

## ПОДХОД К ПРОЕКТИРОВАНИЮ КОНСТРУКЦИИ ТИПОВЫХ УЗЛОВ НАВЕСКИ ОСНОВНЫХ ОПОР ШАССИ САМОЛЁТА

**Титов Е.И., Серебрянский С.А.**  
*МАИ (НИУ), Москва, Россия*  
titoff.eg@yandex.ru, s-s-alex@mail.ru

*Аннотация. Конструкции основных опор шасси соответствует требованиям норм лётной годности. Одним из требований является недопущение передачи опасных нагрузок при грубой посадке. Для этого в конструкции шасси используются слабые звенья. Расчёт прочности слабых звеньев можно рассматривать как статическую задачу, так и динамическую.*

*Ключевые слова: проектирование, опора шасси, грубая посадка, слабое звено, метод конечных элементов.*

### Введение

Основной задачей проектирования узлов навески основных опор шасси (ООШ) является низкая стоимость, малая масса конструкции и соответствие требованиям нормативных документов. Основным нормативным документом при проектировании агрегатов и систем самолёта являются Нормы лётной годности (НЛГ), в которых изложены все требования к прочности и конструктивным требованиям как самих ООШ, так и узлов навески ООШ на планер. НЛГ25 устанавливают требования к конструкции самолёта, масса которого превышает 5.7 тонн.

Изучив НЛГ25 были сделаны выводы, что конструкцию ООШ и узлов навески ООШ затрагивают пункты, указанные в таблице 1.

*Таблица 1. Пункты НЛГ, предъявляющие требования к конструкции шасси*

Пункт НЛГ	Заглавие	Краткое описание
НЛГ25.471	Основные положения	Определение условий испытаний, установка допущений при испытаниях.
НЛГ25.473	Условия нагружения при посадке и предположения	Определение граничных условий испытаний и расчётных случаев.
НЛГ25.477	Расположение шасси	Трёхстоечная шасси с носовой опорой принимается общепринятым расположением. К остальным устанавливаются условия из НЛГ25.485.
НЛГ25.479	Условия горизонтальной посадки	Требования к прочности конструкции шасси от нагрузок, моделирующих горизонтальную посадку.
НЛГ25.481	Условия посадки с опущенным хвостом	Требования к прочности конструкции шасси от нагрузок, моделирующих посадку с опущенным хвостом.
НЛГ25.483	Условия посадки на одну стойку	Требования к прочности конструкции шасси от нагрузок, моделирующих посадку на одну ООШ.
НЛГ25.485	Условия действия боковой нагрузки	Требования к прочности конструкции шасси от нагрузок, моделирующих посадку с боковым ветром и скольжением на крыло.
НЛГ25.487	Условия отскока при посадке	Требования к прочности конструкции шасси от нагрузок, моделирующих отскок от полосы.
НЛГ25.489	Условия управляемого движения по земле	Установление требований к конструкции ООШ для случаев движения самолёта по земле.
НЛГ25.491	Руление, взлёт и пробег	Определение условий нагружений при моделировании испытаний конструкции ООШ при движении по земле.
НЛГ25.493	Условия качения с торможением	Требования к прочности конструкции шасси от нагрузок, моделирующих максимальные нагрузки от торможения.
НЛГ25.495	Разворот	Требования к прочности конструкции шасси от нагрузок, моделирующих разворот самолёта.
НЛГ25.497	Рыскание хвостового колеса	Условия рыскания хвостового колеса.

Пункт НЛГ	Заглавие	Краткое описание
НЛГ25.499	Рыскание носового колеса и управление им	Требования к прочности конструкции шасси от нагрузок, моделирующих рыскание носовой опоры шасси.
НЛГ25.503	Вращение	Требования к прочности конструкции шасси от нагрузок, моделирующих торможение одной ООШ, вокруг которой вращается.
НЛГ25.507	Реверсивное торможение	Требования к прочности конструкции шасси от нагрузок, моделирующих реверсивное торможение.
НЛГ25.509	Нагрузки при буксировке	Требования к прочности конструкции шасси от нагрузок, моделирующих буксировку самолёта.
НЛГ25.511	Нагрузки на земле: несимметричные нагрузки на многоколёсные стойки шасси	Дополнительные требования к прочности конструкции многоколёсных шасси.
НЛГ25.515А	Шимми	Требования к конструкции шасси, устанавливающее недопущение возникновения шимми.
НЛГ25.519	Обеспечение поднятия на домкратах и расчаливания	Требования к конструкции шасси, устанавливающее возможность поднятия самолёта на домкратах и замену колёс.
НЛГ25.571	Оценка допустимости повреждений и усталостной прочности конструкции	Определение основных требований к усталостной прочности конструкции, а также определение допустимых повреждений.
НЛГ25.721	Общие положения	Требования к конструкции шасси, устанавливающее недопущение передачи опасных нагрузений на критические места конструкции и недопустимости возникновения пожара при грубой посадке.
НЛГ25.723	Испытания амортизации	Требования к конструкции амортизатора шасси и определение граничных условий копровых испытаний шасси
НЛГ25.729	Механизм уборки и выпуска шасси	Требования к системе уборки шасси, аварийных систем выпуска шасси, испытаний этих систем и указателей.
НЛГ25.729А	Механизм разворота колёс	Требования к механизму разворота колёс и его испытаниям
НЛГ25.733	Шины	Основные требования к шинам и их испытаниям
НЛГ25.735	Тормоза и тормозные системы	Требования к конструкции тормозной системы шасси

Данные требования разрешается подтверждать анализом или расчётом, если это возможно. В большинстве случаев, испытания для проверки требований НЛГ являются статическими задачами, т.к. сумма всех сил принимается равной нулю.

Статические расчёты в сравнении с динамическими менее трудоёмкие, однако они имеют допущения, такие как одновременное приложение всех сил, отсутствие сил инерции и невозможность расчёта последовательного разрушения конструкции. В НЛГ25.721 говорится о необходимости удостовериться в безопасности разрушения шасси от приложения сверхрасчётных нагрузок и недопущении протечек топлива, вызывающих опасность пожара.

Для недопущения передачи опасных нагрузений с конструкции шасси на критические места планера, такие как бак-кессон, в типовых конструкциях узлов навески ООШ используются срезные болты, называемые «слабыми звеньями». Цель слабых звеньев состоит в том, чтобы передавать расчётные нагрузки, описанные в НЛГ25.471-519, но не допускать передачу сверхрасчётных нагрузений, описанных в НЛГ25.721, на бак-кессон, путём разрушений слабых звеньев.

Однако, в классическом проектировании слабых звеньев используется статический анализ нагружения, не учитывающий инерцию конструкции, временное сопротивление слабых звеньев при

достижении в материале слабого звена напряжений, равных  $\sigma_B$ , а так же изменяющуюся кинематику конструкции навески ООШ при разрушении первого и последующих слабых звеньев.

## 1. Метод решения

Для оценки влияния допущений статического анализа разрушения слабых звеньев были проведены расчёты аналитическим методом и методом конечных элементов в динамической и квазистатической постановке задачи.

В качестве исследуемого образца была взята геометрия подкоса ООШ типового регионального самолёта, в которой присутствует слабое звено. Геометрия конструкции, а также схема нагружения показаны на рисунке 1. Физические свойства материалов элементов конструкции показаны в таблице 2.

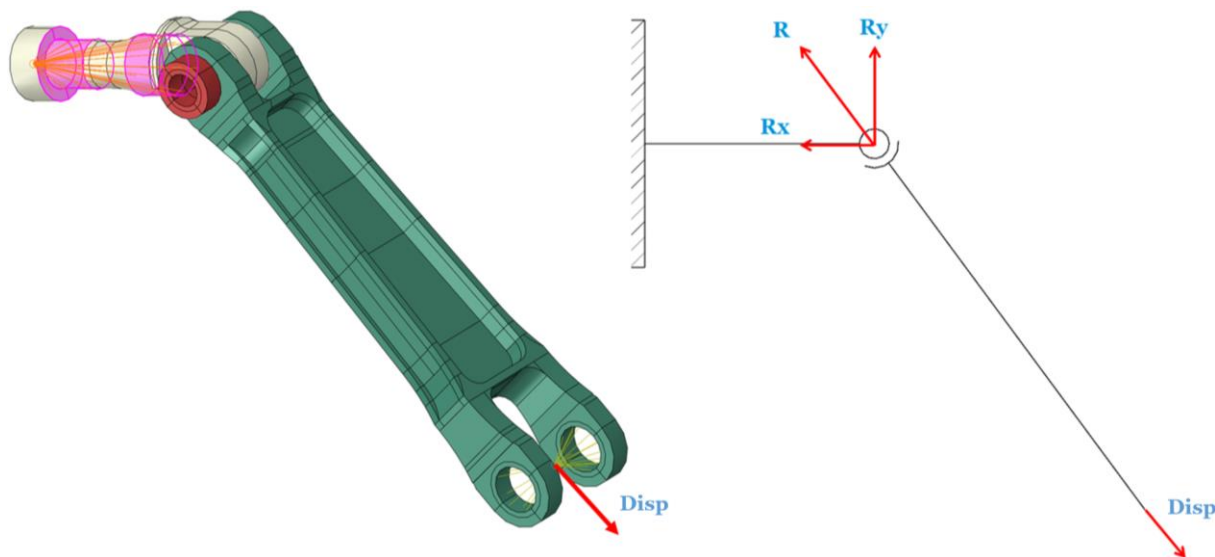


Рис. 1. Исходная геометрия и схема нагружения исследуемого агрегата

Таблица 2. Механические свойства материалов модели

Свойства	Материал	
	30ХГСА	ВТ22
Предел прочности $\sigma_B$ , [МПа]	1224	1151
Предел текучести $\sigma_{0,2}$ , [МПа]	1148	1110
Модуль Юнга $E$ , [МПа]	196133	114640
Остаточное удлинение после разрушения $\delta$ (min), [%]	14,8	12
Коэффициент Пуассона $\mu$	0,3	0,3
Плотность $\rho$ , [кг/м <sup>3</sup> ]	7850	4680

## 2. Аналитический метод

Для определения срезного усилия необходимо воспользоваться формулой:

$$\tau_{ср} = \frac{F_{ср}}{S_{ср}}, \quad [\text{МПа}] \quad (1)$$

где  $\tau_{ср}$  – расчётное напряжение среза;  $S_{ср}$  – площадь сечения среза.

Расчётное напряжение среза в сечении определяется формулой:

$$\tau_{ср} = \sigma_{\tau} * k, \quad [\text{МПа}] \quad (2)$$

где  $\tau_{ср}$  – расчётное напряжение среза;  $k$  – коэффициент, зависящий от материала.

Для сталей коэффициент  $k$  принято считать равным 0,57.

Тогда расчётное напряжение среза будет равно:

$$\tau_{ср} = 1148 * 0,57 = 654,36, \quad [\text{МПа}] \quad (3)$$

Площадь сечения, по которому будет происходить срез, определяется по формуле:

$$S_{\text{ср}} = \left( \frac{\pi D^2}{4} \right) - \left( \frac{\pi d^2}{4} \right), \quad [\text{мм}^2] \quad (4)$$

Сечение среза слабого звена показано на рисунке 2.

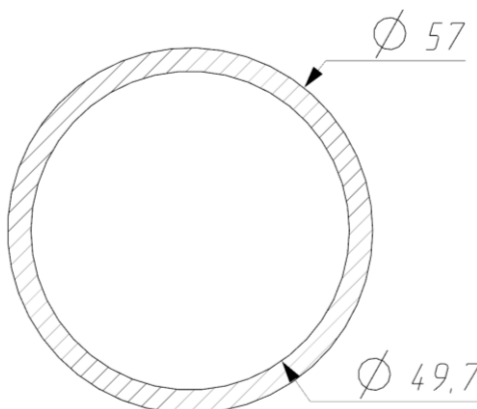


Рис. 1. Сечение слабого звена, мм.

Тогда площадь среза будет равна:

$$S_{\text{ср}} = \left( \frac{\pi * 57^2}{4} \right) - \left( \frac{\pi * 49,7^2}{4} \right) = 611,74, \quad [\text{мм}^2] \quad (5)$$

Тогда сила, при приложении которой произойдет разрушение слабого звена, находится по формуле:

$$F_{\text{ср}} = \tau_{\text{ср}} * S_{\text{ср}} = 654,36 * 611,74 = 400295,86, \quad [\text{Н}] \quad (6)$$

Аналитический расчёт показал, что слабое звено разрушится при достижении в срезном сечении силы, равной 400295,86 Н.

### 3. Метод конечных элементов

Для расчёта методом конечных элементов (КЭ) была смоделирована только зона интереса, т.е. проушины кронштейнов и слабое звено. Конечно-элементная модель показана на рисунке 3. Втулки, стоящие между проушинами и слабым звеном заданы неразрушающимися.

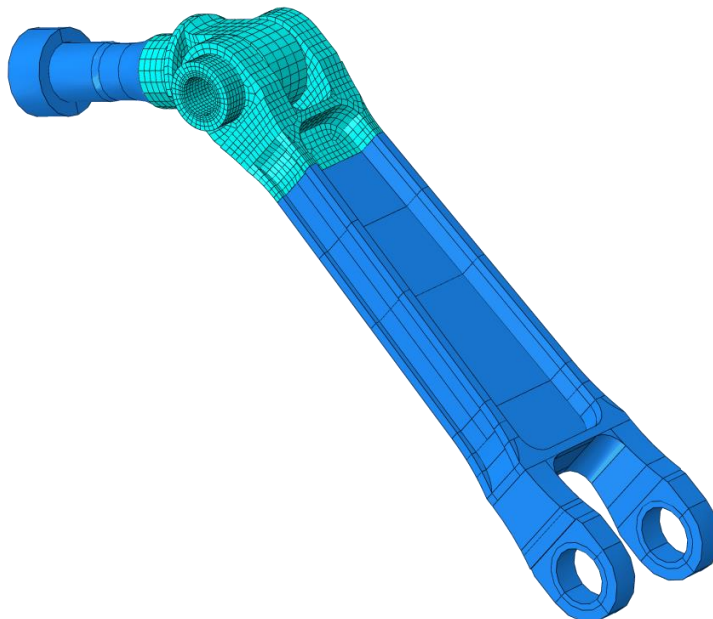


Рис. 2. Конечно-элементная модель зоны интереса

Расчётная конечно-элементная модель состоит из 9502 элементов и 14285 узлов между ними. В частности, из:

- 9428 элементов типа C3D8R;
- 74 элементов типа C3D6.

Расчёт был произведён при помощи динамического явного решателя Dynamic explicit. В качестве заделки был смоделирован кронштейн, ограниченный по всем степеням свободы кроме вращения вокруг оси симметрии цилиндрической части. Данная заделка была смоделирована с целью большей физической модели, а также для избегания появления паразитных нагружений от возможной несимметричности нагрузки правой и левой проушины подкоса. Нагружение задано в виде перемещения с постоянной скоростью и приложено к звену подкоса.

### 3.1. Метод КЭ. Динамический расчёт

Результатом расчётов методом КЭ является график силы, которая передаётся с подкоса на кронштейн через одно из сечений слабого звена. Пиковое значение силы с последующим разрушением будет означать максимальное значение силы, которое слабое звено сможет передать на кронштейн навески подкоса ООШ в данном сечении. Слабое звено работает по двум плоскостям среза. Следовательно, суммарная пиковая сила, действующая в двух плоскостях среза, является полной максимальной нагрузкой, переданной с звена подкоса на кронштейн навески ООШ.

Нагружение подкоса задано в виде перемещения звена подкоса. Скорость перемещения выбрана из условия грубой посадки и моделирует посадку с вертикальной скоростью  $V_y = 5 \text{ М/с}$ . Подкос установлен под углом  $45^\circ$  относительно вертикали. Следовательно, итоговая расчётная скорость перемещения звена подкоса относительно кронштейна равна:

$$V = V_y * \sin 45^\circ = 5 * \sin 45^\circ = 3,54, \quad \text{М/с} \quad (7)$$

График силы, действующей в сечении среза слабого звена, показан на рисунке 4.

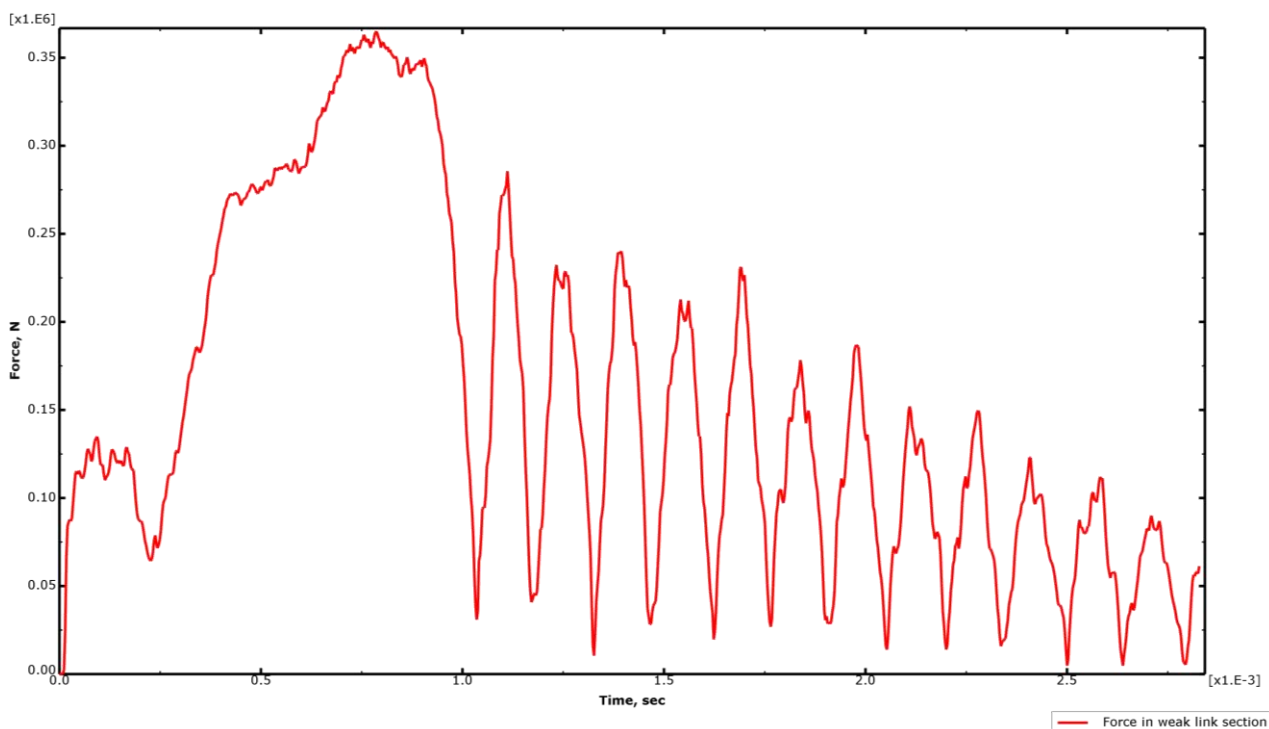


Рис. 3. График сил, действующих в сечении слабого звена, Н

### 3.2. Метод КЭ. Квазистатический расчёт

Квазистатический расчёт подразумевает под собой расчёт в динамической постановке задачи, но при условии, что кинетическая энергия во время расчёта пренебрежимо мала по сравнению с потенциальной энергией, возникающей внутри материала. В данном случае кинетическая энергия в расчёте не превышает 5% потенциальной энергии в материале исследуемой конструкции. Следовательно, данный расчёт можно считать приближённым к статическому.

Нагрузка задана как перемещение подкоса ООШ вдоль основной оси. Скорость перемещения была выбрана из условия квазистатичности и равна  $0,002 \text{ м/с}$ . График силы, действующей в сечении среза слабого звена, показан на рисунке 5.

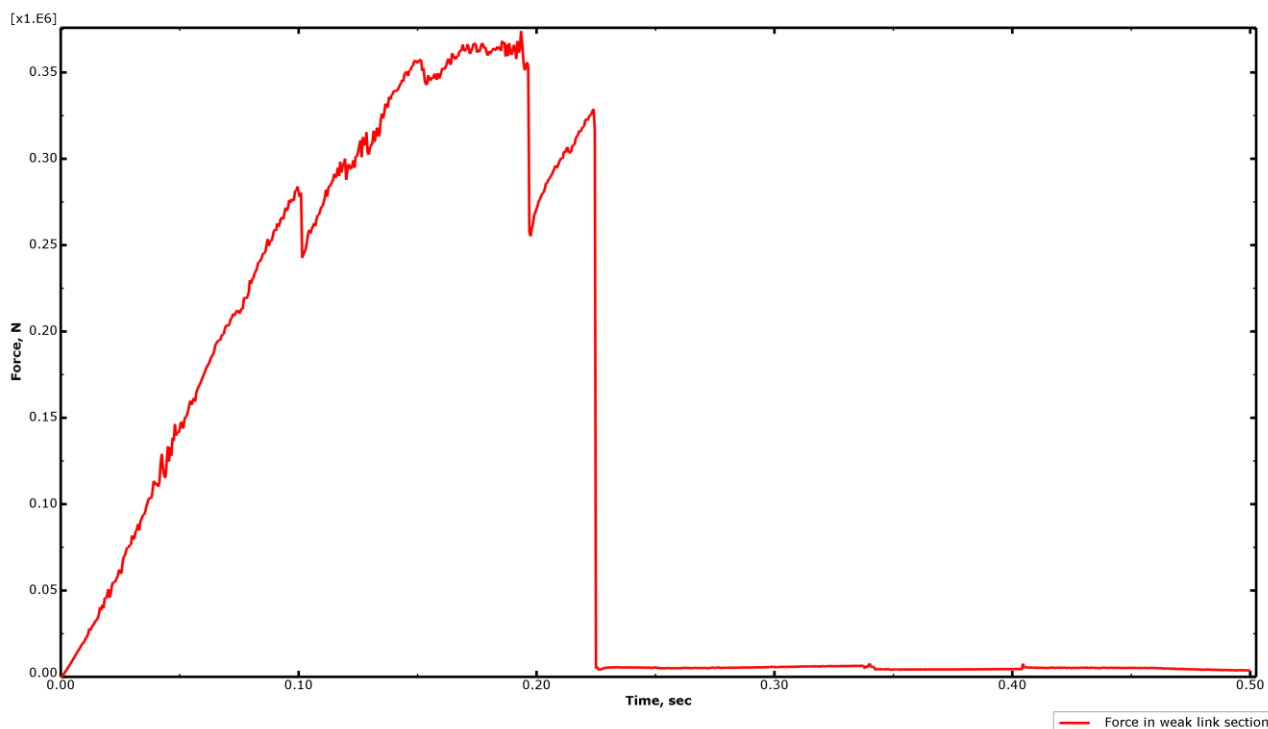


Рис. 4. График сил, действующих в сечении слабого звена, Н

#### 4. Заключение

В ходе расчётов разрушения слабого звена была получена максимальная сила, при которой слабое звено разрушится. В зависимости от метода, используемого для получения данного срезного усилия, были получены разные результаты. Полученные разными разрушающие усилия представлены в таблице 3.

Таблица 2. Сравнительная таблица разрушающих сил в сечении

Параметр	Аналитический расчёт	Конечно-элементный расчёт	
		Динамический	Квазистатический
Срезающее усилие, [Н]	400295,86	364937	373992
Отклонение от аналитического метода расчёта, [%]	-	8,87	6,61

Сравнение полученных разрушающих сил показывает необходимость дополнительного изучения расчёта методом КЭ, поскольку разница в полученных разрушающих силах между аналитическим методом и методом КЭ превышает 8%. Так же существует разница в полученных разрушающих силах между динамическим и квазистатическим методами расчёта с помощью КЭ анализа. Данные различия показывают серьёзный вклад сил инерции при разрушении слабого звена, что может серьёзно повлиять на порядок разрушения узлов навески ООШ при грубой посадке. Изучив пункты НЛГ, был сделан вывод, что есть необходимость проведения динамического анализа разрушения конструкции ООШ от грубых посадок с целью подтверждения безопасно

#### Литература

1. Нормы лётной годности самолётов транспортной категории НЛГ 25. – М: издательство ЦЕНТРМАГ, 2023. – 546 с.
2. Дмитриев А.В., Лещин А.В. Выбор схемы и основных параметров опор шасси самолётов. Москва, Издательство МАИ, 2003, 47 с.

3. *Капустин А.Г.* Самолеты нового поколения // Наука и инновации. №9 (199). 2019. – С.16–20.
4. *Ендогур А.И.* Конструкция самолетов. Конструирование агрегатов планера. М: издательство 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, №97. 2006. С. 88–93.
6. *Погосян М.А.* Проектирование самолётов / М.А. Погосян, Н.К. Лисейцев, Д.Ю. Стрелец и [др.] – 5 изд. – М: Инновационное машиностроение, 2018 – 864 с. – ISBN 978-5-6040281-5-5.
7. *Абрамов Я.С.* Оптимизация узлов и деталей авиационных конструкций. // Сб. тр. XV Всерос. научно-практической 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 государственный 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. – М: МАИ, 2020. – 448 с. – ISBN 978-5-4316-0694-6.
9. *Бехтина Н.Б.* – Применение усовершенствованной математической модели работы шасси в системе математического моделирования для расследования инцидента при посадке самолёта Ту-154. // Научный Вестник МГТУ ГА, серия Аэромеханика и прочность, №138. – 2009. – 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, № 104. – 2019. – URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=102068> (дата обращения 30.03.2023).
11. *Журавлёв А.А., Ерофеев М.В., Серебрянский С.А.* – Выбор оптимальных форм и расчёт проушин типа ух-вилка для заданной нагрузки. // Тез. докл. 21-й Межд. конф. «Авиация и космонавтика» – Москва: Издательство Перо. – 2022. – С. 31–32.
12. *Образцов И.Ф.* – Строительная механика летательных аппаратов / Образцов И.Ф., Булычев Л.А., Васильев В.В. [и др.] – М: Машиностроение, 1987. – 536 с.
13. *Abaqus. Abaqus Analysis User's Guide – Simulia: Dearborn, MI, USA.* – 2018.
14. *Киселёв Ю.В., Киселёв Д.Ю.* – Шасси самолёта SuperJet – Самара: Издательство СГАУ, 2014. – 29 с. – ISBN 978-5-7883-0856-2.