



DOI 10.22363/2312-8143-2021-22-4-348-354
УДК 616.728:678.8

Научная статья / Research article

Разработка композитной конструкции биомеханического назначения

И.М. Борисов , С.В. Резник  

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет),
Москва, Россия

 sreznik@bmstu.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 31 августа 2021 г.
Доработана: 17 октября 2021 г.
Принята к публикации: 22 октября 2021 г.

Ключевые слова:

протез, нижняя конечность, стопа,
углепластик, моделирование, техно-
логия

Аннотация. Разработка новой конструкции протеза нижней конечности представляет интерес для обеспечения нового уровня комфорта для людей с ограниченными возможностями при взаимодействии с пересеченной местностью и наклонными поверхностями. На основе существующих аналогов и современных работ в области протезирования предложены три концепта конструкции протеза стопы из композитного материала (углепластик), созданы пространственные модели поверхностей, твердотельные модели и фотореалистичные визуализации. Для подтверждения работоспособности и функциональности конструкций, а также для определения напряженно-деформированного состояния, возникающего при взаимодействии с поверхностью, имеющей наклон 15° относительно горизонтальной плоскости, используется метод конечных элементов на пространственных моделях четырех вариантов конструкций. Посредством компьютерных симуляций взаимодействия протезов с наклонной поверхностью проведен сравнительный анализ различных вариантов конструкции протеза нижней конечности в одинаковых условиях. Полученные результаты показали, что данное конструкторское решение работоспособно и как минимум на 14,4 % эффективнее стандартных конструкций, имеющих одну прорезь в пружинном элементе, и на 44,5 % эффективнее конструкций, не имеющих прорезей в пружинных элементах, при взаимодействии с пересеченной местностью и наклонными поверхностями.

Для цитирования

Борисов И.М., Резник С.В. Разработка композитной конструкции биомеханического назначения // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2021. Т. 22. № 4. С. 348–354.
<https://doi.org/10.22363/2312-8143-2021-22-4-348-354>

Development of a composite structure for biomechanical purposes

Ivan M. Borisov , Sergey V. Reznik  

Bauman Moscow State Technical University (National Research University of Technology), Moscow, Russia

 sreznik@bmstu.ru

Article history

Received: August 31, 2021
Revised: October 17, 2021
Accepted: October 22, 2021

Abstract. The development of a new design of a leg prosthesis for interaction with inclined surfaces is of interest to provide a new level of comfort for people with disabilities. Based on the analogues and modern works in the prosthetics sphere, three concepts of the prosthesis design are proposed. Spatial models



Keywords:

prosthesis, feet, foot, composite, carbon fiber reinforced plastic, modeling, technology

of surfaces and solid models have been created. To confirm the operability of structures and determine the stress-strain state that occurs when interacting with a surface having a slope of 15° relative to the horizontal plane, the finite element method is used on spatial models of four variants of geometry. A comparative analysis of various variants of the prosthesis design under the same conditions is carried out. The results obtained showed that this design solution is workable, suitable for production and for 14.4% more efficient than standard designs with one slot in the spring element and 44.5% more efficient than designs without slots in the spring elements.

For citation

Borisov IM, Reznik SV. Development of a composite structure for biomechanical purposes. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2021;22(4):348–354. (In Russ.) <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2021-22-4-348-354>

Введение

В настоящее время область протезирования нижних конечностей является перспективной как с точки зрения внедрения научно-технических инноваций, так и с точки зрения коммерциализации, в связи с чем проводится много исследований¹ [1–8]. Протезы нижних конечностей (ПНК) являются средством реабилитации при аплазии, утере конечности или ее ампутации.

В 2020 г. мировой рынок полуфабрикатов для протезов нижних конечностей оценивался в 1,3–1,4 млрд долл. США с ежегодным ростом порядка 3–5 %². Количество пользователей протезов нижних конечностей ежегодно прирастает на более чем 750 000 человек по всему миру.

Основные аспекты необходимые для создания перспективных протезов стопы – повышение функциональности, уменьшение массы конструкции, повышение устойчивости.

По отзывам пользователей протезов стоп, существует проблема устойчивости при взаимодействии с наклонными и неровными поверхностями, имеющими уклон более 7°, а у пациентов возникает неприятное давящее ощущение в культеприемной гильзе. Поэтому основная цель исследования – разработка протеза новой конструкции повышенной адаптивности при взаимодействии с наклонными опорными поверхностями.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

- анализ современного состояния работ в области протезирования стоп;
- исследование особенностей изготовления протезов стопы;
- разработка нового варианта конструкции будущего изделия;
- моделирование напряженно-деформированного состояния для нескольких конструкций и выбор лучшего варианта.

На основе поставленных задач впервые предложена и проанализирована композитная конструкция, позволяющая снизить нагрузку на культу пользователя при взаимодействии с наклонными поверхностями. Впервые предложено и исследовано влияние момента во фронтальной плоскости в качестве количественной характеристики адаптивности протеза к наклонным поверхностям. Также разработанная конструкция может быть использована в качестве основы для разработки нового поколения углепластиковых стоп повышенной адаптивности.

1. Современное состояние работ в области протезирования нижних конечностей

1.1. Виды протезов нижних конечностей

Самый распространенный вид ПНК – пассивно-функциональный, который обеспечивает опорную функцию и восполняет общие функции ходьбы, не требуя специальной электроники.

Существует четыре группы активности (согласно классификации от компании OSSUR), которые определяют тип протеза для пациента в зависимости от его повседневной деятельности:

- первая группа – низкий уровень активности – косметические протезы, выполняющие опорную функцию и слабо восстанавливающие функции ходьбы;

¹ Патент 2345736 Российская Федерация. Протез стопы / Б.В. Таунсенд; № 2006138501/14; заявл. 01.04.05; опубл. 10.02.09. 2 с.; Патент 2150916 Российская Федерация. Протез стопы / В.Н. Терешин; № 98113247/14; заявл. 03.07.98; опубл. 20.06.00. 1 с.; Патент su 1159569 a1 СССР. Протез стопы / Н.А. Яковлев; № 3675207; заявл. 12.12.83; опубл. 07.06.85.

² Annual report. OSSUR. 2020. URL: <https://annual-report.ossur.com/> (accessed: 03.03.2021).

– вторая и третья группы – средний и высокий уровень активности – самые распространенные и самые универсальные группы. Протезы восстанавливают функции ходьбы и бега;

– четвертая группа – специализированные спортивные протезы. Не предназначены для повседневного использования³.

1.2. Особенности конструкций пассивно-функциональных протезов стопы

Общая функция протеза – частичная разгрузка опороспособной культы, полная разгрузка неопороспособной культы и сохранение энергии в цикле шага за счет упругой деформации пружинных элементов.

Конструкция ПНК должна обеспечивать устойчивость пользователя в статическом и динамическом состоянии в сагиттальной (плоскость, разделяющая тело на левую и правую части) и фронтальной плоскостях. Однако устойчивость при взаимодействии с наклонными плоскостями более 7° крайне низкая. Для обеспечения устойчивости в пружинных элементах делают продольную прорезь, обеспечивающую возможность смещения опорных поверхностей относительно друг друга.

Протез стопы состоит из элементов, представленных на рис. 1.

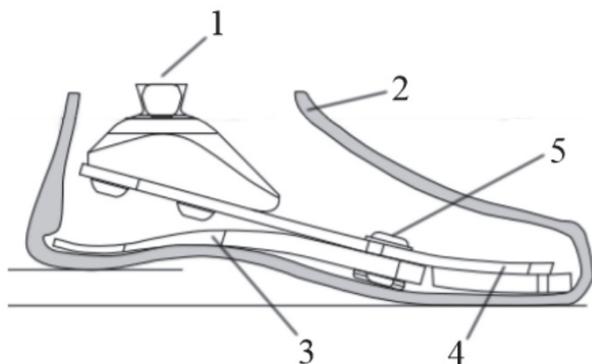


Рис. 1. Принципиальная схема пассивно-функционального протеза стопы:

1 – адаптер; 2 – съемная анатомическая оболочка;

3 – пяточный пружинный элемент;

4 – основной пружинный элемент; 5 – крепежный элемент

Figure 1. The composition

of the passive-functional prosthetic foot:

1 – adapter; 2 – removable anatomical shell; 3 – heel spring element;

4 – main spring element; 5 – fastening element

Адаптер, как правило, сделан из стали или титана, как и крепежные элементы. Съемную анатомическую оболочку изготавливают из полиуретана, пружинные элементы чаще всего – из композиционных материалов, таких как стеклопластики или углепластики.

2. Концепция и моделирование напряженного состояния новой конструкции

2.1. Проектный облик концептов конструкции протеза стопы

На основе изучения конструкций существующих протезов нижних конечностей было сформировано несколько вариантов конструкции.

Конструкция 2 (рис. 2) представляет собой аналог стопы высокого профиля⁴ от компании Freedom Innovations⁵ с симметричными пружинными элементами, имеющими большую толщину, и расширенным завершением пяточных пружинных элементов.



Рис. 2. Конструкция 2
Figure 2. Structure 2

Конструкция 3 (рис. 3) является низкопрофильной стопой с тремя продольными прорезями в области мыска для стабилизации конструкции на наклонных поверхностях. Конструкция основного пружинного элемента имеет переменную толщину, необходимую для обеспечения плавности переката стопы при шаге.

⁴ Уровень ампутации. URL: <https://www.ottobock-export.com/ru/prosthetics/information-for-amputees/from-amputation-to-rehabilitation/amputation-level/> (дата обращения: 05.03.2021).

⁵ Freedom Agilix by PROTEOR. URL: <https://www.freedom-innovations.com/agilix/> (accessed: 10.04.2021).

³ K levels. URL: <https://assets.ossur.com/library/31999> (accessed: 05.03.2021)



Рис. 3. Конструкция 3
Figure 3. Structure 3

В качестве наиболее перспективной из представленных была выбрана конструкция 3, так как обеспечение стабильности пользователя при перемещении по наклонным опорным поверхностям и пересеченной местности является одной из приоритетных задач современных протезов.

2.2. Формулировка модели. Финальный концепт

В настоящей работе финальная концепция конструкции протеза сформулирована с учетом анализа характерных особенностей современных протезов стопы, а также двух новых конструкций. Сделан вывод, что оптимальным решением является низкопрофильная стопа (до 80 мм в высоту), так как она универсальна для любого уровня ампутации.



Рис. 4. Конструкция 4
Figure 4. Structure 4

Стопа должна иметь переменную толщину пружинных элементов для обеспечения более плав-

ной плантарфлексии (сгибания стопы) и дорсифлексии (разгибания стопы). Необходимо обеспечить устойчивость пользователя на плоских, наклонных и неровных поверхностях. Необходимы три продольных прорези в основном пружинном элементе, одна из которых должна немного не доходить до адаптера, для обеспечения большей подвижности протеза стопы, пяточный элемент также должен содержать прорезь. Основной пружинный элемент должен иметь антропоморфное расширение в области мыска для дополнительной устойчивости.

Финальная конструкция 4 представлена на рис. 4. Высота стопы составляет 61 мм, длина – 239 мм (для стопы 25 размера). Ориентировочная масса с соединительными элементами – 323 г.

2.3. Результаты моделирования и их анализ

Расчетная модель базируется на сравнительном анализе четырех конструкций, имеющих одинаковые габаритные размеры (рис. 5), но различное строение продольных прорезей на основном и пяточном пружинных элементах.

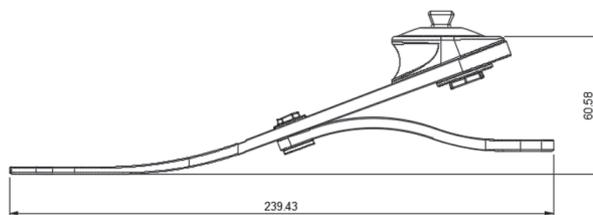


Рис. 5. Габаритные размеры финальной конструкции
Figure 5. Scales of final structure

Для получения расчетных данных используется имитация воздействия протеза стопы на твердую наклонную поверхность, созданная в программном комплексе ANSYS [9].

Конструкция 1, не имеющая продольных прорезей, и конструкция 2, имеющая одну центральную продольную прорезь, являются аналогами существующих стоп.

Конструкции 3 и 4, имеющие нестандартные прорези, являются основными объектами исследования.

Для расчета были созданы виртуальные модели с пружинными элементами равной толщины – 5 мм (с целью упрощения расчетной модели) и фрагмент наклонной поверхности (угол наклона 15°).

В качестве материала для расчета пружинных элементов выбран углепластиковый препрег (390 ГПа). Расположение волокон в каждом слое однонаправленное, слои ориентированы друг относительно друга под углом 90° [10; 11]. Конструкция формируется приблизительно из 10 слоев препрега.

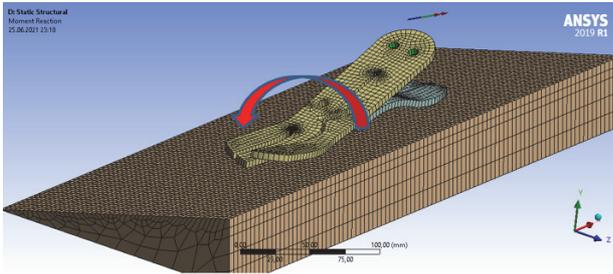


Рис. 6. Момент в фронтальной плоскости
Figure 6. Moment in frontal plane

Конструкция 1. Реакция опоры: 1302,6 Н. Момент во фронтальной плоскости: 21 787 Н·мм.

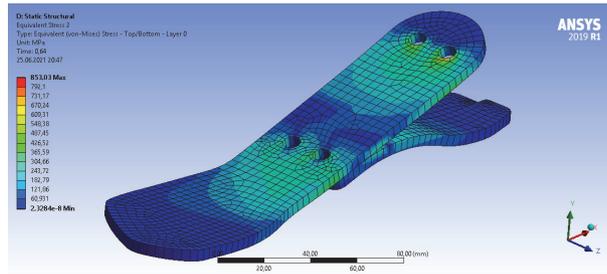


Рис. 7. Эквивалентное напряжение
Figure 7. Equivalent stress

Конструкция 2. Реакция опоры: 1303,0 Н. Момент во фронтальной плоскости: 14 108 Н·мм.

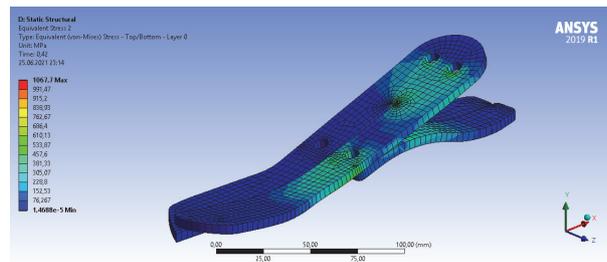


Рис. 8. Эквивалентное напряжение
Figure 8. Equivalent stress

Конструкция 3. Реакция опоры: 1326,8 Н. Момент во фронтальной плоскости: 12 339 Н·мм.

Для симуляции взаимодействия протеза с наклонной поверхностью смоделировано перемеще-

ние протеза стопы относительно вертикальной оси, что приводит к визуализации деформированного состояния. На основе полученных значений реакции опоры выбирались оптимальная итерация расчета и проводился анализ момента, возникающего в месте крепления адаптера (рис. 6). В данном моделировании значения имеют относительный характер, предназначенный для демонстрации работоспособности конструкций.

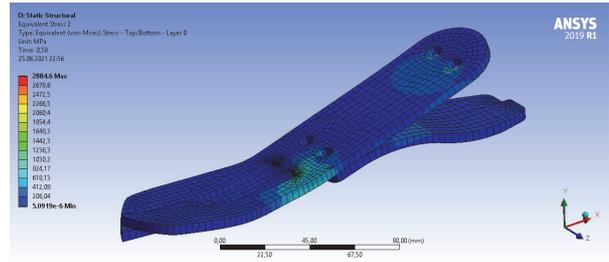


Рис. 9. Эквивалентное напряжение
Figure 9. Equivalent stress

Конструкция 4. Реакция опоры: 1325,7 Н. Момент во фронтальной плоскости: 12 083 Н·мм.

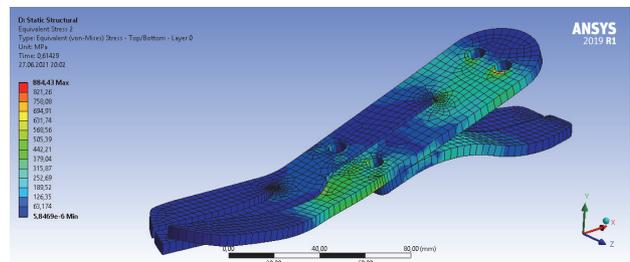


Рис. 10. Эквивалентное напряжение
Figure 10. Equivalent stress

Результаты компьютерного моделирования

Номер конструкции	Реакция опоры Н	Момент, Н·мм
1 базовая	1302,6	21 787
2 базовая	1303,0	14 108
3 новая	1326,8	12 339
4 новая	1325,7	12 083

Simulation results

Structure's number	Force reaction N	Moment, N-mm
1 basic	1302.6	21 787
2 basic	1303.0	14 108
3 new	1326.8	12 339
4 new	1325.7	12 083

При сравнении результатов из таблицы можно увидеть, что конструкция 1, существующая на рынке, дает наибольший момент в области крепления адаптера.

Конструкция 2, существующая на рынке и имеющая одну прорезь, дает значительно меньшее значение момента относительно конструкции 1.

В разработанной конструкции 3 момент стал еще меньше за счет двух прорезей на мыске.

Наименьшая величина момента наблюдается у разработанной конструкции 4, имеющий одну длинную прорезь и одну короткую прорезь на мыске. Это означает, что нагрузка на культю пользователя будет значительно ниже, что позволит повысить комфорт передвижения.

Заключение

В настоящее время область протезирования нижних конечностей является перспективной.

Разработанная конструкция протеза универсальна, что увеличивает количество пользователей и позволяет расширить возможности людей, использующих ПНК.

С помощью метода конечных элементов проведено численное моделирование напряженно-деформированного состояния протезов – определены значения силы и момент реакции опоры при взаимодействии конструкций протезов с поверхностью с углом наклона 15°. Выбран рациональный вариант конструкции.

Получены результаты, подтверждающие работоспособность и перспективность разработанной конструкции протеза – предложенный вариант на 44,5 % эффективнее самой распространенной на рынке конструкции без прорезей и на 14,4 % эффективнее конструкции с одной прорезью.

Список литературы

1. Якобсон Я.С., Кузнецкин А.П., Самойлов Д.В., Шишкин Б.В. Энергосберегающие протезы нижних конечностей // Российский журнал биомеханики. 1999. Т. 3. № 2. С. 129.
2. Осипенко М.А., Няшин Ю.И., Рудаков Р.Н. Математическое моделирование и оптимизация конструкции упругого элемента протеза стопы // Российский журнал биомеханики. 1999. Т. 3. № 2. С. 87–88.
3. Неврюев Д.А. Усовершенствование конструкции протеза стопы // Технология и переработка современных полимерных материалов: сборник трудов

Всероссийской научно-практической конференции: в 3 т. Т. 3. 2017. С. 63–66.

4. Неврюев Д.А., Шестопалов В.И., Улданов А.Г., Суханов А.И. К вопросу модернизации конструкции протеза стопы // Тенденции развития науки и образования. 2017. № 33–1. С. 47–49. <https://doi.org/10.18411/lj-25-12-2017-18>

5. Song Y. Performance test for laminated-type prosthetic foot with composite plates // Int. J. Precis. Eng. 2019. Vol. 20. No. 10. Pp. 1777–1786. <https://doi.org/10.1007/s12541-019-00156-3>

6. Abbas S.M., Resan K.K., Muhammad A.K., Al-Waily M. Mechanical and fatigue behaviors of prosthetic for partial foot amputation with various composite materials types effect // International Journal of Mechanical Engineering and Technology. 2018. Vol. 9. No. 9. Pp. 1–8.

7. Zou D., He T., Dailey M., Smith K., Silva M.J., Sinacore D.R., Mueller M.J., Hastings M.K. Experimental and computational analysis of composite ankle-foot orthosis // J. Rehabil. Res. Dev. 2014. Vol. 51. No. 10. Pp. 1525–1536.

8. Noroozi S., Sewell P., Abdul Rahman A.G., Vinney J., Chao O.Z., Dyer B. Modal analysis of composite prosthetic energy-storing-and-returning feet: an initial investigation // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part P: Journal of Sports Engineering and Technology. 2013. Vol. 227. No. 1. Pp. 39–48. <https://doi.org/10.1177/1754337112439274>

9. ANSYS Composite PrepPost User's Guide. Cansonsburg, 2013. 370 p.

10. Буланов И.М., Воробей В.В. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов. М.: Изд-во МГТУ имени Н.Э. Баумана, 1998. 516 с.

11. Батаев А.А., Батаев В.А. Композиционные материалы: строение, получение, применение. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. 384 с.

References

1. Yakobson YaS, Kuzhekin AP, Samoilov DV, Shishkin BV. Energy safety in prosthetic feets. *Russian Journal of Biomechanics*. 1999;3(2):129. (In Russ.)
2. Osipenko MA, Nyashin YI, Rudakov RN. Mathematic simulation and optimization of prosthetic feet construction. *Russian Journal of Biomechanics*. 1999;3(2): 87–88. (In Russ.)
3. Nevruiev D. Modernization of prosthetic feet construction. *Technology and Processing of Modern Polymer Materials: Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference*. 2017;3:63–66. (In Russ.)
4. Nevruiev D, Shestopalov V, Uldanov A. *The question of modernization of prosthetic feet construction*. 2017; (33–1):47–49. (In Russ.) <https://doi.org/10.18411/lj-25-12-2017-18>

5. Song Y. Performance test for laminated-type prosthetic foot with composite plates. *Int. J. Precis. Eng.* 2019;20(10):1777–1786. <https://doi.org/10.1007/s12541-019-00156-3>

6. Abbas SM, Resan KK, Muhammad AK, Al-Waily M. Mechanical and fatigue behaviors of prosthetic for partial foot amputation with various composite materials types effect. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*. 2018;9(9):1–8.

7. Zou D, He T, Dailey M, Smith K, Silva MJ, Sinacore DR, Mueller MJ, Hastings MK. Experimental and computational analysis of composite ankle-foot orthosis. *J. Rehabil. Res. DeV.* 2014;51(10):1525–1536.

8. Noroozi S, Sewell P, Abdul Rahman AG, Vinney J, Chao OZ, Dyer B. Modal analysis of com-

posite prosthetic energy-storing-and-returning feet: an initial investigation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part P: Journal of Sports Engineering and Technology*. 2013;227(1):39–48. <https://doi.org/10.1177/1754337112439274>

9. ANSYS Composite PrepPost User's Guide. Canonsburg; 2013.

10. Bulanov IM, Vorobey VV. *Technology of rocket and aerospace structures made of composite materials*. Moscow: Bauman Moscow State Technical University Publ.; 1998. (In Russ.)

11. Bataev AA, Bataev VA. *Composite materials: structure, receipt, application*. Novosibirsk: NSTU Publ.; 2002. (In Russ.)

Сведения об авторах

Борисов Иван Михайлович, бакалавр, магистрант кафедры СМ-13 «Ракетно-космические композитные конструкции», Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1. ORCID: 0000-0003-2347-7306. E-mail: dvsgood@gmail.com

Резник Сергей Васильевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой СМ13 «Ракетно-космические композитные конструкции», Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1. ORCID: 0000-0002-4837-6993, Scopus ID: 7005971925, eLIBRARY SPIN-код: 1000-3828. E-mail: sreznik@bmstu

About the authors

Ivan M. Borisov, bachelor, master's student of the Department SM13 "Rocket and Space Composite Structures," Bauman Moscow State Technical University, 5 2-ya Baumanskaya St, bldg 1, Moscow, 105005, Russian Federation. ORCID: 0000-0003-2347-7306. E-mail: dvsgood@gmail.com

Sergey V. Reznik, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department SM13 "Rocket and Space Composite Structures," Bauman Moscow State Technical University, 5 2-ya Baumanskaya St, bldg 1, Moscow, 105005, Russian Federation. ORCID: 0000-0002-4837-6993, Scopus ID: 7005971925, eLIBRARY SPIN-code: 1000-3828. E-mail: sreznik@bmstu