

К вопросу проектирования конструкции слабых звеньев навески основных опор шасси

© Е.И. Титов, С.А. Серебрянский

МАИ (НИУ), Москва, 125993, Россия

Представлены основные прочностные требования к типовой конструкции шасси гражданских самолетов. Более детально были рассмотрены элементы навески основной опоры шасси на планер. В узлах навески для недопущения передачи опасных нагрузений при грубой посадке на критические места планера обычно устанавливаются срезные болты, называемые слабыми звеньями. Выполнено сравнение расчетов работающего на срез типового слабого звена, проводимых двумя методами: аналитическим статическим и динамическим, с помощью метода конечных элементов. Первый из них обеспечил получение меньшего значения срезного усилия, чем второй. Это свидетельствует о том, что необходимо проводить дополнительные исследования с целью выявления истинного значения срезного усилия в сечении слабого звена при грубой посадке самолета.

Ключевые слова: авиация, гражданские самолеты, сертификация, прочность конструкций, безопасное разрушение, стойка шасси, конечные элементы

Введение. При проектировании конструкции навески основных опор шасси требуется опираться на такие нормативные документы, как Авиационные правила (АП), поскольку каждый гражданский пассажирский самолет и все его системы должны соответствовать этому документу [1]. В данной статье рассмотрен классический путь проектирования конструкций узлов навески основных опор шасси (ООШ) гражданских самолетов массой более 5,7 т.

Цель работы — сравнение аналитического метода расчета и расчета методом конечных элементов (КЭ), которое позволило сделать вывод о необходимости внедрения в процесс проектирования конструкций узлов навески ООШ моделирования методом КЭ.

Проектирование гражданских пассажирских самолетов массой более 5,7 т опирается на АП25, в которых изложены все требования к конструкции самолета и его летно-техническим характеристикам, требующиеся для получения сертификата типа. После проведения анализа авиационных правил был сделан вывод о том, что основными пунктами, которым должна соответствовать конструкция ООШ с точки зрения прочности, являются:

- АП25.473 — прочность конструкции под нагрузками от посадки самолета для всех расчетных случаев;
- АП25.571(b) — усталостная прочность и остаточная прочность после случайного повреждения конструкции;

• АП25.721 — безопасное разрушение конструкции навески шасси при недопущении герметичности топливной системы.

Типовая конструкция ООШ гражданских пассажирских самолетов имеет три точки навески [2]. В них возможна передача опасных нагрузений с конструкции ООШ на бак-кессон крыла, что может привести к разливу топлива и возникновению пожара. Для того чтобы не допустить такого развития событий, в указанных местах применяют срезные болты, называемые слабыми звеньями навески ООШ [3]. Эти детали необходимы для передачи расчетных нагрузок на кессон, а также для недопущения передачи сверхрасчетных нагрузений путем разрушения слабых звеньев и для безопасного отделения конструкции ООШ [4]. В типовых конструкциях навески ООШ критические места находятся в узлах навески траверсы, гидроцилиндра уборки шасси, шассийной балки на заднюю стенку кессона.

При проектировании слабых звеньев немаловажную роль играет кинематика конструкции, которую следует учитывать, для того чтобы избежать удара отделившейся стойки шасси о кессон и последующего разлива топлива. При конструировании слабых звеньев необходимо учитывать кинематику отделившейся от планера стойки шасси, поскольку происходит перераспределение сил между узлами навески, что может повлиять на последовательность разрушения слабых звеньев ООШ и дальнейшую траекторию отделившейся стойки шасси [5].

Современные методики конструирования слабых звеньев ООШ предполагают аналитический расчет в статической постановке [6, 7]. Однако при таких расчетах не учитывается кинематика конструкции, которая может существенно повлиять на требуемые параметры слабых звеньев [8, 9].

Метод решения. В данной статье представлен расчет конструкции типового слабого звена соединения типа «ухо—вилка» [10, 11] конструкции шасси регионального пассажирского самолета двумя методами: аналитическим в статической постановке и конечно-элементным в динамической постановке.

Исходные данные для расчета слабого звена приведены ниже:

Площадь среза слабого звена S , мм ²	612
Время воздействия, с	0,2
Число плоскостей среза слабого звена, шт.	2
Диаметр слабого звена, мм	57
Материал:	
слабого звена	30ХГСА
кронштейнов	ВТ22

Свойства используемых материалов приведены в табл. 1. Время, в течение которого происходит воздействие, взято соответствующим условием грубой посадки самолета на твердую поверхность с вертикальной скоростью более 3 м/с. График приложения сил и схема приложения внешней нагрузки и заделок показаны на рис. 1 и 2 соответственно. График приложения сил получен из условия гарантированного разрушения слабого звена в пиковом значении силы за короткое время, что соответствует ситуации грубой посадки с разрушением узлов навески шасси.

Площадь сечения среза была определена аналитически. Схема сечения слабого звена представлена на рис. 3.

Таблица 1

Механические свойства материалов модели

Свойства	Материал	
	30ХГСА	ВТ22
Предел прочности σ_b , МПа	1224	1151
Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	1148	1110
Модуль Юнга E , МПа	196 133	114 640
Остаточное удлинение после разрушения δ_{min} , %	14,8	12
Коэффициент Пуассона μ	0,3	0,3
Плотность ρ , кг/м ³	7850	4680

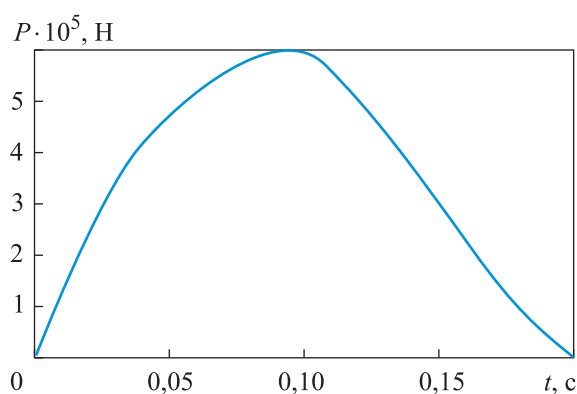


Рис. 1. График приложения сил

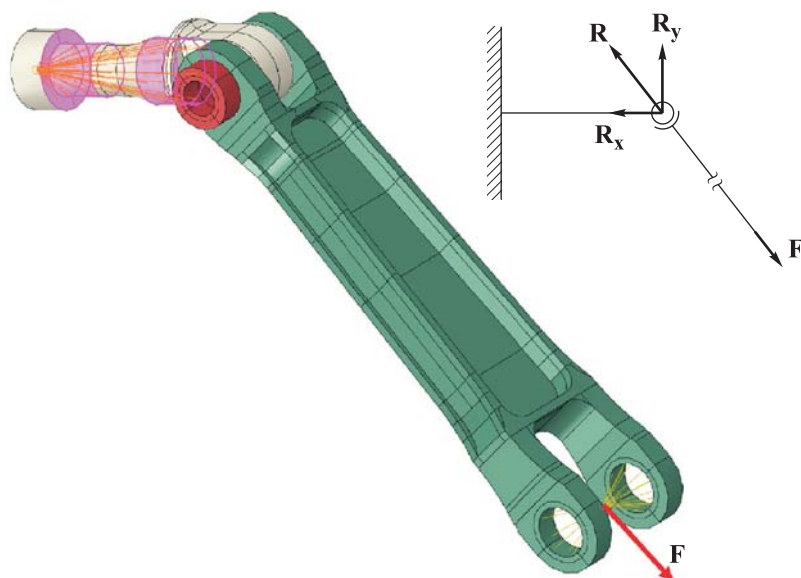


Рис. 2. Схема приложения сил и заделок

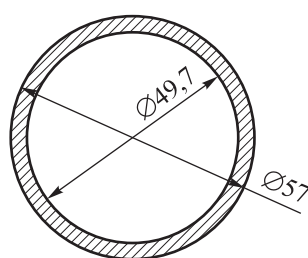


Рис. 3. Сечение слабого звена в месте среза

Результат аналитического расчета. посредством аналитического расчета определяются усилия в срезном сечении слабого звена с использованием выражения

$$\tau_{\text{ср}} = \frac{F_{\text{ср}}}{S_{\text{ср}}} [\text{МПа}],$$

где $\tau_{\text{ср}}$ — расчетное напряжение среза; $F_{\text{ср}}$ — сила, при применении которой произойдет разрушение слабого звена; $S_{\text{ср}}$ — площадь сечения среза.

Расчетное напряжение среза в сечении вычисляется по формуле

$$\begin{aligned} \tau_{\text{ср}} &= \sigma_{0,2}(0,25 \dots 0,35), \\ \tau_{\text{ср}} &= 1148 \cdot 0,3 = 344,4 \text{ МПа}. \end{aligned}$$

В рассматриваемом случае площадь сечения, по которому будет происходить срез, определяется так:

$$S_{\text{ср}} = \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) - \left(\frac{\pi d^2}{4} \right) = \left(\frac{\pi \cdot 57^2}{4} \right) - \left(\frac{\pi \cdot 49,7^2}{4} \right) = 612 \text{ мм}^2.$$

После этого сила, при приложении которой разрушается слабое звено, рассчитывается по формуле

$$F_{\text{ср}} = \tau_{\text{ср}} S_{\text{ср}} = 344,4 \cdot 612 = 210\,772,8 \text{ Н.}$$

Аналитический расчет показал, что слабое звено разрушится при достижении в срезном сечении силы $F_{\text{ср}} = 210\,772,8 \text{ Н}$.

Результат моделирования. При расчете методом КЭ определяются силы нагружения в местах среза слабого звена. При расчете было получено точное представление разрушения слабого звена. Данные порядка разрушения приведены в табл. 2. График сил в сечении слабого звена представлен на рис. 4. Напряжения по Мизесу слабого звена и конструкции в момент времени 0,08 с показаны на рис. 5.

Таблица 2

Разрушение слабого звена

Этап разрушения	Сила в сечении среза, Н	Время расчета, с
Начало упругих деформаций	0	0
Начало пластических деформаций	141 696	0,0245
Разрушение звена в сечении 1-й проушины	240 646	0,0835
Разрушение звена в сечении 2-й проушины	249 848	0,085

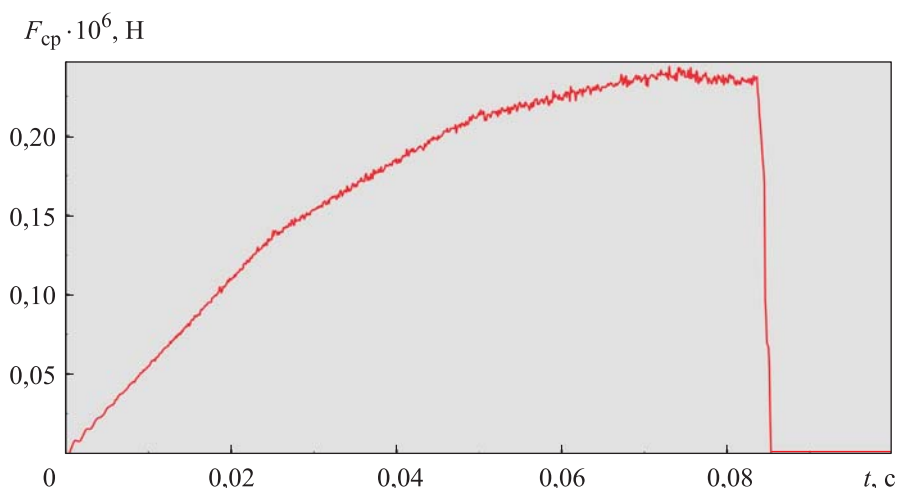


Рис. 4. График приложения силы в сечении среза слабого звена

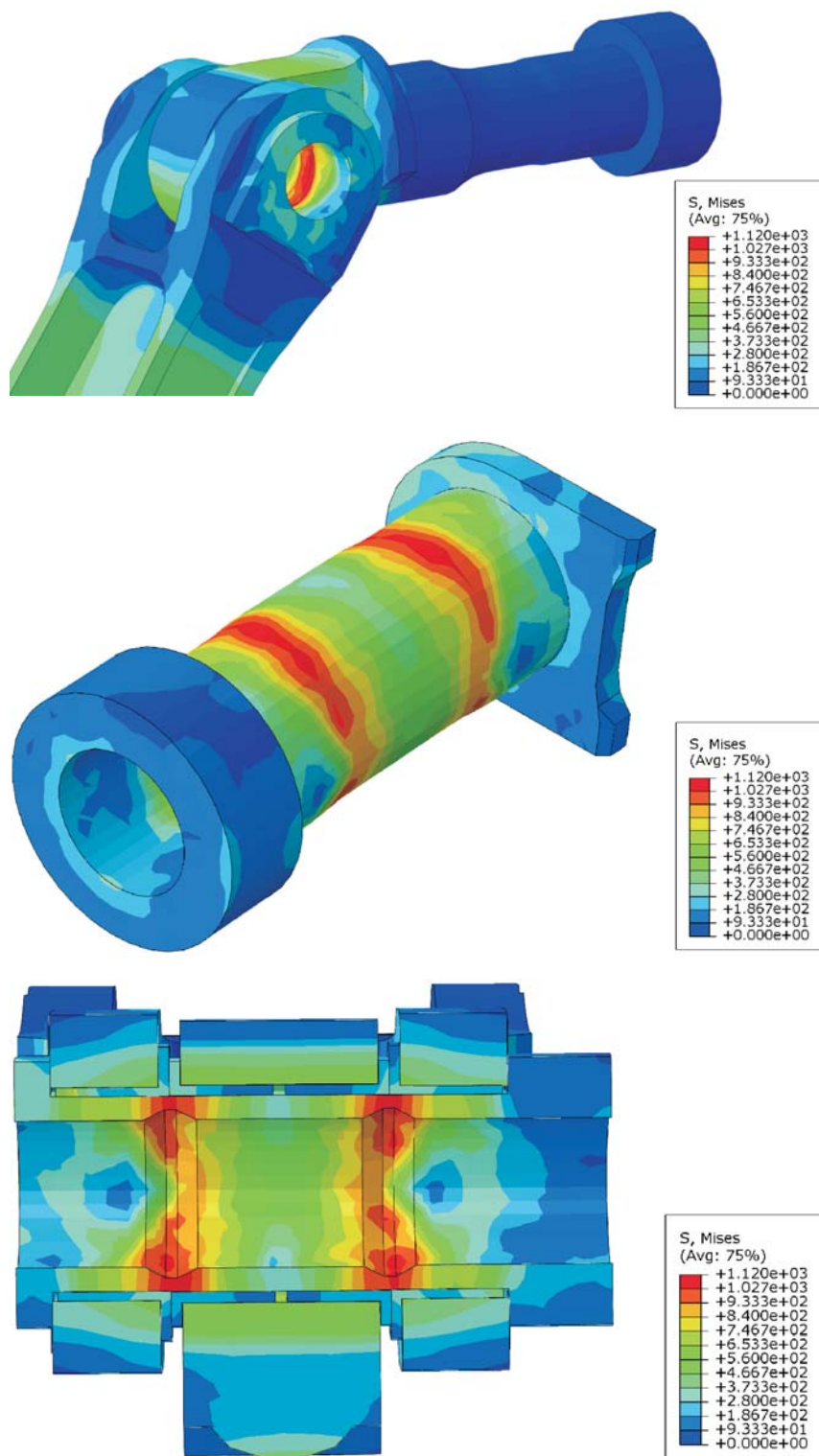


Рис. 5. Напряжения по Мизесу в конструкции в момент времени 0,08 с

Расчетная конечно-элементная модель состоит из 15 197 элементов и 23 466 узлов между ними, в частности, из 15 057 элементов типа C3D8R и 140 элементов типа C3D6.

Расчет был проведен с помощью динамического явного решателя Dynamic explicit.

Заключение. Значение разрушающей силы в сечении слабого звена, определяемое аналитическим методом, составляет 210 772,8 Н, а конечно-элементным методом — 242 243,1 Н. Разница в полученных срезных усилиях составляет 7,32 %.

Анализ полученных двумя методами расчета результатов показал, что необходимо внедрять в процесс проектирования слабых звеньев узлов навески ООШ новые методы расчета напряженно-деформированного состояния конструкции. При сравнении значений разрушающих усилий, полученных аналитическим методом расчета и определенными конечно-элементным методом, выявлено, что между ними есть небольшая разница— 7,32 % в пользу метода КЭ. Следует отметить, что при расчете таких сложных с кинематической точки зрения конструкций, как ООШ, ошибка будет нарастать экспоненциально, что может оказать большое влияние на последовательность разрушения слабых звеньев при грубой посадке самолета и вызвать кратковременную передачу сверхрасчетных нагрузжений на планер вплоть до его разрушения и разлива топлива. Поскольку такое развитие событий недопустимо по АП25.721, это подтверждает высокую актуальность внедрения расчета напряженно-деформированного состояния конструкции навески ООШ методом КЭ.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Авиационные правила. Часть 25.* Санкт-Петербург, Изд-во ООО «СЗ РЦАИ», 2015, 290 с.
- [2] Дмитриев А.В., Лещин А.В. *Выбор схемы и основных параметров опор шасси самолетов.* Москва, Изд-во МАИ, 2003, 47 с.
- [3] Капустин А.Г. Самолеты нового поколения. *Наука и инновации*, 2019, № 9 (199), с.16–20.
- [4] Ендогур А.И., *Конструкция самолетов. Конструирование агрегатов планера.* Москва, Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2012, 496 с. ISBN 978-6-7035-2312-4.
- [5] Кубланов М.С. Основы математического моделирования динамики различных видов авиационных шасси. *Научный Вестник МГТУ ГА, серия «Аэромеханика и прочность»*, 2006, № 97, с. 88–93.
- [6] Погосян М.А., ред. *Проектирование самолетов.* 5 изд., перераб. и доп. Москва, Инновационное машиностроение, 2018, 864 с.
- [7] Абрамов Я.С. Оптимизация узлов и деталей авиационных конструкций. *Сб. тр. XV Всерос. науч.-практич. конф. студентов и аспирантов, посв. празд. 100-летия констр. бюро «Туполев», 55-летия Иркутского филиала МГТУ ГА, 75-летия Иркутского авиационного технического колледжа.* Иркутск, Иркутский филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский госу-

- дарственный технический университет гражданской авиации», 2023, с. 8–13.
- [8] Братухин А.Г., Серебрянский С.А., Стрелец Д.Ю. [и др.]. *Цифровые технологии в жизненном цикле российской конкурентоспособной авиационной техники*. Москва, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2020, 448 с.
- [9] Бехтина Н.Б. Применение усовершенствованной математической модели работы шасси в системе математического моделирования для расследования инцидента при посадке самолета Ту-154. *Научный Вестник МГТУ ГА, серия «Аэромеханика и прочность»*, 2009, № 138, с. 183–190.
- [10] Туранов Р.А., Пыхалов А.А. Анализ работы конструкции соединения типа «ухо–вилка» с применением метода конечных элементов и решением контактной задачи теории упругости. *Труды МАИ*, 2019, № 104. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=102068> (дата обращения 30.03.2023).
- [11] Журавлев А.А., Ерофеев М.В., Серебрянский С.А. Выбор оптимальных форм и расчет проушен типа ухо-вилка для заданной нагрузки. *Тез. докл. 21-й Межд. конф. «Авиация и космонавтика»*. Москва, Изд-во «Перо», 2022, с. 31–32.

Статья поступила в редакцию 07.05.2021

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Титов Е.И., Серебрянский С.А. К вопросу проектирования конструкции слабых звеньев навески основных опор шасси. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2023, вып. 6. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2023-6-2283>

Титов Егор Иванович — специалист, инженер лаборатории № 2 «Композиционные материалы и конструкции» НИО-101 Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). Область научных интересов: проектирование высокоответственных конструкций летательных аппаратов. e-mail: titoff.eg@yandex.ru

Серебрянский Сергей Алексеевич — канд. техн. наук, доцент кафедры «Проектирование и сертификация авиационной техники», Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). e-mail: s-s-alex@mail.ru

Weak links design for the main landing gear leg mount

© E.I. Titov, S.A. Serebryansky

MAI (NRU), Moscow, 125993, Russia

The paper presents an overview of the main strength requirements to the typical civil aircraft landing gear design. Elements of the main landing gear leg mount on the airframe were considered in more detail. In the mount points, shear bolts called the "weak links" are usually installed in order to prevent transferring the dangerous loads during rough landing to the critical airframe sections. Next, calculations of the typical "weak link" effecting the shear were compared by two methods. Analytical static calculation showed the shear force value being lower than the dynamic calculation by the finite element method, which indicates the need for additional research to identify true value of the shear force in the weak link section during the aircraft rough landing.

Keywords: aviation, civil aircraft, certification, structural strength, safe destruction, landing gear leg, finite elements

REFERENCES

- [1] *Aviatsionnye pravila. Chast 25* [Aviation regulations. Part 25]. Saint Petersburg, "S3 RTsAI" Publ., 2015, 290 p.
- [2] Dmitriev A.V., Leschin A.V. *Vybor skhemy i osnovnykh parametrov shassi samoletov* [Selection of scheme and main parameters of the aircraft landing gear legs]. Moscow, MAI Publ., 2003, 47 p.
- [3] Kapustin A.G. *Samolety novogo pokoleniya* [New generation planes]. *Nauka i innovatsii — The Science and Innovations*, 2019, no. 9 (199), pp. 16–20.
- [4] Endogur A.I. *Konstruktsiya samoletov. Konstruirovaniye agregatov planera* [Aircraft design. Designing the airframe assembly]. Moscow, MAI-PRINT Publ., 2012, 496 p. ISBN 978-6-7035-2312-4.
- [5] Kublanov M.S. *Osnovy matematicheskogo modelirovaniya dinamiki razlichnykh vidov aviatsionnykh shassi* [The foundations of various aviation gear dynamics mathematical modelling]. *Nauchnyi Vestnik MGTU GA, Seriya Aeromekhanika i prochnost — Civil Aviation High Technologies, Aeromechanics and Strength Series*, 2006, no. 97, pp. 88–93.
- [6] Pogosyan M.A., ed. *Proektirovaniye samoletov* [Aircraft design]. 5 ed., rev. and enlarged. Moscow, Innovatsionnoe Mashinostroenie Publ., 2018, 864 p. ISBN 978-5-6040281-5-5.
- [7] Abramov Ya.S. *Optimizatsiya uzlov i detaley aviatsionnykh konstruktsiy* [Optimization of components and parts of the aircraft structures]. In: *Sb. tr. XV Vseross. nauchno-praktich. konf. studentov i aspirantov, posv. prazdn. 100-letiya konstr. byuro "Tupolev", 55-letiya Irkutskogo filiala MGTU GA, 75-letiya Irkutskogo aviatsionnogo tekhnicheskogo kolledzha* [Collection of works of the XV All-Russian scientific and practical conference of students and graduate students devoted to celebrating the 100th anniversary of the Tupolev design bureau, 55th anniversary of the Irkutsk Branch of MSTU CA, 75th anniversary of the Irkutsk Aviation Technical College]. Irkutsk, Irkutsk Branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Moscow State Technical University of Civil Aviation" Publ., 2023, pp. 8–13.
- [8] Bratukhin A.G., Serebryansky S.A., Strelets D.Yu., et al. *Tsifrovyye tekhnologii v zhiznennom tsikle rossiyskoy konkurentnosposobnoy aviatsionnoy tekhniki*

- [Digital technologies in the life cycle of the Russian competitive aviation equipment]. Moscow, MAI Publ., 2020, 448 p. ISBN 978-5-4316-0694-6.
- [9] Bekhtina N.B. Primenenie usovershenstvovannoy matematicheskoy modeli raboty shassi v sisteme matematicheskogo modelirovaniya dlya rassledovaniya intsidenta pri posadke samoleta Tu-154 [Application of improved mathematical model of gear work in mathematical modeling system for accident investigation at Tu-154 landing]. *Nauchnyi Vestnik MGTU GA, seriya Aeromekhanika i prochnost — Civil Aviation High Technologies, Aeromechanics and Strength Series*, 2009, no. 138, pp. 183–190.
- [10] Turanov R.A., Pykhalov A.A. Analiz raboty konstruktssii soedineniya tipa “ukho–vilka” s primeneniem metoda konechnykh elementov i resheniem kontaktnoy zadachi teorii uprugosti [Analysis of the “ear-plug” type structure operation by the finite elements method and by the contact problem of elasticity theory solution]. *Trudy MAI*, 2019, no. 104. Available at: <http://trudymai.ru/published.php?ID=102068> (accessed March 30, 2023).
- [11] Zhuravlev A.A., Erofeev M.V., Serebryansky S.A. Vybór optimalnykh form i raschet proushen tipa ukho-vilka dlya zadannoy nagruzki [Selection of optimal forms and calculation of the ear-fork eyelets for a given load]. In: *Tez. dokl. 21-y Mezhdunar. konf. “Aviatsiya i kosmonavtika”* [Abstracts from reports at the 21st International conference “Aviation and Cosmonautics”]. Moscow, Pero Publ., 2022, pp. 31–32.

Titov E.I., Specialist, Engineer, Laboratory no. 2 “Composite materials and construction”, NIO-101 Moscow Aviation Institute (National Research University). Scientific interests: design of highly responsible components of the aircrafts.
e-mail: titoff.eg@yandex.ru

Serebryansky S.A., Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Department of Design and Certification of Aviation Technology, Moscow Aviation Institute (National Research University). e-mail: s-s-alex@mail.ru