

Моделирование работы стоек шасси летательного аппарата с пластически деформируемыми амортизаторами

© А.А. Сумерин, Г.А. Щеглов

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

Рассмотрена возможность использования новой схемы амортизации колесного трехстоечного шасси воздушно-космического самолета легкого класса, основанной на применении трехсекционного краш-бокса однократного действия, который заменяется в процессе межполетного обслуживания. Численное моделирование штатного и нештатного режима работы стоек шасси проводилось в пакете LS-DYNA программного комплекса ANSYS. Проведен анализ энергопоглощающих характеристик краш-боксов различной геометрии с несколькими схемами стоек шасси с целью выявления конструкции, имеющей наиболее предсказуемые и прогнозируемые деформации, а также сбалансированные энергопоглощающие характеристики. Показано, что использование краш-боксов, аналогичных по конструкции применяемым в системах пассивной безопасности автомобилей, позволяет существенно сократить вес системы шасси орбитального самолета при сохранении необходимых энергопоглощающих характеристик шасси. Выигрыш по массе по сравнению с классическим амортизатором самолета, схожего по посадочной массе с представленным в работе, составляет 18,4 кг, или в 12,5 раз.

Ключевые слова: *воздушно-космический самолет, стойка шасси, пластические деформации, краш-боек, кинетическая энергия удара, LS-DYNA*

Введение. Создание многоцветных аэрокосмических систем, в состав которых входят орбитальные самолеты, совершающие вертикальный старт на ракете-носителе и горизонтальную посадку на взлетно-посадочную полосу, остается актуальной задачей в настоящее время, несмотря на частично успешный опыт разработки и эксплуатации тяжелых пилотируемых аппаратов Space Shuttle и «Буран». Перспективные беспилотные орбитальные самолеты легкого класса будут иметь меньшую размерность и массу, а также более длительный срок активного существования на орбите, чем их предшественники. Примером успешно реализованного проекта является созданный в США орбитальный самолет Boeing X-37, имеющий массу около 5 т [1]. Аналогичный аппарат недавно был испытан в КНР [2].

Для подобных аппаратов относительно малой массы большое значение имеет высокое весовое совершенство всех бортовых систем. Одной из специфических систем для орбитального самолета является шасси — система опор (стоек), обеспечивающая гашение остаточной вертикальной скорости, передвижение по аэродрому при пробеге и рулении, а также стоянку [3–5]. У известных прототипов орбитальных

самолетов шасси выполнено трехстоечным колесным. Специфика данной системы, масса которой составляет около 5 % общей массы аппарата [6], состоит в том, что она используется только один раз в конце миссии и, следовательно, совершает длительный космический полет фактически в качестве балласта, уменьшая массу полезного груза и, тем самым, снижая экономическую эффективность решения целевой задачи. Таким образом, снижение массы шасси орбитального самолета легкого класса является актуальной задачей.

Взаимодействие шасси с грунтом при посадке можно классифицировать как удар. Амортизационные свойства шасси определяются характеристиками амортизатора, так как на него приходится основная доля (около 80...85 %) поглощенной энергии удара при посадке самолета на взлетно-посадочную полосу [3]. Остальные доли поглощаются за счет работы сил трения и деформации пневматиков колес. В современной инженерной практике применяются различные способы гашения энергии удара. В частности, в автомобилестроении существует система пассивной безопасности, состоящая из различных конструктивных решений для силового каркаса, а также из так называемых краш-боксов [7–9]. Применение краш-боксов в составе посадочного устройства возвращаемого аппарата капсульного типа было рассмотрено в работе [10].

Краш-бокс представляет собой тонкостенный коробчатый элемент, выполненный, как правило, из высокопрочных сталей, а иногда из алюминиевых сплавов или углепластикового волокна. Такие элементы одноразового действия дешевы в изготовлении, имеют простую конструкцию, а главное — малую массу.

При ударе краш-бокс начинает сминаться, затрачивая кинетическую энергию удара на деформацию. Для поглощения кинетической энергии краш-бокс должен иметь такую конструкцию, которая обеспечивала бы равномерное замедление кузова автомобиля при практически мгновенной остановке переднего конца. Для того чтобы краш-бокс при ударе поглотил большое количество кинетической энергии автомобиля, необходимо обеспечить значительную вытяжку материала, желательно в нескольких местах — концентраторах напряжений [7]. В противном случае произойдет разрыв материала, и поглощение энергии прекратится.

Цель работы — исследование возможности снижения массы стоек шасси орбитального самолета легкого класса за счет использования краш-боксов в качестве амортизаторов.

Для достижения указанной цели выполнялось численное моделирование работы стоек шасси летательного аппарата с пластически деформируемыми амортизаторами.

Постановка задачи. В качестве прототипа орбитального самолета легкого класса рассматривается аппарат, который близок по своим

характеристикам к экспериментальному самолету МиГ-105, созданному в рамках проекта «Спираль» [11]. Начальные условия нагружения шасси были определены в момент окончания парашютирования при посадке. Летательный аппарат массой $m_{\text{пос}}$, имеющий горизонтальную скорость V_{min} , начинает свободное падение с высоты H с нулевой вертикальной скоростью [12].

Вертикальная составляющая скорости в конце парашютирования вычисляется по формуле

$$V_y = \frac{g_0^2 C_x t^2}{V_{\text{min}} C_y}, \quad (1)$$

где g_0 — ускорение свободного падения; C_x , C_y — аэродинамические коэффициенты аппарата по осям x , y ; t — время парашютирования,

$$t = \sqrt[3]{\frac{3hV_{\text{min}}C_y}{g_0^2 C_x}}. \quad (2)$$

Кинетическая энергия аппарата, которую требуется погасить,

$$E_{\text{кин}} = \frac{m_{\text{пос}} V_y^2}{2}. \quad (3)$$

В ходе работы были рассмотрены две схемы стоек шасси, показанные на рис. 1. Первая из них, обозначенная как L-схема (рис. 1, а), имеет один выносной амортизатор, во второй, обозначаемой как V-схема (рис. 1, б), используются два амортизатора.

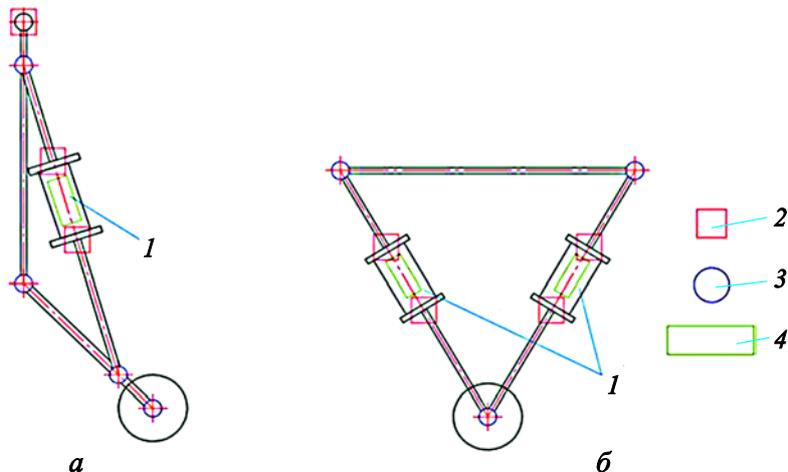


Рис. 1. Кинематические L-схема (а) и V-схема (б) стоек шасси:

1 — краш-бокс; 2 — заделка; 3 — цилиндрический шарнир; 4 — поступательная пара

В качестве амортизаторов в данных схемах используются краш-боксы. Прочие звенья механизмов стоек, в том числе и колесо, в расчете условно считались невесомыми и абсолютно жесткими. Типы кинематических пар отмечены на рис. 1.

Поверхность грунта, с которой контактирует колесо шасси в расчетной схеме, рассматривалась как абсолютно жесткая и плоская. Заданные условия контакта с грунтом допускали выход из контакта (отскок колеса). В условиях контакта заданный коэффициент трения между колесом и грунтом соответствует трению резины по сухому бетону — 0,8 (в LS-DYNA в комплексе ANSYS такой контакт называется Frictional), а также принят нулевой коэффициент затухания (Decay Constant). При этом ограничения расчетной схемы были заданы такими, чтобы движение происходило только в плоскости механизма вдоль вертикальной оси.

Шасси, как правило, рассчитывается из такого условия, при котором каждая основная стойка поглощала бы $0,5E_{кин}$, а передняя стойка — $0,2E_{кин}$ [3]. В расчетах принималось, что стойка связана с присоединенной массой аппарата, заданной исходя из величины кинетической энергии, которую требуется рассеять.

Метод решения. Решение задачи проводилось в пространственной (3D) постановке встроенными в ANSYS средствами программы LS-DYNA, являющейся стандартом де-факто для анализа высоконелинейных динамических процессов с использованием различных схем интегрирования по времени. Этот продукт разработан компанией LSTC и интегрирован в ANSYS Workbench благодаря партнерскому соглашению.

Для валидации расчетной модели был проведен расчет деформирования краш-боксов автомобилей Volkswagen Golf V1 и Mazda RX8, для которых известны условия и результаты экспериментов [7]. Результаты тестовых расчетов, выполненных с различными параметрами сетки, в сравнении с данными экспериментов показаны на рис. 2.

В расчетах для краш-бокса Volkswagen Golf V1 гексагональная сетка с максимальным размером элементов 4 мм (количество элементов — 6112, количество узлов — 11 760) дала максимальную погрешность вычисления кинетической энергии 13 %, а сетка с размером элемента 1,5 мм (количество элементов — 81 674, количество узлов — 112 482) — погрешность 3,7 %. Для краш-бокса Mazda RX8 тетраэдрическая сетка с максимальным размером элементов 4 мм (количество элементов — 9759, количество узлов — 21 725) дала максимальную погрешность вычисления кинетической энергии также около 13 %, а уменьшение размера элемента сетки в 2 раза — до 2 мм (количество элементов — 177 546, количество узлов — 46 289) позволило уменьшить погрешность до 4,8 %.

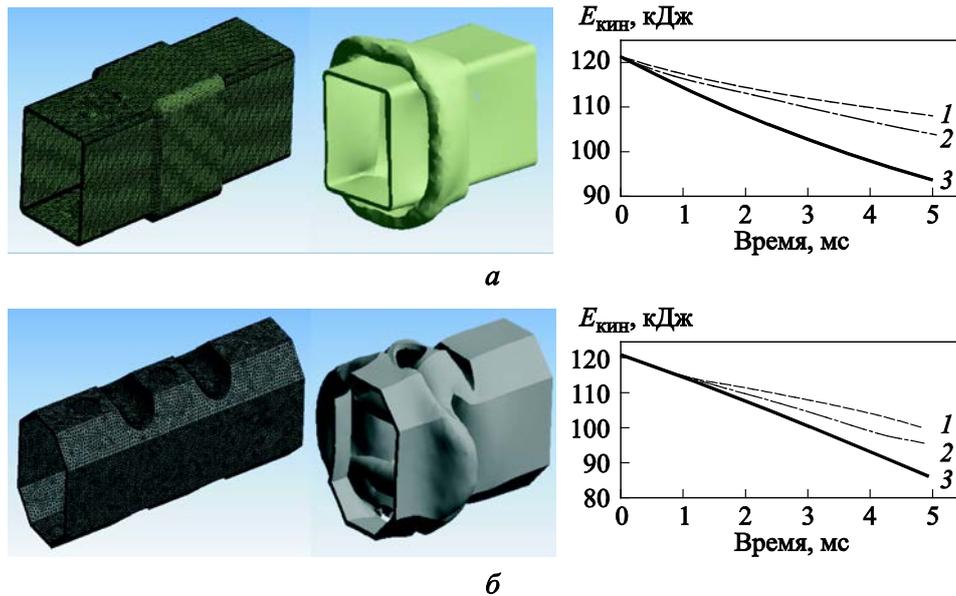


Рис. 2. Моделирование процесса деформации краш-бокса:
a — аналог краш-бокса Volkswagen Golf V1; *б* — аналог краш-бокса Mazda RX8;
 1 — эксперимент; 2 — расчет с сеткой размером 2 мм; 3 — расчет с сеткой размером 4 мм

Найденные по результатам валидации параметры расчетной модели, обеспечивающие сходимость расчетных данных с экспериментальными, были использованы для дальнейшего исследования.

Результаты моделирования. В качестве исходных данных были взяты следующие значения параметров: $m_{нос} = 5377$ кг, $H = 5$ м, $V_{min} = 60$ м/с, $g_0 = 9,81$ м/с², $C_y = 0,8$, $C_x = C_y/K$ ($K = 4,5$ — аэродинамическое качество ЛА). Из расчетов по формулам (1)–(3) получаются искомые величины: $V_y = 4,3$ м/с, $E_{кин} = 49\,997$ Дж. Таким образом, передняя стойка должна поглощать ~ 10 кДж энергии удара, а основная стойка — ~ 25 кДж энергии удара.

В качестве амортизатора для выбранных расчетных схем (см. рис. 1) рассматривалось по два варианта краш-боксов, близких по своей конструкции к используемым на автомобиле Volkswagen Golf V1 [7]. Краш-бокс, имеющий габариты $70 \times 54 \times 200$ мм, состоит из нескольких секций с различной толщиной стенки (рис. 3). Это позволяет обеспечить предсказуемость деформации конструкции, а также равномерное поглощение кинетической энергии как при штатном, так и при нештатном режиме нагружения. Для каждой схемы шасси исследовались двух- (рис. 3 *a, в*) и трехсекционные (рис. 3 *б, г*) краш-боксы. В расчетах использовались сетки из тетраэдрических элементов. Характеристики соответствующих расчетных случаев, обозначенные как L2, L3, V2, V3 (буква — вид схемы, цифра — число секций), приведены в таблице.

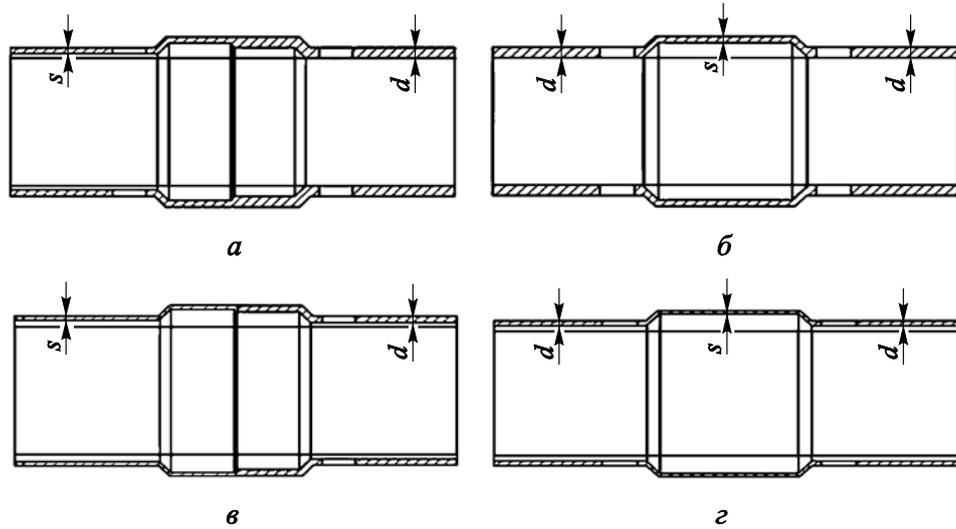


Рис. 3. Исследуемые краш-боксы:

a — L-схема, две секции (L2); *б* — L-схема, три секции (L3); *в* — V-схема, две секции (V2);
г — V-схема, три секции (V3)

Параметры расчетных случаев

Параметр	Расчетный случай			
	L2	L3	V2	V3
Масса краш-бокса, кг	1,48	1,56	0,85	0,8
Масса, присоединенная к стойке, кг	2700	2700	2700	2700
Толщина меньшей стенки <i>s</i> , мм	3,0	3,0	1,5	1,5
Толщина большей стенки <i>d</i> , мм	5,0	5,0	3,0	2,5
Размер элемента расчетной сетки, мм	12	12	15	15
Количество элементов расчетной сетки	29 918	23 454	60 185	42 067
Количество узлов расчетной сетки	10 259	8202	26 590	15 696

В качестве материала краш-бокса была использована конструкционная сталь (structural steel) из базовой библиотеки материалов пакета ANSYS. Характеристики данного материала представлены ниже, а также на рис. 4. Ближайшим из существующих аналогов данного материала является сталь 18Х2Н4ВА.

Характеристика стали 18Х2Н4ВА краш-бокса

Плотность ρ , кг/м ³	7950
Модуль упругости E , ГПа	200
Коэффициент Пуассона ν	0,3
Предел текучести σ_T , МПа	663
Предел прочности σ_B , МПа	1050
Относительное удлинение δ , %	12

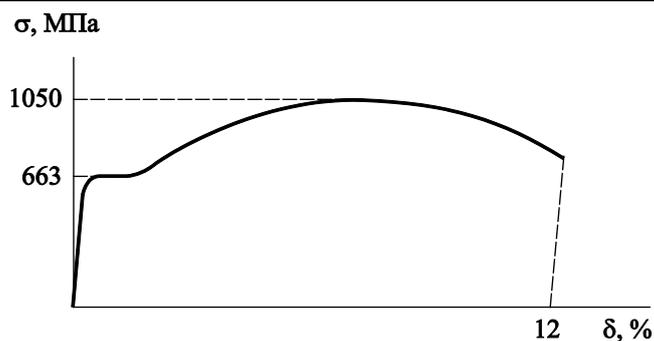


Рис. 4. Диаграмма деформирования материала краш-бокса

Для каждого расчетного случая был проведен расчет двух режимов гашения удара: штатного (обозначен как S) с вертикальной скоростью V_y и нештатного (обозначен как N) с удвоенной вертикальной скоростью $2V_y$.

В результате расчетов в LS-DYNA переходного режима длительностью 0,1 с были получены графики изменения от времени длины краш-бокса (рис. 5), силы сопротивления, действующей в краш-боксе (рис. 6), и кинетической энергии (рис. 7). Характер деформирования различных схем и конструкций шасси показан на рис. 8. Пример расшифровки обозначения результатов, приведенных в экспликации к рис. 5–8: L2S — расчет стойки, выполненной по L-схеме с двухсекционным краш-боксом в штатном режиме посадки.

По графикам, приведенным на рис. 5, видно, что при использовании V-схемы изменение длины прекращается быстрее, следовательно, время деформации краш-бокса меньше.

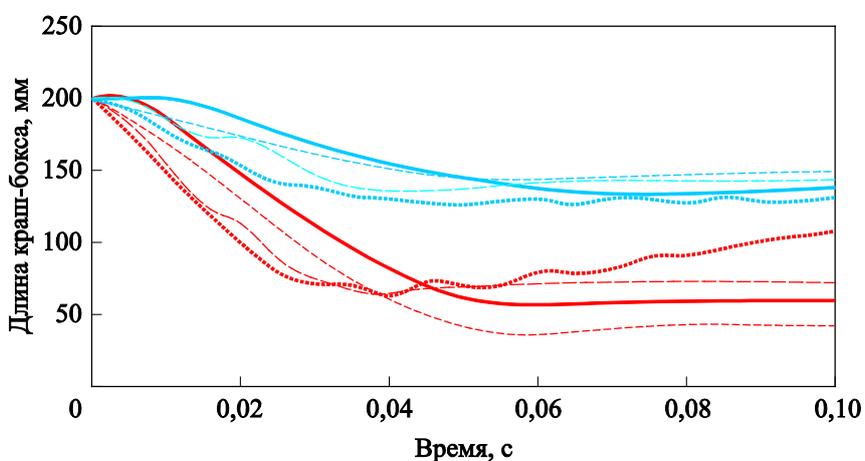


Рис. 5. Изменение длины краш-бокса:

— L3S; - - L2S; — V3S; V2S; — L3N; - - L2N; - · - V3N; ····· V2N

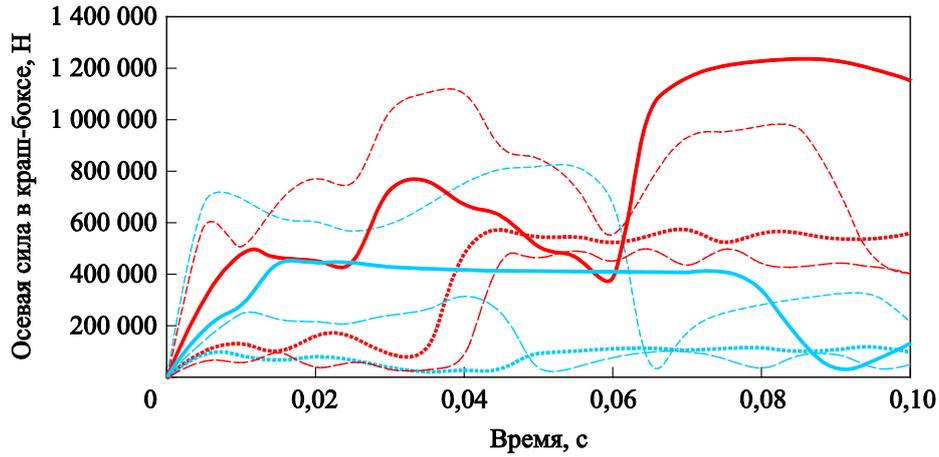


Рис. 6. Сила, действующая в краш-боксе:

— L3S; - - L2S; — V3S; ···· V2S; — L3N; - - L2N; — V3N; ···· — V2N

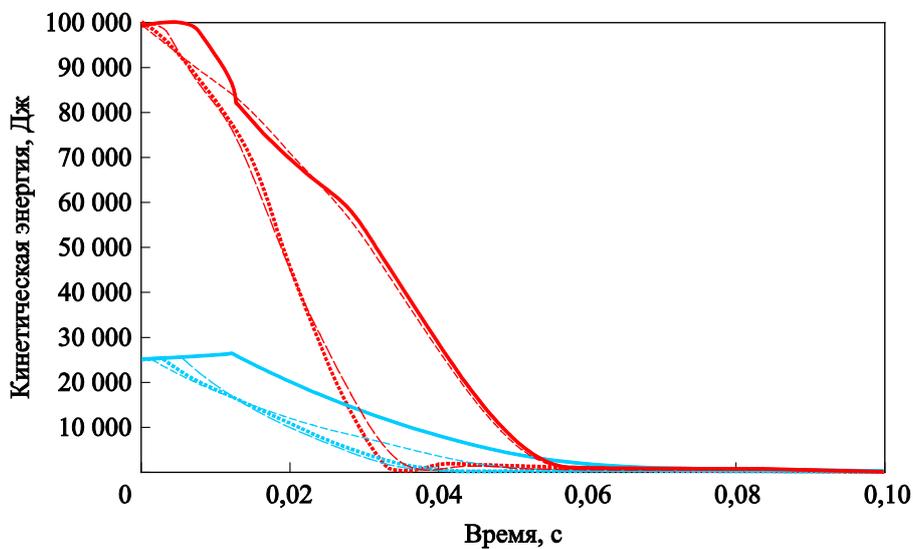


Рис. 7. Изменение кинетической энергии сосредоточенной массы:

— L3S; - - L2S; — V3S; ···· V2S; — L3N; - - L2N; — V3N; ···· — V2N

Анализ графиков на рис. 6 показал, что V-схема обеспечивает более плавное и предсказуемое изменение силы, возникающей в краш-боксе как при штатном, так и нештатном режиме посадки. Также силы, возникающие в краш-боксе при использовании V-схемы, по модулю в несколько раз меньше, чем силы, возникающие при использовании L-схемы.

Согласно графикам на рис. 7, V-схема обеспечивает более быстрое поглощение кинетической энергии удара, чем L-схема.

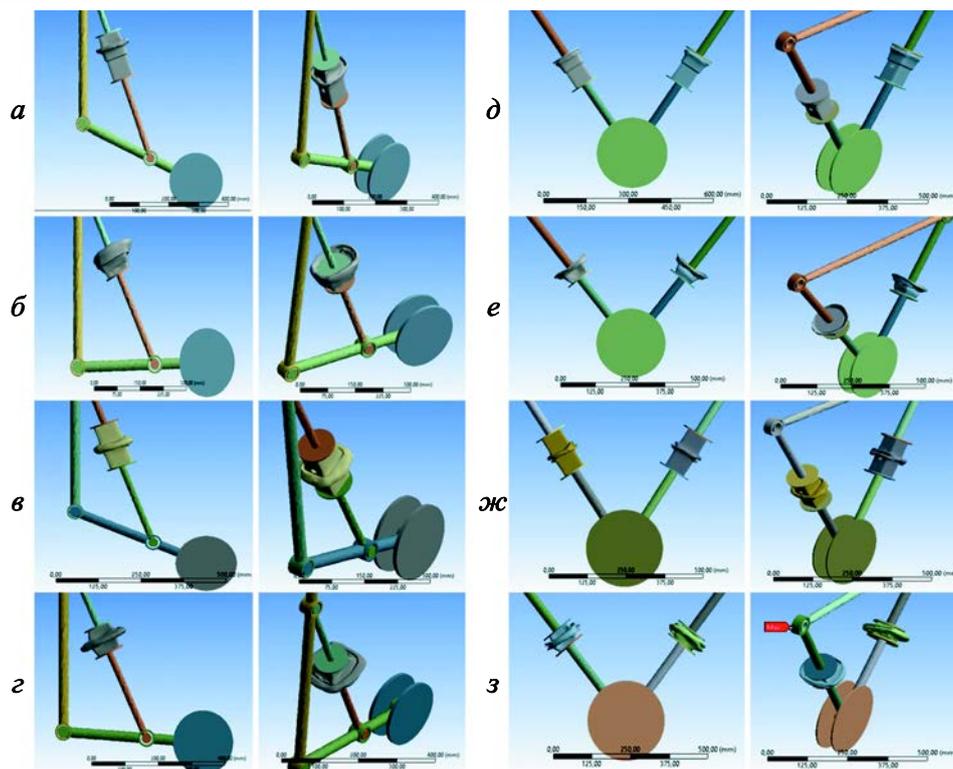


Рис. 8. Картины деформации краш-боксов L2S (а), L2N (б), L3S (в), L3N (г), V2S (д), V2N (е), V3S (ж), V3N (з)

Перегрузки, действующие на аппарат во время посадки, можно характеризовать как кратковременные. Работа стоек шасси оценивалась по графику вертикальной перегрузки, представленному на рис. 9, на котором видно, как при использовании L-схемы уровень перегрузок ниже на штатном и на нештатном режимах. Это связано с менее быстрым поглощением кинетической энергии удара и, как следствие, менее интенсивным ростом ускорений конструкции.

Анализируя полученные результаты, можно сделать следующий вывод: V-схема обеспечивает более эффективное поглощение кинетической энергии и более предсказуемое изменение силы, действующей в краш-боксе, а также в несколько раз меньшее значение этой силы, чем L-схема. Можно также заметить, что характер изменения всех полученных данных более предсказуем для трехсекционной конструкции, поэтому V-схема с трехсекционным краш-боксом является предпочтительной среди остальных представленных.

Следует, однако, отметить, что при использовании V-схемы перегрузки, действующие на летательный аппарат, оказываются большими. В качестве мероприятия, позволяющего уменьшить уровень кратковременных перегрузок, предлагается уменьшение толщины

и удлинение краш-боксов для увеличения хода данного элемента, что позволит уменьшить жесткость деформируемого элемента. Как видно на графике (см. рис. 9, L3S-модификация), уровень перегрузок в этом случае снижается.

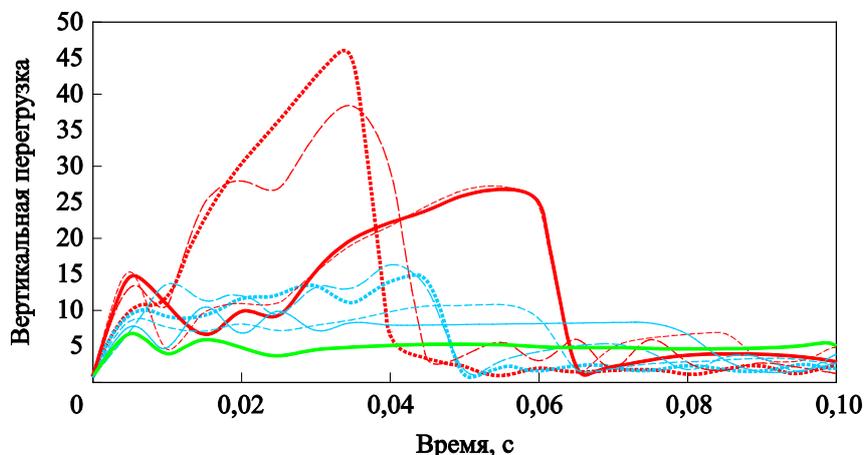


Рис. 9. Вертикальные перегрузки, действующие на летательный аппарат:

— L3S; --- L2S; -·-·- V3S; ····· V2S; — L3N; - - - L2N; - - - V3N; ····· V2N;
— L3S-модификация

Отметим еще один недостаток V-схемы: стойки такого типа сложно использовать в качестве передней опоры, поскольку возникают вопросы с компоновкой, а также с созданием поворотного привода. В данном контексте L-схема может быть предпочтительнее. Согласно авиационным правилам, передняя стойка должна поглощать $0,2E_{кин}$, что в 2,5 раза меньше значения, рассмотренного в данном расчете.

Масса двух краш-боксов для V-образной стойки составляет 1,6 кг. Краш-бнокс заменяет собой узел амортизатора в классических системах шасси. У самолета Ан-2, схожего по посадочной массе с МиГ-105, представленным в данной работе, масса амортизатора основной стойки составляет $(20 \pm 0,5)$ кг в зависимости от уровня заправки амортизатора гидрожидкостью (амортизаторы взвешивались с хранения, еще не проходившие капитальный ремонт и не бывшие в эксплуатации.) Таким образом, можно заметить выигрыш по массе данного узла в 12,5 раз, или на 18,4 кг.

Заключение. В ходе работы показана возможность использования новой схемы амортизации шасси воздушно-космического самолета, основанной на использовании трехсекционного краш-боксов одностороннего действия, который заменяется в процессе межполетного обслуживания. Данная разработка позволяет существенно сократить массу системы шасси орбитального самолета при сохранении необходимых

энергопоглощающих характеристик шасси. Выигрыш по массе, по сравнению с классическим амортизатором самолета, схожего по посадочной массе с представленным в работе, составляет 18,4 кг, или будет в 12,5 раз.

В ходе исследования энергопоглощающих характеристик различных схем стоек шасси и конструкций краш-боксов было установлено, что из предложенных конструкций в качестве основной стойки более подходящей оказывается V-схема, а в качестве носовой — L-схема.

Исследование также показало, что предложенная схема краш-бокса имеет резервы для модернизации, что позволяет провести дальнейшие работы, направленные на оптимизацию параметров краш-бокса для снижения пиковых перегрузок.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] X-37 Technology Demonstrator: Blazing the trail for the next generation of space transportation systems. *Facts. NASA*. 2010. 2 p.
URL: http://www.nasa.gov/centers/marshall/pdf/100431main_x37-historical.pdf
FS-2003-09-121-MSFC (дата обращения 17.05.2023).
- [2] Китай успешно испытал многоразовый космический аппарат. *РИА Новости* 06:55 08.05.2023 URL: <https://ria.ru/20230508/kosmos-1870410862.html>
(дата обращения 17.05.2023).
- [3] Житомирский Г.И. *Конструкция самолетов*. Москва, Инновационное машиностроение, 2018, 416 с.
- [4] Подружин Е.Г., Степанов В.М. *Конструкция и проектирование летательных аппаратов. Шасси*. 2-е изд. Новосибирск, Новосибирский государственный технический университет, 2020, 68 с.
- [5] Кондрашов Н.А. *Проектирование убирающихся шасси самолетов*. Москва, Машиностроение, 1991, 224 с.
- [6] Беляев А.В., Зеленцов Вл.В., Щеглов Г.А. *Средства выведения космических летательных аппаратов*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007, 56 с.
- [7] Хусаинов А.Ш., Никитин А.Н. Моделирование деформации краш-боксов современных автомобилей. *Вестник Ульяновского государственного технического университета*, 2012, № 4 (60), с. 28–32.
- [8] Зузов И.В., Зузов В.Н. Моделирование продольного смятия передних лонжеронов кузова легкового автомобиля с учетом наполнителей и инициаторов деформаций. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2012, № 2, с. 42–45.
- [9] Гончаров Р.Б., Зузов В.Н. Определение критериев выбора параметров материала-наполнителя в несущих тонкостенных конструкциях каркасного типа применительно к задачам пассивной безопасности автомобилей. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2019, вып. 4 (88), с. 2.
<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2019-4-1865>
- [10] Луковкин Р.О., Щеглов Г.А. Анализ динамики процесса вертикальной посадки космического аппарата на посадочном устройстве с краш-опорами. *Известия высших учебных заведений. Авиационная техника*, 2017, № 3, с. 59–66. <https://doi.org/10.3103/S1068799817030090>

- [11] Лукашевич В.П., Афанасьев И.Б. *Космические Крылья*. Москва, ООО Лен-Та Странствий, 2009, 496 с.
- [12] Остославский И.В., Стражева И.В. *Динамика полета. Траектории летательных аппаратов*. Москва, Машиностроение, 1969, 502 с.

Статья поступила в редакцию 20.05.2023

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Сумерин А.А., Щеглов Г.А. Моделирование работы стоек шасси летательного аппарата с пластически деформируемыми амортизаторами. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2023, вып. 6. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2023-6-2284>

Сумерин Артем Алексеевич — студент кафедры «Аэрокосмические системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: artyom.sumerin@mail.ru

Щеглов Георгий Александрович — д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Аэрокосмические системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Специалист в области динамики конструкций аэрокосмических систем. e-mail: shcheglov_ga@bmstu.ru

Simulation of the aircraft landing gear legs with the plastically deformable shock absorbers

© A.A. Sumerin, G.A. Shcheglov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

The paper considers possibility of using a new depreciation scheme in regard to the wheeled three-column landing gear leg of the aerospace light aircraft based on using the three-section one-time crash box, which could be replaced during the inter-flight maintenance. Normal and abnormal operation of the landing gear legs was numerically simulated in the LS-DYNA package of the ANSYS software. Energy absorbing characteristics of the crash boxes with various geometry and several landing gear leg schemes were analyzed in order to identify the design having most predictable and forecasted deformations, as well as the balanced energy absorbing characteristics. It is shown that using the crash boxes, similar in design to those used in the vehicle passive safety systems, could significantly reduce the landing gear system weight of an orbital aerospace vehicle, while maintaining the required energy absorbing characteristics of the landing gear. Gain in weight compared to the aircraft classic shock absorber being similar in landing weight to that presented in the work was of 18.4 kg, or by 12.5 times.

Keywords: aerospace vehicle, landing gear leg, plastic deformation, crash box, impact kinetic energy, LS-DYNA

REFERENCES

- [1] X-37 Technology Demonstrator: Blazing the trail for the next generation of space transportation systems. *Facts. NASA*. 2010. 2 p. Available at: http://www.nasa.gov/centers/marshall/pdf/100431main_x37-historical.pdfFS2003-09-121-MSFC (accessed May 17, 2023).
- [2] Kitay uspeshno ispytal mnogorazovyi kosmicheskii apparat [China successfully tested the reusable test spacecraft]. *RIA Novosti*. 06:55 08.05.2023. Available at: <https://english.news.cn/20230508/c36cce46d7574db08de8eaa081492c1e/c.html> (accessed May 17, 2023).
- [3] Zhitomirskiy G.I. *Konstruktsiya samoletov* [Aircraft design]. Moscow, Innovatsionnoe Mashinostroenie Publ., 2018, 416 p.
- [4] Poduzhin E.G., Stepanov V.M. *Konstruktsiya i proektirovanie letatelnykh apparatov. Shassi* [Construction and design of the aircraft. Landing Gear]. 2nd ed. Novosibirsk, Novosibirsk State Technical University Publ., 2020, 68 p.
- [5] Kondrashov N.A. *Proektirovanie ubirayushchikhsya shassi samoletov* [Design of the aircraft retractable landing gear]. Moscow, Mashinostroenie, 1991, 224 p.
- [6] Belyaev A.V., Zelentsov V.I., Shcheglov G.A. *Sredstva vyvedeniya kosmicheskikh letatelnykh apparatov* [Spacecraft launch vehicles]. Moscow, BMSTU Publ., 2007, 56 p.
- [7] Khusainov A.Sh., Nikitin A.N. Modelirovanie deformatsii krash-boksov sovremennykh avtomobiley [Simulating deformation of the modern vehicle crush-box testing deformation]. *Vestnik Ulyanovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta — Herald of the UISTU*, 2012, no. 4 (60), pp. 28–32.
- [8] Zuzov I.V., Zuzov V.N. Modelirovanie prodolnogo smyatiya perednikh lonzheronov kuzova legkovogo avtomobilya s uchetom napolniteley i initsiatorov deformatsii [Simulation of longitudinal collapse of the vehicle body front spars taking into account fillers and deformation initiators]. *Izvestiya vysshikh*

- uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie — BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2012, no. 2, pp. 42–45.
- [9] Goncharov R.B., Zuzov V.N. Opredelenie kriteriev vybora parametrov materiala-napolnitelya v nesuschikh konstruktsiyakh karkasnogo tipa primenitelno k zadacham passivnoy bezopasnosti avtomobiley [On criteria of selecting filler material parameters in supporting thin-walled frame-type structures in relation to the tasks of cars and tractors passive safety]. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2019, iss. 4 (88). <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2019-4-1865>
- [10] Lukovkin R.O., Shcheglov G.A. Analiz dinamiki protsessa vertikalnoy posadki kosmicheskogo apparata na posadochnom ustroystve s krash-oporami [Analysis of dynamics of the vertical landing process of a spacecraft using the landing gear with crash supports]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Aviatsionnaya tekhnika — Russian Aeronautics*, 2017, no. 3, pp. 59–66. <https://doi.org/10.3103/S1068799817030090>
- [11] Lukashevich V.P., Afanasyev I.B. *Kosmicheskie Krylya* [Space Wings]. Moscow, LenTa Stranstviy JSC Publ., 2009, 496 p.
- [12] Ostoslavskiy I.V., Strazheva I.V. *Dinamika poleta. Traektorii letatelnykh apparatov* [Flight dynamics. Trajectories of aerial vehicles]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1969, 502 p.

Sumerin A.A., Student, Department of Aerospace Systems, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: artyom.sumerin@mail.ru

Shcheglov G.A., Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Aerospace Systems, Bauman Moscow State Technical University. Research interests: dynamics of the aerospace systems design. e-mail: shcheglov_ga@bmstu.ru