

На правах рукописи



Никитин Егор Александрович

**Расчет динамики жидкостно-газовых амортизаторов телескопических опор
шасси пассажирского самолета с целью повышения функциональных
характеристик**

1.1.7 – Теоретическая механика, динамика машин

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва, 2025

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Белкин Александр Ефимович

Официальные оппоненты: **Русских Сергей Владимирович**, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры 602 «Проектирование и прочность авиационно-ракетных и космических изделий» ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ).

Парышев Сергей Эмильевич, кандидат технических наук, доцент, начальник отделения «Нормы прочности, нагрузки и аэроупругость летательных аппаратов» научно-исследовательского центра прочности летательных аппаратов ФАУ «ЦАГИ».

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ».

Защита состоится 08 октября 2025 г. в 14:30 на заседании диссертационного совета 24.2.331.12 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д.5, стр. 1.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим выслать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

Телефон для справок: +7 (499) 263-66-39

Автореферат разослан «___» 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
д.т.н., доцент



М.В. Мурашов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Опоры шасси воздушного судна (ВС) предназначены для поглощения энергии удара при посадке и восприятия динамических нагрузок на конструкцию при движении по взлетно-посадочной полосе (ВПП). Разработка шасси любого размера и назначения представляет собой трудоемкий процесс, поскольку широкий спектр требований, предъявляемых к шасси, делает их одним из наиболее ответственных и сложных узлов ВС. При этом посадочные устройства не требуются в полете, они представляют собой «мертвый груз», и проектировщику необходимо приложить значительные усилия, чтобы минимизировать их массу.

Безопасность эксплуатации ВС при взлете и посадке в значительной мере зависит от шасси, ошибки при его проектировании влекут за собой катастрофические последствия. Первостепенное внимание должно быть уделено созданию безопасной конструкции, способной выдерживать значительные нагрузки, обеспечивать устойчивость и комфорт движения по ВПП. Интенсивные колебания ВС при движении по ВПП не только вызывают дискомфорт у пассажиров, но и приводят к повышенной утомляемости экипажа, что может негативно сказаться на безопасности полета. Динамические характеристики системы шасси самолета определяются установленными в них амортизаторами.

Существует множество конструктивных типов амортизаторов, способных поглотить и рассеять кинетическую энергию летательного аппарата в момент приземления и движения по ВПП. Жидкостно-газовые амортизаторы (ЖГА), широко применяемые в средних и тяжелых летательных аппаратах, занимают особое место благодаря высокой эффективности поглощения и рассеивания энергии при относительно небольшой массе. Эти устройства отвечают всем современным требованиям к амортизационным системам пассажирских самолетов и обладают высокой надежностью в процессе эксплуатации.

Однако, несмотря на преимущества существующих моделей ЖГА, постоянное совершенствование характеристик амортизации необходимо для соответствия современным стандартам комфорта и безопасности полетов, поэтому задача разработки эффективных методик для расчета амортизации шасси не теряет актуальности и в настоящее время. Построение математических моделей опор шасси позволяет сократить количество натурных испытаний путем проведения численных экспериментов и оптимизации их конструкции на этапе технического проектирования. Для внедрения такого подхода в процесс разработки и сопровождения эксплуатации ВС необходимы тщательные исследования по оценке точности разработанных моделей.

Большие сложности при анализе динамики опор шасси с ЖГА с привлечением математического моделирования возникают из-за многих

нелинейных эффектов, сопровождающих процесс работы этого типа амортизации. Из них наиболее важными являются нелинейно-вязкое трение при течении жидкости, сухое трение в манжетах и буксах, особенности восприятия вертикальной и продольной нагрузки пневматическими шинами. Особую сложность доставляет образование эмульсии в рабочей камере ЖГА вследствие интенсивного смешения рабочих тел при поглощении энергии посадочного удара.

Современный этап развития гражданской авиации, характеризующийся ростом требований к экономичности и безопасности полетов, а также сокращением сроков создания новых ВС, создает запрос на дальнейшее развитие методик анализа динамики опор шасси с ЖГА. При этом используемые модели должны сохранять высокую вычислительную эффективность, позволяющую обеспечить их применение на этапах проектирования и оптимизации конструкции ЖГА, что имеет существенное значение для повышения качества проектируемых посадочных устройств современных пассажирских ВС.

Целью диссертационной работы является разработка моделей динамики жидкостно-газовой амортизации опор шасси телескопического типа пассажирских ВС и методик их анализа, а также оптимизации конструктивных параметров ЖГА для повышения их функциональных характеристик.

Задачами диссертационного исследования являются:

- 1) разработка математических моделей опор шасси с однокамерным и двухкамерным ЖГА с учетом нелинейности их нагрузочных характеристик и внешней механики пневматических шин;
- 2) создание программного обеспечения (ПО), реализующего проведение виртуальных испытаний опор шасси по разработанным математическим моделям;
- 3) валидация математических моделей опор шасси ЖГА путем оценки погрешностей в определении интегральных характеристик качества амортизации, сопоставления временных реализаций нагрузок и кинематических параметров работы шасси при поглощении энергии посадочного удара ВС с данными испытаний;
- 4) оптимизация профиля иглы ЖГА основной опоры шасси ВС с целью улучшения энергоемкости и снижения нагруженности при посадке;
- 5) расчет динамики ВС при движении по ВПП.

Методы исследования, использованные в работе, включают классические методы аналитической механики и теории колебаний, нелинейной динамики, гидрогазодинамики, метод конечных элементов (МКЭ), а также явные и неявные методы численного интегрирования систем обыкновенных дифференциальных уравнений.

Научная новизна настоящей работы заключается в следующем.

1. Разработаны и валидированы на основе результатов натурных испытаний математические модели телескопических опор шасси с однокамерным и двухкамерным ЖГА как нелинейных динамических систем с неудерживающими голономными связями, описанными при помощи метода штрафных функций. В расчетах учтено содержание нерастворенного газа в рабочей жидкости ЖГА.

2. Разработана методика расчета изгибной жесткости телескопических опор, позволяющая в процессе решения уравнений движения системы учесть изменение жесткости при обжатии амортизатора, переменный закон изменения поперечных сечений штока и стакана опоры, а также жесткость подкоса.

3. Предложен подход к моделированию опор шасси телескопического типа с ЖГА при помощи МКЭ с автоматизированной подготовкой модели, предназначенный для расчетов динамики при ударном нагружении.

4. Предложен критерий оптимизации пассивных ЖГА с целью снижения нагруженности и повышения энергоэффективности амортизации в широком спектре посадочных весов ВС.

5. Выполнена оптимизация профиля иглы однокамерного ЖГА суррогатным методом глобальной оптимизации с целью снижения перегрузок и увеличения энергоемкости системы.

Достоверность результатов, полученных в работе, подтверждена многоуровневой проверкой путем сравнения с результатами натурных и численных экспериментов. Валидация разработанных моделей также проведена МКЭ в комплексе Simcenter Nastran Multistep Nonlinear SOL 402 (SAMCEF/MECANO) с привлечением программного пакета Simcenter Femap для подготовки модели.

Практическая значимость. Построенные модели телескопической опоры шасси с однокамерным и двухкамерным ЖГА пригодны для проведения расчетов амортизации на этапе технического и рабочего этапов проектирования ВС. Достигнутая точность моделирования, подтверждаемая сравнением с результатами натурных испытаний, позволяет проводить виртуальные эксперименты, сокращая затраты при доводке конструкции, а также использовать модели при оптимизации характеристик амортизации. Выполненные расчеты с привлечением авторских моделей и ПО использованы при проектировании перспективных отечественных пассажирских самолетов.

Положения, выносимые на защиту:

1) модели телескопических опор шасси с однокамерным и двухкамерным ЖГА, учитывающие нелинейный характер сил сжатия газа, сопротивления течению сжимаемой жидкости, содержащей нерастворенный газ, сил сухого трения в подвижных элементах, реакций пневматической шины при обжатии и скольжении, а также переменную жесткость опоры в лобовом направлении при обжатии;

- 2) метод определения закона изменения жесткости телескопической опоры шасси, позволяющий учесть взаимодействие между штоком и стаканом амортизатора посредством букс и переменное по длине поперечное сечение основных элементов опоры;
- 3) результаты численного расчета и анализа точности моделирования динамики опор шасси с ЖГА при поглощении энергии посадочного удара с различными подпрессоренными массами, температурой рабочих тел в амортизаторе, скоростью раскрутки колес и уровнями содержания нерастворенного газа в рабочей жидкости;
- 4) подход к моделированию телескопических опор шасси с ЖГА с применением МКЭ с учетом подвижного контакта между штоком и стаканом и нелинейных характеристик ЖГА и шины;
- 5) постановка и решение задачи оптимизации ЖГА с целью повышения показателей качества амортизации в широком диапазоне посадочных весов ВС;
- 6) результаты численного анализа динамики ВС при посадке и пробеге по ВПП.

Апробация результатов исследования. Основные положения настоящей работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

1. XXXIV Международная конференция «Машиноведение и инновации. Конференция молодых учёных и студентов» (Москва, 2022 г.);
2. IX Всероссийская научно-практическая конференция «Технологии разработки и отладки сложных технических систем» (Москва, 2023 г.).
3. XXXV Международная конференция «Машиноведение и инновации. Конференция молодых учёных и студентов» (Москва, 2023 г.).
4. Научно-техническая конференция «Прочность конструкций летательных аппаратов – 2024» (Жуковский, 2024 г.).
5. Межкафедральный семинар МГТУ им. Н.Э. Баумана по прикладной и теоретической механике и численным методам моделирования (Москва, 2024 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 научных работ, в том числе 5 работ в изданиях, входящих в перечень рецензируемых научных изданий ВАК при Минобрнауки России (2 из них – категория 1, 3 – категория 2), и 1 работа, индексируемая в базе данных Scopus.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и приложения. Общий объем составляет 176 страниц, 95 рисунков и 11 таблиц. Список литературы составляет 166 наименований.

Личный вклад автора. Все основные результаты диссертации, включая математические модели, методики, реализующее их ПО и результаты расчетов, получены автором лично. Анализ результатов экспериментальных исследований для валидации моделей выполнен автором на основе данных, предоставленных ПАО «Яковлев» и использованных с разрешения предприятия.

Благодарность. Автор выражает глубокую признательность за содействие коллективу конструкторского бюро инженерного центра ПАО «Яковлев».

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведено обоснование актуальности исследования, выполненного в рамках диссертации, обозначена цель и определены задачи. Сформулированы научная новизна, практическая значимость работы и положения, выносимые на защиту.

В первой главе описаны конструкции телескопических опор шасси перспективного отечественного пассажирского самолета, одно- и двухкамерных ЖГА, а также введены показатели качества амортизации при посадочном ударе:

- коэффициент полноты диаграммы

$$\Gamma = \frac{\int_0^{t_1} F_y \dot{u} dt}{\max[F_y] \cdot \max[u]}, \quad (1)$$

где u , \dot{u} – перемещение и скорость штока ЖГА, F_y – вертикальная реакция, t_1 – время первого посадочного удара (до момента отскока);

- перегрузка

$$Z = \max[F_y]/mg, \quad (2)$$

где mg – вес ВС, приходящийся на рассматриваемую опору шасси.

При оптимизации функциональных характеристик ЖГА коэффициент Γ подлежит максимизации, а Z – минимизации.

В главе дан краткий исторический очерк развития конструкций шасси пассажирских самолетов и ЖГА, а также представлен обзор научных работ, посвященных изучению динамики шасси ВС – начиная от простых моделей с одной (P. Callero, B.P. Ветчинкин) и двумя степенями свободы (А.А. Белоус, B. Milwitsky, F.E. Cook), переходя к более подробному анализу динамики ЖГА (В.Г. Дмитриев, В.Л. Дрожжин, M.K. Wahи) и разработке комплексных моделей шасси (В.Д. Чубань, Т.В. Снисаренко, Е.Г. Подружин, А.Р. Загидуллин, W. Krüger, J.-C. Marè). Отмечены достоинства и недостатки современных моделей шасси с ЖГА и выделены направления, развивающиеся в настоящем исследовании.

Во второй главе представлена математическая модель динамики телескопической опоры шасси с одно- или двухкамерным ЖГА, построенная в соответствии со следующими гипотезами о протекающих в нем процессах:

- газ является идеальным;
- процесс изменения объема газа в амортизаторе политропный;
- рабочая жидкость считается вязкой и сжимаемой;

- режим течения рабочей жидкости через проходные отверстия турбулентный;
- в качестве модели сухого трения принят закон Амонтона-Кулона;
- влияние температуры на характеристики ЖГА учитывается путем введения зависимости объема рабочей жидкости от температуры.

Расчетные схемы телескопической опоры шасси с однокамерным и двухкамерным амортизаторами изображены на Рисунке 1 a и 1 b соответственно.

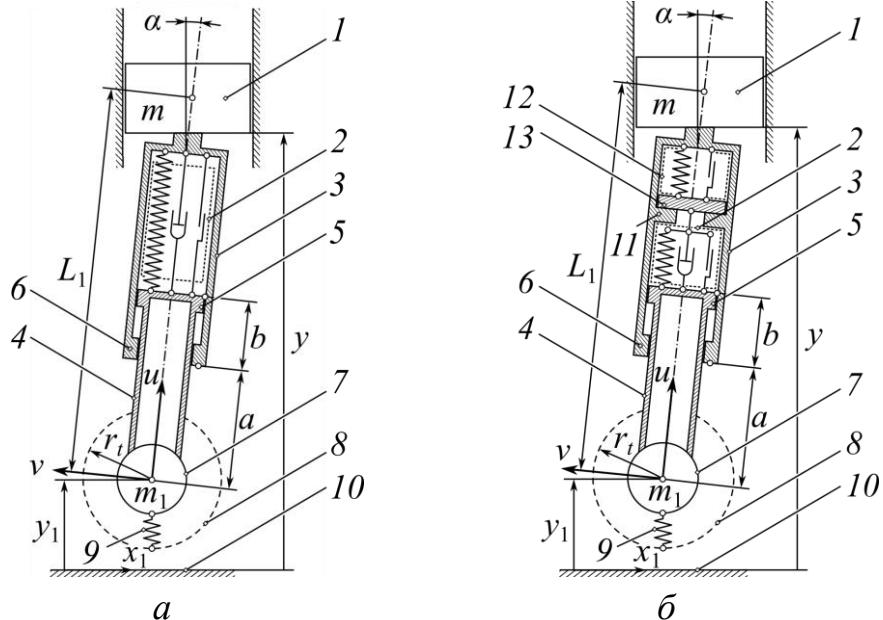


Рисунок 1. Расчетные схемы опор шасси с однокамерным (a) и двухкамерным (b) ЖГА: 1 – точечная масса груза, 2 – связь, моделирующая работу камеры низкого давления, 3 – стакан, 4 – шток, 5 – подвижная букса, 6 – неподвижная букса, 7 – точечная масса колес и подвижных частей ЖГА, приведенная к оси колес, 8 – пневматическая шина, 9 – связь, моделирующая обжатие шин, 10 – опорная поверхность, 11 – диафрагма с заплечиком, 12 – связь, моделирующая работу камеры высокого давления, 13 – плавающий поршень

В вектор состояния включены вертикальное перемещение точки крепления стойки y , осевое и лобовое перемещения оси колес u и v , угол поворота колес ϕ . Перечисленные степени свободы образуют вектор обобщенных координат

$$\{q\} = \{y \ u \ v \ \phi\}^T. \quad (3)$$

На осевое перемещение штока наложено ограничение $u \geq 0$, обеспечивающее сохранение положения штока в ненагруженной опоре. Игнорирование этого ограничения затрудняет анализ повторных ударов при посадке ВС. Связь в виде неравенства можно заменить на равенство с использованием функции Хэвисайда:

$$C(u) = uH(-u) = 0. \quad (4)$$

Вариационный принцип наименьшего действия Остроградского-Гамильтона для произвольного конечного промежутка времени $[t_0, t_1]$ формулируется с привлечением метода штрафных функций

$$\int_{t_0}^{t_1} \left[\delta \left(\Lambda + \frac{1}{2} \kappa C^2 \right) + \delta A \right] dt = 0, \quad (5)$$

где $\Lambda = T - \Pi$ – лагранжиан механической системы, T – кинетическая энергия, Π – потенциальная энергия системы в поле силы тяжести, $\frac{1}{2} \kappa C^2$ – штрафная функция, κ – параметр штрафа, $\delta A = Q_y \delta y + Q_u \delta u + Q_v \delta v + Q_\varphi \delta \varphi$ – виртуальная работа всех сил за исключением сил тяжести.

Обобщенные силы определяются как

$$\begin{aligned} Q_y &= F_a + n_t F_y, \\ Q_u &= -F_g - F_o - F_{fb} - F_{fm} + n_t (F_y \cos \alpha + F_x \sin \alpha), \\ Q_v &= -k_1 v - d_1 \dot{v} + n_t (F_y \sin \alpha - F_x \cos \alpha), \\ Q_\varphi &= -n_t F_x (r_t - \eta), \end{aligned} \quad (6)$$

где F_a – подъемная сила при посадке самолета или сила, созданная амортизаторами разгрузки при копровых испытаниях, F_x , F_y – горизонтальная и вертикальная реакции шины колеса (n_t – количество колес, r_t – радиус шины, η – ее обжатие), F_g – упругая реакция ЖГА, F_o – сила гидравлического сопротивления, F_{fb} , F_{fm} – силы трения в буксах и манжетах, α – угол наклона опоры. Зависимости (6) учитывают изгибную (лобовую) жесткость опоры k_1 и коэффициент демпфирования d_1 .

Условие стационарности функционала действия (5) приводит к системе обыкновенных дифференциальных уравнений

$$[M] \{ \ddot{q} \} = \{ Q \} - \{ R \} - \{ G \}, \quad (7)$$

где $\{ Q \} = \{ Q_y \ \ Q_u \ \ Q_v \ \ Q_\varphi \ }^\top$ – вектор обобщенных сил,

$\{ R \} = \{ 0 \ \ \kappa u H(-u) \ \ 0 \ \ 0 \ }^\top$ – вектор реакций связей,

$\{ G \} = \{ (m + m_l) g \ \ m_l g \cos \alpha \ \ m_l g \sin \alpha \ \ 0 \ }^\top$ – вектор сил тяжести.

Упругая составляющая реакции F_g для однокамерного ЖГА имеет вид

$$F_g = p_0 S \frac{T}{T_0} \frac{V_0}{[V_0 - \beta_T (T - T_0) V_{0l}]} \left(1 - \frac{S u}{V_0 - \beta_T (T - T_0) V_{0l}} \right)^{-\chi}, \quad (8)$$

где p_0 , V_0 – зарядное давление и начальный объем газа, χ – показатель политропы, S – площадь, ограниченная внутренним контуром сечения стакана, $\beta_T(T)$ – коэффициент температурного расширения масла, T – актуальная температура, T_0 – температура, при которой выполнялась зарядка амортизатора, V_{0l} – исходный объем масла, залитого в амортизатор.

Для двухкамерного ЖГА вместо (8) используется выражение

$$F_g = p_{01} \left(S - \hat{S} \right) \frac{T}{T_0} \frac{V_0}{\left[V_0 - \beta_T (T - T_0) V_{0l} \right]} \left(1 - \frac{S u - \hat{S} \hat{u}}{V_0 - \beta_T (T - T_0) V_{0l}} \right)^{-\chi}, \quad (9)$$

где p_{01} – зарядное давление в камере низкого давления, \hat{S} – площадь плавающего поршня, \hat{u} – перемещение плавающего поршня, определяемое из нелинейного уравнения его равновесия

$$p_{01} \frac{V_0}{\left[V_0 - \beta_T (T - T_0) V_{0l} \right]} \left(1 - \frac{S u - \hat{S} \hat{u}}{V_0 - \beta_T (T - T_0) V_{0l}} \right)^{-\chi} = p_{02} \left(1 - \frac{\hat{S} \hat{u}}{\hat{V}_0} \right)^{-\hat{\chi}}, \quad (10)$$

где p_{02} , \hat{V}_0 – зарядное давление и начальный объем газа в камере высокого давления, $\hat{\chi}$ – показатель политропы в камере высокого давления.

Для ускорения вычислительного процесса расчет характеристики силы давления газа $F_g(u)$ выполняется один раз перед интегрированием, после чего значения F_g на каждом шаге интегрирования получаются путем интерполяции.

Действие силы гидравлического сопротивления F_o обеспечивается перепадом давлений между камерами ЖГА

$$F_o = (p - p_A) S_A + (p - p_C) S_C, \quad (11)$$

где (p_A, S_A) , (p_C, S_C) – давления и площадь сечения гидравлической камеры (A) и камеры торможения (C), p – давление газа. Давления определяются из системы дифференциальных уравнений, интегрируемых совместно с уравнениями (7)

$$\begin{cases} \dot{p}_A = \frac{B}{V_A^0 - S_A u} \left(\mu_{AB} f_{AB} \sqrt{\frac{2|p - p_A|}{\rho}} \operatorname{sign}(p - p_A) + S_A \dot{u} \right), \\ \dot{p}_C = \frac{B}{V_C^0 + S_C u} \left(\mu_{BC} f_{BC} \sqrt{\frac{2|p - p_C|}{\rho}} \operatorname{sign}(p - p_C) - S_C \dot{u} \right), \end{cases} \quad (12)$$

где ρ и B – плотность и модуль объемного сжатия рабочей жидкости, V_A^0 , V_C^0 – начальные объемы камер, μ_{AB} , μ_{BC} – коэффициенты расхода, f_{AB} , f_{BC} – площади сечений проходных отверстий ЖГА, которые, в зависимости от конструкции амортизатора, зависят от перемещения u и скорости \dot{u} штока. В частности, при наличии иглы f_{AB} представляет собой кусочно-линейную функцию u , а если камера торможения ЖГА оснащена разрезным кольцом, то $f_{BC} = f_{BC}(\operatorname{sign} \dot{u})$.

Силы сухого трения в буксах телескопических стоек F_{fb} вычисляются через реакции в буксах, центрирующих шток амортизатора в стакане. Силы трения в манжетах F_{fm} полагаются пропорциональными давлению газа в рабочей камере.

Вертикальная реакция при обжатии шины F_y определяется по модели В.Л. Бидермана

$$F_y(\eta) = \frac{\eta^2}{c_1 + c_2 \frac{\eta}{c_3 + p_t}}, \quad (13)$$

где $c_1 - c_3$ – параметры модели, p_t – зарядное давление в шине, η – обжатие, вычисляемое с учетом точечного контакта с опорной поверхностью. Параметры определяются методом наименьших квадратов путем обработки опытных кривых обжатия шин при различном зарядном давлении.

Горизонтальная реакция F_x при качении шины с частичным проскальзыванием считается пропорциональной вертикальной силе (13) как $F_x = \mu_s F_y$. Коэффициент трения скольжения $\mu_s(s)$ зависит от относительной скорости скольжения $s = [\dot{x}_1 - \dot{\phi}(r_t - \eta)] / (|\dot{x}_1| + \varepsilon)$, где \dot{x}_1 – горизонтальная скорость оси колеса, ε – малое положительное число, позволяющее избежать сингулярности при вычислениях.

При моделировании копровых испытаний учитывается *сила разгрузки* F_a , воссоздающая действие подъемной силы на ВС в процессе посадки и определяемая согласно нормам АП-25 (НЛГ-25).

Лобовая жесткость телескопической опоры шасси k_1 значительно изменяется при обжатии ввиду изменения геометрии стойки, что приводит к необходимости ее пересчета в процессе интегрирования уравнений движения. С этой целью разработан алгоритм расчета лобовой жесткости, основанный на применении метода сил к балочной модели, изображенной на Рисунке 2. В расчетах учитываются линейная k_t и угловая k_r жесткости подкоса, а также переменные законы изменения изгибных и сдвиговых жесткостей штока и стакана.

Для численного интегрирования уравнений (7) в условиях посадки и пробега с учетом представленных выше моделей сил, действующих на стойку, разработан пакет программ, написанный на языках Python и С. Для интегрирования используется метод LSODA, позволяющий учесть переменную структуру системы дифференциальных уравнений, связанную со штрафным слагаемым.

В третьей главе проведена валидация моделей телескопических опор шасси с однокамерным и двухкамерным ЖГА по результатам натурных копровых испытаний передней и основной опор шасси (ПОШ и ООШ) перспективного отечественного пассажирского самолета, предоставленных ПАО «Яковлев».

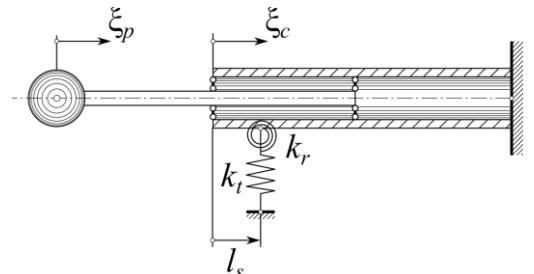


Рисунок 2. Балочная расчетная схема телескопической опоры шасси с подкосом

Сравнение с испытаниями (Рисунки 3 и 4), выполненными в широком диапазоне энергий удара, скоростей раскрутки колес и температур, показало удовлетворительное соответствие силовых и кинематических факторов задачи данным экспериментов.

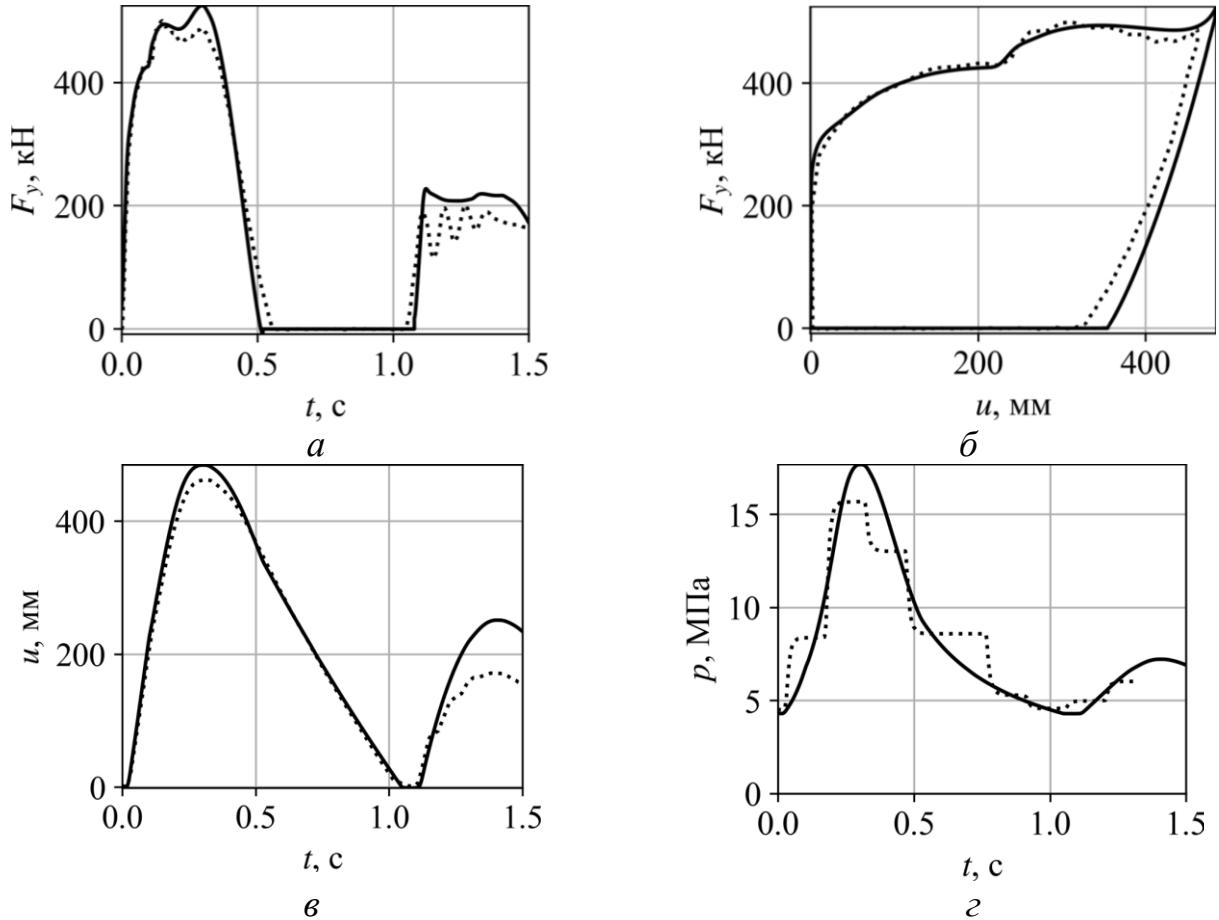


Рисунок 3. Сравнение вертикальных реакций (*а*), нагрузочных характеристик (*б*), обжатий (*в*), давлений газа в рабочей камере (*г*) опоры с однокамерным ЖГА, полученных расчетом (сплошные кривые) с результатами испытаний (пунктиры)

Для дополнительной валидации математической модели шасси и ее применения в расчетах динамической прочности планера ВС и его агрегатов, в программном комплексе Simcenter Femap v2301 разработана конечно-элементная модель (КЭМ) опоры шасси с моделью ЖГА, максимально приближенной к исходной математической модели. Схема КЭМ представлена на Рисунке 5. Нелинейные характеристики амортизатора введены при помощи 1D-элементов CBUSH1D, односторонний контакт между буксами и шиной с опорной поверхностью – GAP. Упругий скользящий контакт штока и стакана стойки (СВЕАМ) смоделирован специальными элементами FLXSLI. Для автоматизации создания модели и проведения расчетов в условиях посадочного удара разработана программа с графическим интерфейсом.

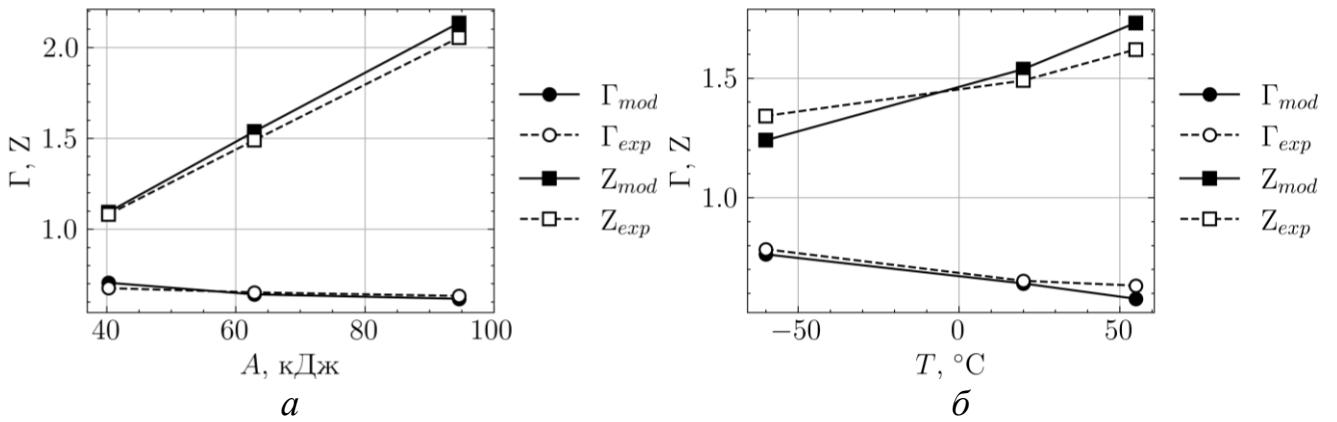


Рисунок 4. Сравнение расчетных показателей качества амортизации опоры с двухкамерным ЖГА с результатами испытаний при различных значениях энергии удара (а) и температуры масла в амортизаторе (б)

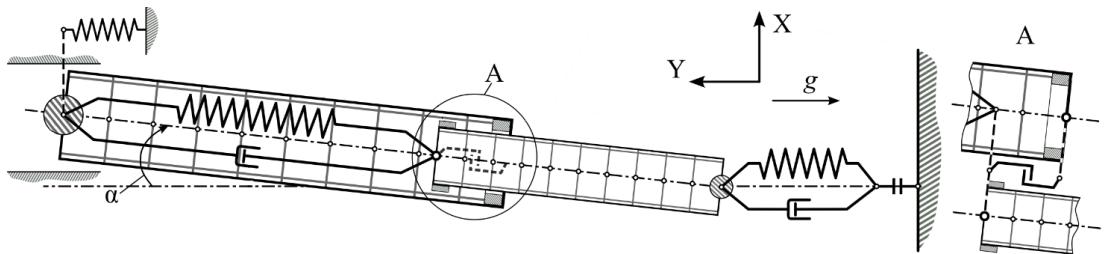


Рисунок 5. Схема КЭМ опоры шасси с ЖГА

Анализ переходного процесса в разработанной модели при поглощении посадочного удара выполнен с привлечением программного комплекса SAMCEF/MECANO (Simcenter Nastran SOL402). Результаты конечно-элементного моделирования, представленные в главе 3, весьма близки к расчетам по уравнениям (7).

Четвертая глава посвящена оптимизации параметров качества амортизации Γ , Z телескопических опор шасси ЖГА в условиях поглощения энергии удара ВС при посадке. Достижение наилучшего сочетания параметров качества обеспечивается путем отыскания оптимальной формы профиля иглы, регулирующей ток жидкости из гидравлической в рабочую камеру ЖГА. Постановка задачи оптимизации

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N [-\omega_{1i}Z_i(X) + \omega_{2i}\Gamma_i(X)] \rightarrow \max, \\ X \in \mathbb{R}^{n+1} \setminus x_i^{\min} \leq x_i \leq x_i^{\max}, i = \overline{1, n+1} \end{cases} \quad (14)$$

где $N = 3$ – число расчетных случаев с различными посадочными весами ВС, ω_{1i} , ω_{2i} – весовые коэффициенты, $X = \{p_0 \quad d_1 \quad d_2 \quad \dots \quad d_n\}^T$ – вектор проектных переменных размерностью $(n+1) \times 1$, в который, помимо значений диаметров,

определяющих форму профиля, включено зарядное давление p_0 газа в амортизаторе. Величины x_i^{\min}, x_i^{\max} определяют границы поиска решения.

Рассмотрено два закона задания профиля иглы – кусочно-линейный и кубический сплайн с естественными граничными условиями (Рисунок 6).

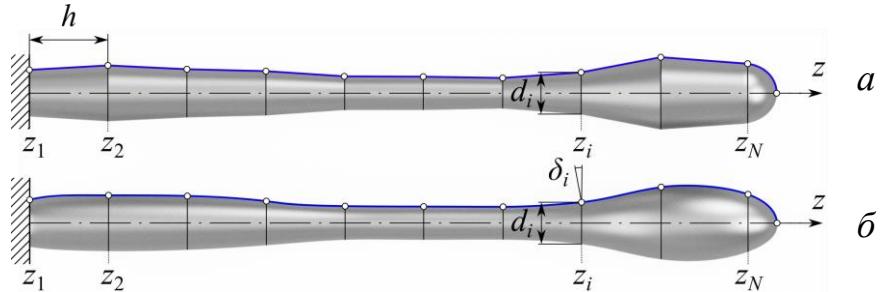


Рисунок 6. Представление профиля иглы в виде: *а* – кусочно-линейной функции, *б* – кубического сплайна

Задача оптимизации решена в программном комплексе MATLAB методом суррогатной оптимизации. Сравнение качества амортизации исходной и оптимизированной конструкции ЖГА приведено на Рисунке 7. Оптимизация по предложенной методике позволяет улучшить характеристики энергоемкости опор шасси и перегрузок в центре тяжести (ЦТ) при посадке на величину до 16,4%.

В пятой главе с применением разработанных моделей выполнен анализ динамики ВС на пробеге от касания до полной остановки. При моделировании принят ряд гипотез.

1. Исключается влияние факторов, приводящих к посадке ВС с креном. Управление по тангажу осуществляется по заданному закону отклонения рулей высоты.

2. Горизонтальная составляющая скорости ВС $V_x(t)$ считается известной.

3. Угол атаки β мал. Так как траектория на рассматриваемом участке слабо отличается от прямолинейной, различие между углами атаки и тангажа пренебрежимо мало.

4. Влиянием сил инерции, связанных с тангажом ВС и действующих на

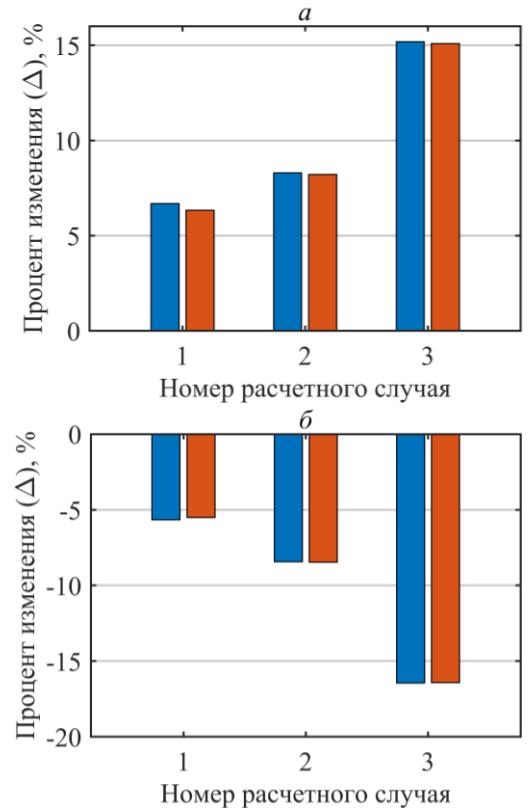


Рисунок 7. Относительное изменение коэффициентов полноты диаграммы Г (*а*) и перегрузок в ЦТ Z (*б*) относительно исходной конструкции для кусочно-линейной (синий) и сплайн-интерполяции (красный)

подвижные элементы опор шасси, пренебрегаем.

5. Аэродинамические нагрузки, действующие на самолет, характеризуются силой $F_a = c_{ya}(\beta, \delta_{PB}) \rho_a V_x^2 S_{kp} / 2$ и моментом $\mathfrak{M}_a = m_z(\beta, \dot{\beta}, \delta_{PB}) \rho_a V_x^2 S_{kp} b_{kp} / 2$ (c_{ya} , m_z – коэффициенты подъемной силы и аэродинамического момента тангажа, ρ_a – плотность воздуха на высоте $H = 0$ м, S_{kp} – площадь крыла по базовой трапеции, b_{kp} – средняя аэродинамическая хорда, δ_{PB} – угол отклонения руля высоты).

6. Учет упругости планера ВС выполняется методом главных координат, в котором используется разложение по собственным формам ВС.

Посадка ВС описывается уравнениями

$$\begin{aligned} M\ddot{y} &= F_{y1} + F_{y2} + F_a - Mg, \\ J\ddot{\beta} &= F_{y1}l_1 - F_{y2}l_2 + \mathfrak{M}_a, \end{aligned} \quad (15)$$

где y – вертикальное перемещение ЦТ, M и J – его масса и момент инерции соответственно, (F_{y1}, l_1) , (F_{y2}, l_2) – вертикальные реакции и расстояния по горизонтали от ЦТ до точек крепления ПОШ и ООШ.

Система (15) дополняется уравнениями в главных координатах, позволяющими учесть динамическую податливость планера самолета:

$$\ddot{w}_i + 2\nu_{0i}\delta_i\dot{w}_i + 4\pi^2\nu_{0i}^2w_i = \mu_i^{-1}(\phi_{i1}F_{y1} + \phi_{i2}F_{y2}) \quad (16)$$

где w_i – главные координаты, ν_{0i} – собственные частоты планера, μ_i – обобщенные массы, ϕ_{i1} и ϕ_{i2} – перемещения точек установки ПОШ и ООШ по формам колебаний, δ_i – логарифмические декременты затухания колебаний по собственным формам. Перечисленные величины определяются результатами натурных наземных частотных испытаний самолета.

Реакции ПОШ F_{y1} и ООШ F_{y2} определяются путем интегрирования модифицированных уравнений движения (7):

$$\begin{cases} m_i\ddot{u}_i = n_t(F_{yi}\cos\alpha_i + F_{xi}\sin\alpha_i) - F_\Sigma^i - \kappa u_i H(-u_i) - m_i(g + \ddot{y}_i)\cos\alpha_i, \\ m_i\ddot{v}_i = -k_{li}\nu_i - d_{li}\dot{v}_i + n_t(F_{xi}\cos\alpha_i - F_{yi}\sin\alpha_i) - m_i(g + \ddot{y}_i)\sin\alpha_i, \\ J_i\ddot{\phi}_i = -n_t F_{xi}(r_{ti} - \eta_i), \end{cases} \quad (17)$$

где $i = 1$ для ПОШ, $i = 2$ для ООШ, $F_\Sigma^i = F_g^i + F_o^i + F_{fb}^i + F_{fm}^i$, y_i – перемещения точек крепления опор:

$$y_1 = y + l_1\beta + \sum_{i=1}^{n_m} \phi_{i1} w_i - h_1, \quad y_2 = y - l_2\beta + \sum_{i=1}^{n_m} \phi_{i2} w_i - h_2, \quad (18)$$

где h_1 , h_2 – расстояния по вертикали от ЦТ до точек крепления ПОШ и ООШ соответственно по вертикали, n_m – число учитываемых собственных форм.

Итоговая система дифференциальных уравнений складывается из двух уравнений (15), шести уравнений (17) и n_m уравнений (16). Поскольку каждое уравнение имеет 2-й порядок, общий порядок системы составляет $16 + 2n_m$. Начальные условия включают в себя условия продольного управления ВС.

Выполнены два расчета. Первый расчет соответствует посадке ВС на идеальную ВПП с гладким профилем. Второй учитывает наличие деформационных швов на бетонной ВПП, расположенных с шагом $l_p = 6$ м и имеющих ширину $b_p = 50$ мм. Профиль деформационных швов по их ширине задавался по закону полуволны косинуса. Для оценки воздействия на пилотов вычисляется перегрузка в зоне кабины экипажа:

$$n_p = \ddot{y}_p / g = (\ddot{y} + l_p \ddot{\beta}) / g, \quad (19)$$

где l_p – расстояние от ЦТ ВС до линии установки кресел пилотов. Аналогичным образом вычисляется перегрузка в ЦТ:

$$n_y = \ddot{y} / g. \quad (20)$$

Результаты расчета динамики ВС при посадке и пробеге по неровной ВПП представлены на Рисунке 8.

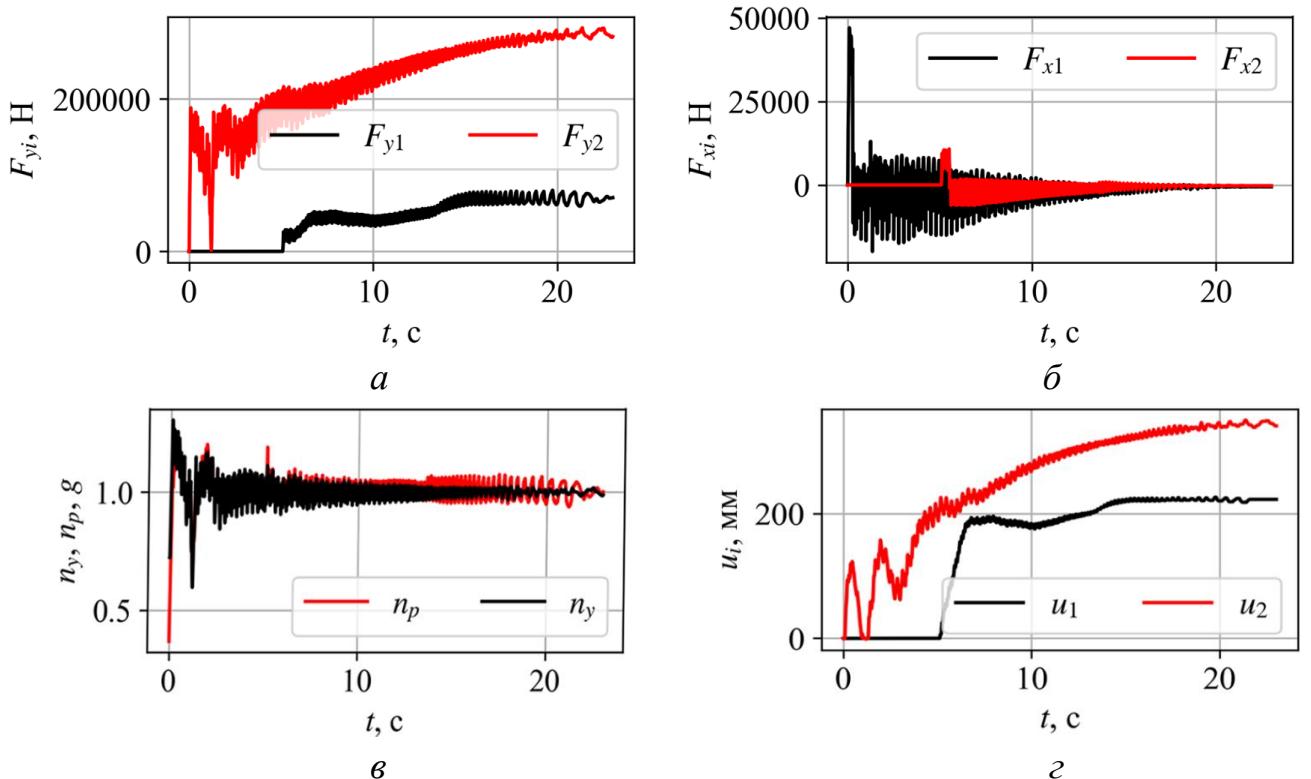


Рисунок 8. Результаты расчета динамики ВС при посадке на ВПП с деформационными швами: *а* – вертикальные реакции, *б* – горизонтальные реакции, *в* – перегрузки в зоне кабины экипажа и ЦТ ВС, *г* – обжатия ЖГА

Как следует из Рисунка 8в, перегрузки в кабине экипажа весьма небольшие. Можно отметить увеличение их колебательной составляющей при $t > 13$ с вплоть до остановки движения, что соответствует скоростям пробега $V_x < 125$ км/ч. Это связано с незначительным по уровню возбуждением колебаний самолета по тангажу. Пиковые значения перегрузок при посадке на неровную ВПП превышают таковые для гладкой ВПП на 11,6%.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам выполненной работы сформулированы следующие выводы.

1. Разработаны математические модели опор шасси телескопического типа, оснащенных однокамерными и двухкамерными ЖГА. В моделях учтены нелинейные эффекты, связанные с изменением объема газа, перетеканием рабочей жидкости, силами трения в буксах и уплотнениях, вертикальной и горизонтальной реакцией пневматических шин, изменением лобовой жесткости опоры при перемещении штока. Учтено влияние нерастворенного газа в рабочей жидкости, приводящее к снижению ее модуля объемной упругости. Предложенный подход отличается от известных моделей использованием метода штрафных функций для описания одностороннего контакта букс, благодаря чему удается сформулировать единую систему дифференциальных уравнений движения постоянного порядка, пригодную для всех этапов расчета амортизации шасси и наземных нагрузок.

2. Предложен метод расчета переменной лобовой жесткости опоры на основе стержневой модели с учетом переменного поперечного сечения штока и стакана амортизатора. Выполнен учет сдвиговых деформаций по модели Тимошенко.

3. Путем сопоставления многочисленных расчетов с результатами натурных копровых испытаний опор шасси пассажирского магистрального самолета выполнена оценка адекватности и точности построенных моделей. Достигнутая точность определения силовых и кинематических факторов позволяет использовать модели при расчетах посадки и пробежки самолета. Относительная погрешность в расчетах интегральных характеристик амортизации составляет величины не более 8,7%, при этом при анализе ударных воздействий в нормальных условиях эксплуатации погрешность достигает не более 3,8% для опоры шасси с однокамерным амортизатором и 3,2% – с двухкамерным.

4. Предложен подход к конечно-элементному моделированию телескопических опор с ЖГА. В программном комплексе Simcenter Femap разработаны средства автоматизированного создания моделей опор, значительно облегчающие этот процесс. Обеспечено точное воспроизведение нелинейных упругих и диссипативных характеристик амортизатора и шины. Выполнены расчеты

нелинейной динамики шасси при ударном нагружении, показавшие хорошее соответствие результатам экспериментов и численного моделирования по п. 3.

5. Решена задача параметрической оптимизации ЖГА с целью повышения качества амортизации при посадке. На основе анализа существующих критериев качества, основанных на форме нагрузочных характеристик ЖГА, предложен новый критерий, позволяющий охватить широкий спектр посадочных весов воздушного судна. Выполнен расчет оптимального профиля иглы, регулирующей площадь проходных отверстий в амортизаторе, за счет изменения геометрии которой удается снизить нагруженность и увеличить энергоемкость амортизатора на 16,4% по сравнению с исходной конструкцией.

6. Исследована динамика самолета в условиях посадки и пробега. Построена математическая модель, учитывающая аэродинамические нагрузки и упругие свойства планера самолета. Предложен рациональный способ представления кинематического воздействия, периодического в пространстве. Выполнены расчеты посадки и пробега пассажирского самолета по искусственной взлетно-посадочной полосе, определен вклад воздействия со стороны неровностей полосы аэродрома в перегрузки в зоне кабины экипажа и ЦТ самолета, достигающий величины 11,6%.

7. Разработан комплекс компьютерных программ, реализующий описанные методы расчета и решения задач виртуальных копровых испытаний опор шасси, посадки и пробега самолета. Методики и авторское программное обеспечение внедрены для использования в конструкторском бюро ПАО «Яковлев».

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Аликин Н.А., Никитин Е.А. Расчет колебаний самолета при движении по искусственной взлетно-посадочной полосе // Технологии разработки и отладки сложных технических систем: IX Всероссийская научно-практическая конференция, Москва, 2023. Т. 1. С. 15–23. (0,75 п.л. / 0,38 п.л.)
2. Аликин Н.А., Никитин Е.А. Расчет шасси пассажирского самолета при ударном нагружении методом конечных элементов // XXXV Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов (МИКМУС-2023): Тезисы докладов международной конференции, Москва, 2023. С. 263–270. (0,63 п.л. / 0,46 п.л.)
3. Белкин А.Е., Дашибаев И.З., Никитин Е.А. Нелинейный анализ виброзоляции груза, установленного в контейнере на полиуретановых амортизаторах тоннельного типа // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2019. №7. С. 88–96. (0,56 п.л. / 0,35 п.л.)

4. Белкин А.Е., Дашибаев И.З., Никитин Е.А. Расчет нелинейной циклически симметричной системы амортизации груза в контейнере при плоских гармонических колебаниях // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Машиностроение. 2021. Т. 139, №4. С. 32–50. (1,67 п.л. / 0,8 п.л.)
5. Физическое и математическое моделирование виброизоляции груза в контейнере с применением полиуретановых амортизаторов / Е.А. Никитин [и др.] // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2018. Т. 700, №7. С. 11–19. (1,03 п.л. / 0,33 п.л.)
6. Белкин А.Е., Никитин Е.А. Расчет системы амортизации шасси пассажирского самолета при ударном нагружении // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2023. Т. 146, №3. С. 29–49. (1,85 п.л. / 1,5 п.л.)
7. Никитин Е.А., Белкин А.Е. Моделирование копровых испытаний опор шасси пассажирского самолета // XXXIV Международная инновационная конференция молодых ученых и студентов по современным проблемам машиноведения (МИКМУС-2022): Тезисы докладов международной конференции, Москва, 2022. С. 137–144. (0,63 п.л. / 0,51 п.л.)
8. Никитин Е.А., Белкин А.Е. Оптимизация профиля иглы жидкостно-газового амортизатора опоры шасси самолета // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2023. Т. 762, №9. С. 3–13. (1,26 п.л. / 0,92 п.л.)
9. Никитин Е.А., Белкин А.Е. Оптимизация профиля иглы жидкостно-газового амортизатора опоры шасси самолета // Технологии разработки и отладки сложных технических систем: IX Всероссийская научно-практическая конференция, Москва, 2023. Т. 2. С. 88–94. (0,75 п.л. / 0,65 п.л.)
10. Nikitin E.A., Belkin A.E. Analysis of vibration isolation of a cargo mounted on polyurethane shock absorbers // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 747, Is. 1. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/747/1/012058> (дата обращения 18.12.2024). (0,45 п.л. / 0,25 п.л.)