космической системы «Энергия» — «Буран» не проводились, но участвовавшие в испытаниях космонавты отмечали значительную силу удара о стенку, покрытую специальными матами, при гашении энергии движения внутри защищенного сооружения. Для космических туристов это может стать непреодолимым препятствием на пути к космическому путешествию. Для агрегата посадки и эвакуации космонавтов стартового комплекса многоуровневой транспортной космической системы «Энергия» — «Буран» полное время спуска составило ~15 с при длине желоба ≈100 м.

Тросовые системы позволяют разместить тормозные устройства в конце траектории спуска и значительно снизить скорость практически до нуля. Однако при этом увеличивается длина тросов и время эвакуации, а склонность тросовой системы к провисанию может повлечь за собой возникновение нежелательных колебаний тросов. Установка натяжителей тросов при их длине, достигающей нескольких сотен метров, малоэффективна.

На основе тросовой системы эвакуации для стартового комплекса Shuttle в США разработана модернизированная тросовая система для стартового комплекса Atlas V, которая показала следующие результаты: спуск одного астронавта с высоты 51 м на расстояние приблизительно 400 м длился 30 с с максимальной скоростью около 65 км/ч [8].

Достоинства обоих вариантов построения агрегатов можно объединить в рельсовой конструкции, обеспечивающей необходимую жесткость направляющей системы и возможность установки тормозных устройств в конце траектории движения. К настоящему времени схема агрегатов на основе рельсовой направляющей системы не реализована.

В этой связи интерес представляют агрегаты рельсового типа с вагонеткой, движущейся по направляющей системе, выполненной в виде кривой наискорейшего спуска — брахистохроны.

Проведем анализ свойств брахистохроны применительно к системам спуска агрегата в целях получения расчетных зависимостей и рекомендаций, необходимых для проектирования агрегатов экстренной эвакуации рельсового типа на основе брахистохроны.

Основная часть. Рельсовый агрегат можно представить как гравитационное устройство, состоящее из направляющей системы, вагонеток и устройства торможения [5]. Направляющая система агрегата

имеет следующие участки (рис. 1): начало движения вагонетки (начальный участок), участок разгона, переходный участок, участок движения с постоянной скоростью, торможение (конечный участок).

Начальный участок А обеспечивает доступ к участку разгона Б, имеющему угол наклона α и предназначенному для спуска под действием силы тяжести. Конечный участок обеспечивает торможение и остановку вагонетки. Сопряжение участка разгона и конечного участка обеспечивается переходным участком В.

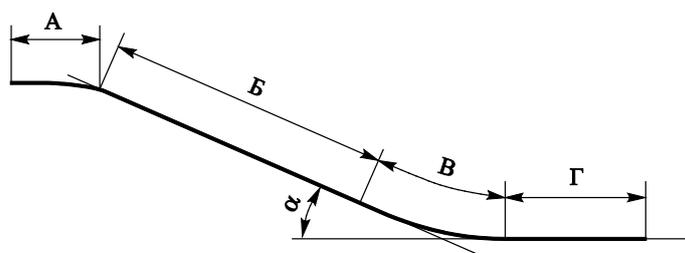


Рис. 1. Профиль направляющей системы с прямолинейным участком разгона:

А — начальный участок; Б — участок разгона; В — переходный участок; Г — конечный участок

Подобное строение имеют детские горки, представляющие собой гравитационный спуск по наклонному транспортирующему желобу линейного профиля. Общие требования к конструкции таких горок применительно к детским аттракционам регламентированы ГОСТ 52168–2012.

Преобразование энергии гравитации в кинетическую энергию движения осуществляется на участке разгона, который в отличие от прямолинейной траектории наклонного желоба агрегата посадки и эвакуации космонавтов стартового комплекса многоразовой транспортной космической системы «Энергия» — «Буран» может иметь любую траекторию, задаваемую рельсовой направляющей системой.

В этой связи интерес представляет траектория спуска, в которой участок разгона выполнен в виде кривой наискорейшего спуска — брахистохроны, представляющей собой дугу циклоиды [9, с. 59] (ACB), которая образуется при качении производящего круга с радиусом r по направляющей прямой AEB без скольжения при изменении угла поворота круга φ от 0 до 2π (рис. 2). Брахистохроной является любой участок циклоиды — от ее начала в точке A до ее конца в точке C (C' , C'').

Тем не менее соотношение (2) будет всегда справедливо при одинаковых условиях движения.

Таким образом, замена прямолинейной траектории спуска на брахистохрону в рассматриваемом агрегате в общем случае не снизит конечную скорость, но позволит выиграть время спуска. Предпочтительнее вариант траектории в виде половины циклоиды (вариант AC на рис. 2), который создает благоприятные условия для гашения скорости движения экипажа на конечном участке CD направляющей системы, в то время как прямолинейный спуск нуждается в наличии переходного участка, необходимого для перехода от равноускоренного движения к движению с постоянной скоростью. Вариант AC'' (см. рис. 2) может дать дополнительный эффект в виде снижения конечной скорости спуска. Но, как следует из выражения (1), для снижения скорости, например, вдвое, необходимо, чтобы в точке C'' высота h была в 4 раза меньше, чем в точке C .

Для построения направляющей системы агрегата экстренной эвакуации на основе брахистохроны использовались свойства циклоиды. Для этого было задано уравнение кривой, соединяющей точку A с точкой C , как функция $y = f(x)$. Тогда с помощью методов математического анализа получаем уравнение для перемещения по брахистохроне и времени спуска по ней (без учета трения) [10, с. 62]:

$$ds = \sqrt{1 + (f'(x))^2} dx, \quad (3)$$

где ds — малое приращение кривой.

Учитывая выражение (1) и допуская, что скорость движения на малом участке постоянная $v = \sqrt{2gf(x)}$, получаем приблизительно равное время dt , требующееся для прохождения этого участка:

$$dt \approx \frac{\sqrt{1 + (f'(x))^2}}{\sqrt{2gf(x)}} dx. \quad (4)$$

Для использования соотношений (3) и (4) находим функцию $y = f(x)$. Для циклоиды такой функции не существует. Известна аналитическая запись обратной функции $x = f(y)$, которую сложно применять в приложениях. Поэтому на практике используют параметрическую форму связи координат циклоиды:

$$\left. \begin{aligned} x &= r(\varphi - \sin \varphi) \\ y &= r(1 - \cos \varphi) \end{aligned} \right\}, \quad (5)$$

где угол поворота φ является параметром функции и изменяется в пределах $0 \dots 2\pi$ для одной арки циклоиды с радиусом производящего круга r .

Для практического применения системы (5) следует связать аргумент x с параметром φ путем подстановки $x = x(\varphi)$. Проведя несложные преобразования с учетом системы (5), вместо соотношений (3) и (4) получаем искомые зависимости.

Длина брахистохроны в пределах одной арки циклоиды определяется выражением

$$\begin{aligned} S &= \int_x \sqrt{1 + (y'(x))^2} dx = r \int_{\varphi} \sqrt{(1 - \cos \varphi)^2 + (\sin \varphi)^2} d\varphi = \\ &= \left| -4r \cos \frac{\varphi}{2} \right|_{\varphi_1}^{\varphi_2}, \end{aligned} \quad (6)$$

где φ_1 и φ_2 — соответственно начальный и конечный углы поворота производящего круга.

Для длины брахистохроны, равной половине циклоиды, выражение (6) дает значение $4r$ при $\varphi_1 = 0$ и $\varphi_2 = \pi$.

Для вычисления времени спуска по брахистохроне следует определить функцию $f(x)$ в выражении (4). В координатах y, φ она дается зависимостью [10, с. 26]

$$y = 2r \left(\sin \frac{\varphi}{2} \right)^2. \quad (7)$$

С учетом уравнения (7) время спуска по брахистохроне определяется выражением

$$T \approx r \int_{\varphi} \sqrt{\frac{(1 - \cos \varphi)^2 + (\sin \varphi)^2}{4gr \left(\sin \frac{\varphi}{2} \right)^2}} d\varphi = \left| \sqrt{\frac{r}{g}} \varphi \right|_{\varphi_1}^{\varphi_2}. \quad (8)$$

Для определения текущего значения скорости спуска используется конечное равенство из выражения (1) с подстановкой вместо h координаты y , определяемой зависимостью (7):

$$v_{\text{брах}} = \sqrt{2gy} = \sqrt{4gr \left(\sin \frac{\varphi}{2} \right)^2} = 2 \sin \frac{\varphi}{2} \sqrt{gr}. \quad (9)$$

Ускорение, вызывающее движение тела в гравитационном спуске по брахистохроне $a_{\text{брах}}$, направлено по касательной в каждой ее точке (рис. 3) и

$$a_{\text{брах}} = g \sin \alpha, \quad (10)$$

где α — угол наклона касательной.

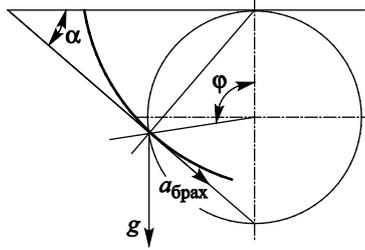


Рис. 3. Определение локального ускорения на брахистохроне

Величина угла α в соотношении (10) определяется равенством $\alpha = \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\varphi}{2}\right)$ [10, с. 22], тогда

$$a_{\text{брах}} = g \sin\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\varphi}{2}\right) = g \cos \frac{\varphi}{2}. \quad (11)$$

Из выражения (11) следует, что при $\varphi = 0$ касательная совпадает с направлением ускорения свободного падения, т. е. угол наклона $\alpha = 90^\circ$, что недопустимо с точки зрения безопасности спуска. Согласно рекомендациям ГОСТ 52168–2012, средний угол наклона участка скольжения на детской горке не должен превышать 40° , а максимальный угол наклона отдельного элемента участка скольжения — 60° .

С учетом быстрого уменьшения локального угла наклона по краям циклоиды можно принять значение 60° как начальное для участка разгона агрегата (рис. 4).

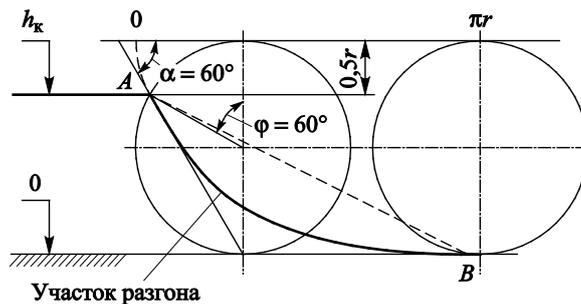


Рис. 4. Профиль направляющей системы агрегата экстренной эвакуации с укороченной брахистохроной ($\alpha_{\text{нач}} = 60^\circ$)

Здесь (см. рис. 4) уровень 0 соответствует уровню площадки стартового комплекса, а уровень h_k — уровню пилотируемого корабля на ракете-носителе. Штриховая линия AB показывает наклонный прямолинейный желоб как сравнительный вариант участка разгона.

Получены результаты расчетов параметров участка разгона на основе брахистохроны с начальным углом наклона $\alpha_{\text{нач}} = 60^\circ$ и наклонного желоба с одинаковыми начальными и конечными коор-

динатами $A(0,181r; 0,5r)$ и $B(\pi r; 2r)$ (табл. 1). Высота h_k принята равной 45 м. В расчетах параметров наклонного желоба использовались формулы прямолинейного равноускоренного движения.

Таблица 1

Брахистохрона с начальным углом наклона $\alpha_{нач} = 60^\circ$

Параметр	Брахистохрона	Прямолинейный желоб
Радиус круга, м	30	—
Длина трассы, м	104	100
Время спуска, с	3,7	6,7
Конечная скорость, м/с	29,7	29,7

Анализ полученных результатов показывает, что по длине трассы спуска брахистохрона и прямолинейный желоб различаются мало, однако по времени спуска различие между результатами расчетов почти вдвое. Обращает на себя внимание высокое значение конечной скорости спуска. Вместе с тем следует иметь в виду, что это значение чисто теоретическое и предельное, поскольку не учитывает факторов торможения движения. Точный расчет конечной скорости спуска по брахистохроне осложняется нелинейным характером изменения ускорения и силы трения в процессе движения. В случае движения в прямолинейном желобе-склизе можно учесть силу трения только при отсутствии смазки, наличие которой делает задачу нелинейной вследствие зависимости трения скольжения по смазанной поверхности от скорости. Проведение экспериментальных исследований на моделях позволит получить более точные данные для расчетных параметров.

Особый интерес представляет влияние начального угла наклона $\alpha_{нач}$ брахистохроны на параметры участка разгона. Для оценки этого влияния были выполнены расчеты брахистохроны и прямолинейного желоба спуска при начальном угле наклона $\alpha_{нач} = 40^\circ$ при той же высоте h_k (рис. 5). Координаты точки B остались прежними, а координаты точки A изменились: $x_A = 0,762r$, $y_A = 1,174r$ (табл. 2).

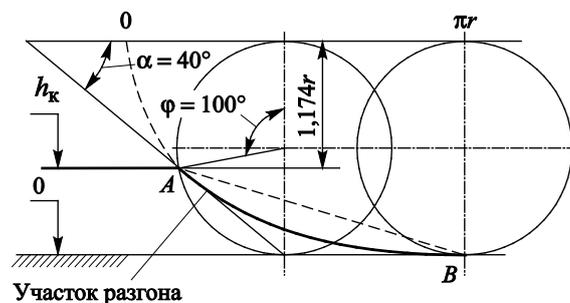


Рис. 5. Профиль направляющей системы агрегата экстренной эвакуации с укороченной брахистохроной ($\alpha_{нач} = 40^\circ$)

Брахистохрона с начальным углом наклона $\alpha_{нач} = 40^\circ$

Параметр	Брахистохрона	Прямолинейный желоб
Радиус круга, м	54,5	—
Длина трассы, м	140	137
Время спуска, с	6,1	9,2
Конечная скорость, м/с	29,7	29,7

Результаты расчетов показали, что уменьшение начального угла $\alpha_{нач}$ наклона в 1,5 раза сопровождается увеличением длины трассы и соответствующим увеличением времени спуска также приблизительно в 1,5 раза. При этом радиус производящего круга увеличивается почти вдвое. Значение конечной скорости не изменилось, поскольку конечная скорость определяется высотой эвакуации h_k .

Заключение. Проведенное впервые исследование свойств брахистохроны применительно к построению агрегатов экстренной эвакуации показывает, что использование этой кривой в профиле направляющей системы агрегатов позволяет значительно выиграть время при спуске по сравнению с прямолинейной траекторией. Кроме того, брахистохрона не требует переходного участка после участка разгона, который необходим в случае использования прямолинейного желоба для выхода на участок торможения.

Полученные расчетные зависимости можно использовать при проектировании рельсовых агрегатов экстренной эвакуации для перспективных ракет космического назначения тяжелого и сверхтяжелого класса.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Бармин И.В., Неустроев В.Н., Лебедева Л.И. Актуальные вопросы обеспечения наземной безопасности при создании комплексов для пуска ракет с пилотируемым космическим кораблем. *Известия РАН*, 2016, № 4 (94), с. 79–86.
- [2] Крикалёв С.К., Сапрыкин О.А. Пилотируемая лунная инфраструктура и коммерциализация полетов к Луне. *Пилотируемые полеты в космос*, 2016, № 1 (18), с. 47–62.
- [3] Гониянц С.А., Ковинский А.А. Направленность физической подготовки космических туристов в рамках перспективных коммерческих космических программ. *Пилотируемые полеты в космос*, 2016, № 4 (21), с. 118–128.
- [4] Крючков Б.И., Харламов М.М., Курицын А.А. Особенности подготовки непрофессиональных космонавтов к полетам на МКС. *Пилотируемые полеты в космос*, 2015, № 2 (15), с. 93–101.
- [5] Курицын А.А., Ярополов В.И. Выбор варианта агрегата посадки и эвакуации космонавтов. *Пилотируемые полеты в космос*, 2017, № 4 (25), с. 54–72.

- [6] Бармин И.В., ред. *Технологические объекты наземной инфраструктуры ракетно-технической техники: инж. пособие*. В 2 кн. Кн. 2. Москва, Полиграфикс РПК, 2006, 376 с.
- [7] Klotz I. Zip Line to Safety: ULA Installs Launchpad Escape System for Astronauts. *Space* URL: <https://www.space.com/36344-zip-line-emergency-escape-system-astronauts.html> (дата обращения 31.08.2019).
- [8] Crew Emergency Egress System Installed at Atlas V Launch Pad ahead of Starliner Missions. *Spaceflight101.com* URL: <http://spaceflight101.com/crew-emergency-egress-system-installed-at-slc-41> (дата обращения 30.08.2019).
- [9] Тихомиров В.М. *Рассказы о максимумах и минимумах*. 2-е изд., испр. Москва, МЦНМО, 2006, 200 с.
- [10] Берман Г.Н. *Циклоида*. Москва, Наука, 1980, 112 с.

Статья поступила в редакцию 20.09.2019

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Новожилов Б.М. Исследование траектории спуска в агрегатах экстренной эвакуации космонавтов на стартовых комплексах. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2019, вып. 10. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2019-10-1924>

Новожилов Борис Михайлович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Стартовые ракетные комплексы» факультета «Специальное машиностроение» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: автоматизация технологических процессов.
e-mail: novozhilovbm@bmstu.ru

Study of the descent trajectory in the units of emergency evacuation of cosmonauts at launch complexes

© B.M. Novozhilov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

Ensuring the safety of the manned spacecraft crew and technical personnel work during the pre-launch preparation of manned launches at space launch complexes is an urgent problem. It can be solved by the development of emergency evacuation units (EEU), providing rescue of people in emergency on high-altitude units of launch complexes. The analysis of current research of EEU, made in Russia and the United States, showed that at the promising Russian space rocket complexes it is appropriate to use a rail EEU with a trolley moving along the guide system made in the form of the quickest descent curve – brachistochrone. According to the calculations, such a system can provide a minimum time of descent and removal of the trolley with people at a safe distance from the launch site, and also creates favorable conditions for damping the speed of the trolley on the final section of the descent trajectory. The study of the descent trajectory is for the first time based on the brachistochrone as applied to the EEU which allowed obtaining the calculated dependences necessary to determine the parameters of the guide system of the EEU, and to make recommendations for the design of such systems.

Keywords: launch complex, safety, emergency evacuation, descent trajectory, brachistochrone

REFERENCES

- [1] Barmin I.V., Neustroev V.N., Lebedeva L.I. *Izvestiya Rossiyskoy akademii raketnykh i artilleriyskikh nauk (Proceedings of the Russian Academy of Missile and Artillery Sciences)*, 2016, no. 4 (94), pp. 79–86.
- [2] Krikilev S.K., Saprykin O.A. *Pilotiruemye polety v kosmos — Manned Spaceflight*, 2016, no. 1 (18), pp. 47–62.
- [3] Goniants S.A., Kovinsky A.A. *Pilotiruemye polety v kosmos — Manned Spaceflight*, 2016, no. 4 (21), pp. 118–128.
- [4] Kruchkov B.I., Kharlamov M.M., Kuritsyn A.A. *Pilotiruemye polety v kosmos — Manned Spaceflight*, 2015, no. 2 (15), pp. 93–101.
- [5] Kuritsyn A.A., Yaropolov V.I. *Pilotiruemye polety v kosmos — Manned Spaceflight*, 2017, no. 4 (25), pp. 54–72.
- [6] Barmin I.V., ed. *Tekhnologicheskie obyekty nazemnoy infrastruktury raketno-tekhnicheskoy tekhniki. Inzhenernoe posobie* [Technological objects of ground infrastructure of rocket technology. Engineering manual]. In 2 books. Book 2. Moscow, Poligrafiks RPK Publ., 2006, 376 p.
- [7] Klotz I. Zip Line to Safety: ULA Installs Launchpad Escape System for Astronauts. *Space* Available at: <https://www.space.com/36344-zip-line-emergency-escape-system-astronauts.html> (accessed August 31, 2019).
- [8] Crew Emergency Egress System Installed at Atlas V Launch Pad ahead of Starliner Missions. *Spaceflight101.com* Available at: <http://spaceflight101.com/crew-emergency-egress-system-installed-at-slc-41> (accessed August 30, 2019).

- [9] Tikhomirov V.M. *Rasskazy o maksimumakh i minimumakh* [Stories about maxima and minima]. Moscow, MTsNMO Publ., 2006, 200 p.
- [10] Berman G.N. *Tsikloida* [Cyclide]. Moscow, Nauka Publ., 1980, 112 p.

Novozhilov B.M., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Rocket Launch Complexes, Bauman Moscow State Technical University. Research interests: technological process automation. e-mail: novozhilovbm@bmstu.ru