

## **Численные модели прогнозирования контактных зон в результате ударного взаимодействия авиационных конструкций с преградой при аварийных ситуациях**

**Голдовский А.А.**

*ГосМКБ «Вымпел» им. И.И. Торопова,*

*Волоколамское шоссе, 90, Москва, 125424, Россия*

*\*e-mail: [gold4545@list.ru](mailto:gold4545@list.ru)*

**Статья поступила 07.07.2019**

### **Аннотация**

Проводятся результаты определения контактных зон при ударном взаимодействии авиационных конструкций с твёрдыми преградами. Дан анализ существующих математических моделей ударного взаимодействия. Предлагается численная модель прогнозирования результатов ударного взаимодействия, а также методика определения зон соударения. В качестве объекта исследования выступает динамическое контактное взаимодействие ударного элемента с упругопластической преградой.

**Ключевые слова:** ударное взаимодействие, упругопластическая преграда, численное моделирование.

### **Введение**

Определение контактных зон в результате ударного взаимодействия является актуальной задачей в случае отсутствия объективных данных о причинно-следственных связях, приведших к аварийной ситуации.

Результат взаимодействия можно разделить на несколько групп:

1. Удар без разрушения (вмятины, появившиеся вследствие пластического деформирования материала элементов конструкции).
2. Удар с частичным разрушением (надиры, царапины, появившиеся вследствие разрушения небольших зон материала в конструкции).
3. Удар с полным разрушением (полный отрыв и разрушение элементов конструкции).

Стоит отметить, что третья группа разрушений с трудом поддаётся определению контактных зон ударного взаимодействия по той причине, что в этих случаях часто разрушению подвергаются все объекты ударного воздействия. В данной статье рассматривается лишь первая и вторая группы, с целью разработки численной модели определения контактных зон по результату ударного взаимодействия, т.е в данном случае – пластической деформации элемента конструкции.

### **Постановка задачи**

Разработка методик определения зон контактного взаимодействия, в первую очередь, требует выбора метода математического моделирования ударного процесса. Рассмотрим следующие наиболее распространённые методы:

1. **Инженерный** – упрощённый метод, подразумевающий использование эмпирических данных, полученных в ходе натурных испытаний. Данный метод подразумевает, что сила сопротивления, с которой преграда действует на ударный элемент, может быть представлена в следующем виде.

$$F_{\Sigma} = F_1 + F_2 + F_3, \quad (1)$$

где  $F_1, F_2$  – статическая и динамическая силы сопротивления среды соответственно,  $F_3$  – сила трения между поверхностью ударного элемента и материала преграды,  $F_{\Sigma}$  – определяется по результатам натуральных экспериментов.

Для определения ударного воздействия здесь используются полуэмпирические зависимости, которые основаны на интегрировании уравнений движения. В рассматриваемом случае ударное воздействие характеризуется толщиной пробиваемой преграды, величиной пройденного в преграде пути, а также необходимым для этого временем.

Будем полагать, что в соответствии с законами механики толщину пробиваемой преграды и время можно получить по формулам:

$$dS = m \cdot V \cdot \frac{dV}{F} \quad (2)$$

$$dt = m \cdot \frac{dV}{F} \quad (3)$$

Затем в зависимости (2) и (3) подставляется взятая с обратным знаком величина силы сопротивления  $F_{\Sigma}$ , и определяются необходимые параметры  $S$  и  $t$  [1].

Следует отметить, что данный метод является полностью одномерным и характеризует только результат продольного ударного взаимодействия.

**2. Аналитический с исследованием упруго-пластического НДС оболочки пробивного элемента** – данный метод позволяет описывать более сложные формы ударного взаимодействия, при этом формируется более широкое представление о

напряженно-деформированном состоянии соударяющихся объектов (в данном случае преграда в виде параллелепипеда и ударника в виде оболочки вращения).

Так как рассматриваемые случаи сводятся к изучению упругопластического деформирования элементов контактного взаимодействия, запишем соответствующие зависимости между напряжениями и деформациями:

$$\begin{cases} \sigma_r - \sigma_0 = \frac{2\sigma_i}{3\varepsilon_i} (\varepsilon_r - \varepsilon_0), \\ \sigma_\theta - \sigma_0 = \frac{2\sigma_i}{3\varepsilon_i} (\varepsilon_\theta - \varepsilon_0), \\ \sigma_\varphi - \sigma_0 = \frac{2\sigma_i}{3\varepsilon_i} (\varepsilon_\varphi - \varepsilon_0), \end{cases} \quad (4)$$

где  $\sigma_i$ ,  $\varepsilon_i$  – величины интенсивности напряжений и деформаций,  $\sigma_0$ ,  $\varepsilon_0$  – средние напряжение и линейная деформация соответственно.

Так как материал оболочки несжимаем, то в инженерных расчетах можно полагать

$$\varepsilon_0 = 0.$$

Учитывая, что в оболочке вращения на основании классической теории Кирхгофа-Лява [2] радиальное относительное удлинение равно нулю, имеем

$$\varepsilon_r = 0.$$

Тогда из вышеуказанных условий находим:

$$\varepsilon_\theta = -\varepsilon_\varphi.$$

Остальные величины, входящие в уравнения (4), определяются из следующих соотношений теории пластичности:

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_\varphi)^2 + (\sigma_\varphi - \sigma_r)^2};$$

$$\varepsilon_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(\varepsilon_\varphi - \varepsilon_\theta)^2 + (\varepsilon_\theta - \varepsilon_r)^2 + (\varepsilon_r - \varepsilon_\varphi)^2};$$

$$\sigma_0 = \frac{\sigma_r + \sigma_\theta + \sigma_\varphi}{3}.$$

Решение сформулированной в п.2 задачи наиболее полно описано и дано в [3].

### Численное моделирование ударного взаимодействия

Для разработки методик определения контактных зон по результату ударного взаимодействия рассмотрим задачу удара оболочки вращения (ударного элемента) с упругопластической преградой для случая, указанного на рис. 1.

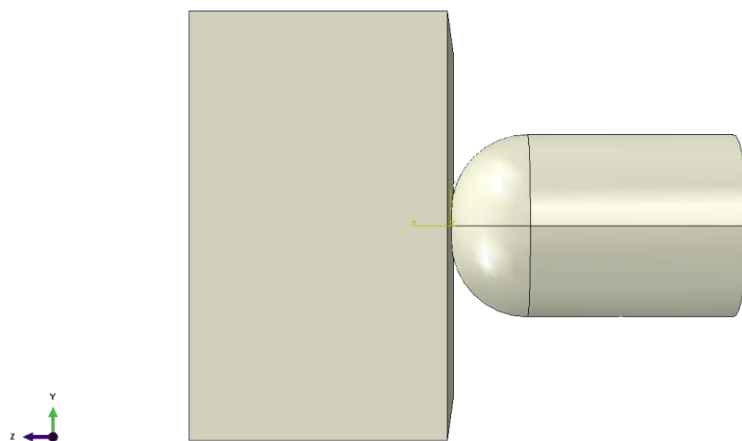


Рис. 1 Геометрические модели ударного элемента и упругопластической преграды.

Модель упругих свойств материала вышеуказанных геометрических тел представлена в виде линейной функции, пластические свойства материала

представлены зависимостями на рис. 2.

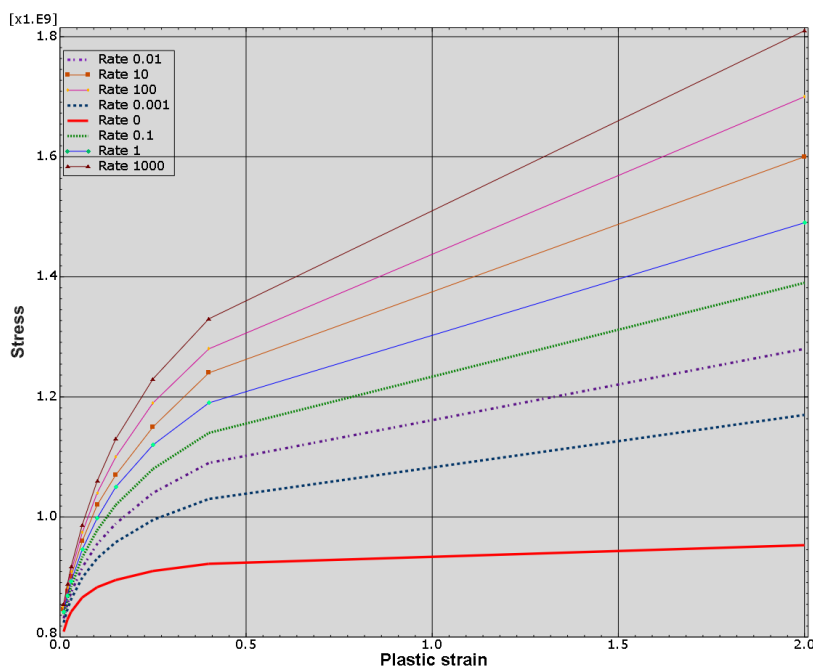


Рис. 2 Область пластического деформирования диаграммы растяжения-сжатия

Предполагается, что между элементами ударного взаимодействия задана упругопластическая кинематическая связь, препятствующая проникновению узлов «подчиненной» поверхности (ударный элемент) в «основную» более жесткую поверхность (упругопластическая преграда).

Начальные условия математической модели: ударный элемент расчетной модели имеет начальную скорость  $v_0=350$  м/с вдоль глобальной оси Z.

Граничные условия математической модели (рис. 3): жёсткая заделка по нижней и боковым граням упругопластической преграды.

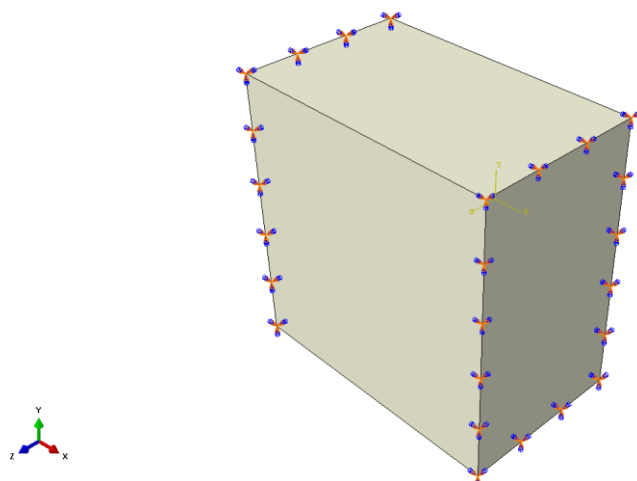


Рис. 3 Определение граничных условий в модели

Для определения решения конечноэлементной математической модели используется решатель с явной схемой интегрирования. Длительность ударного процесса составляет не более 0.003 сек.

Результаты математического моделирования напряженно-деформированного состояния в результате ударного взаимодействия представлены на рис. 4, 5, 6 и 7 (для наглядности масштаб деформации увеличен в 5 раз):

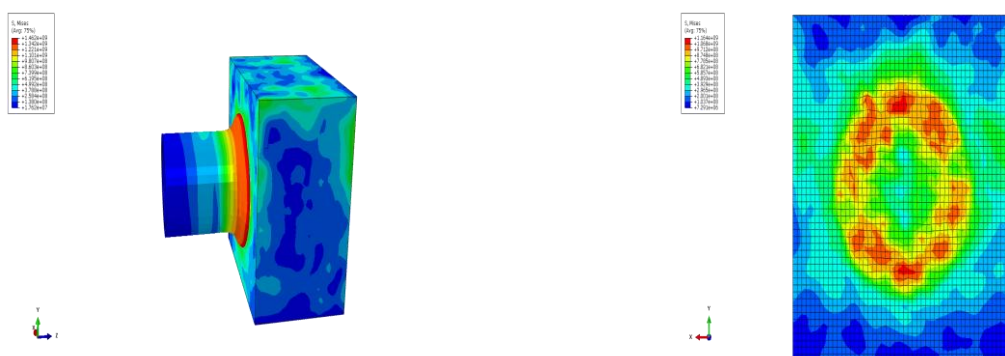


Рис. 4 Поле напряжений

- а) общий вид напряжённого состояния      б) напряженное состояние в области пластической деформации

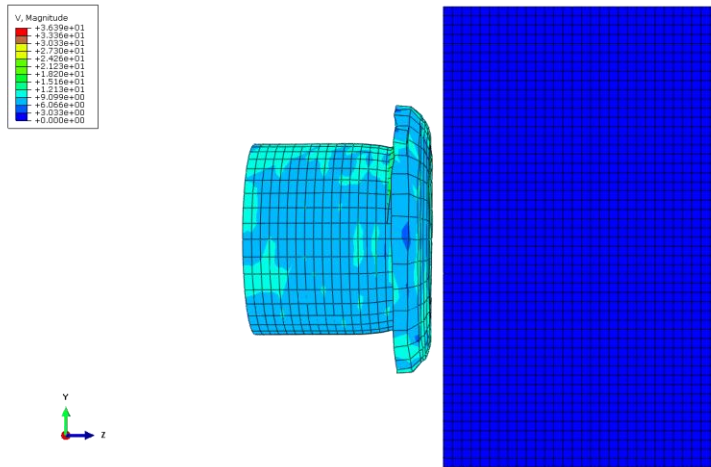


Рис. 5 Поле скоростей

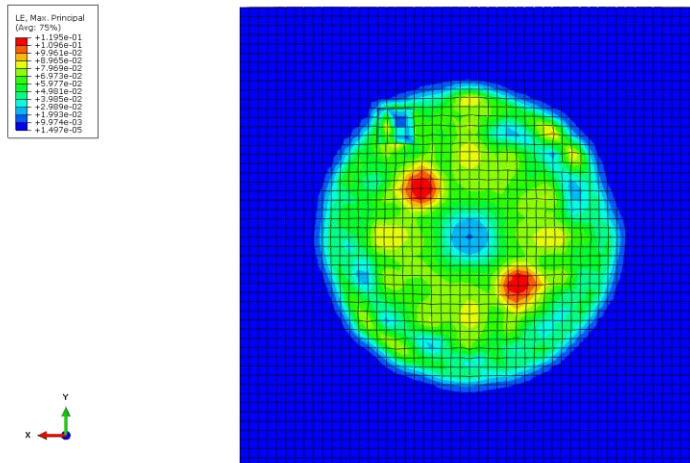


Рис. 6 Поле деформаций



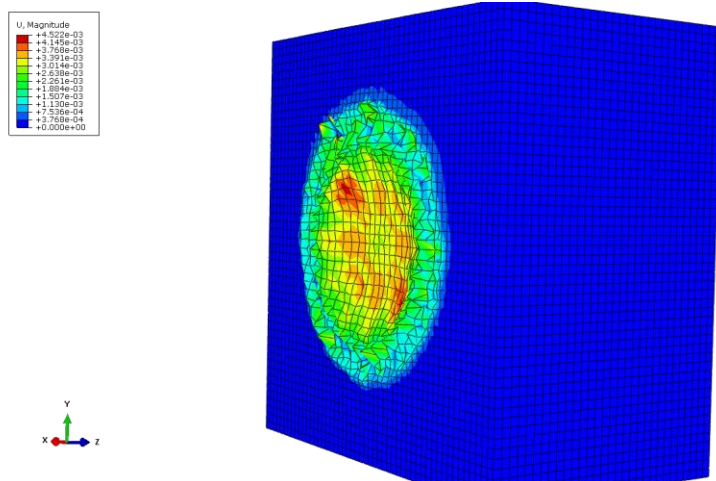


Рис. 7 Поле перемещений

Далее рассмотрим второй случай, указанный на рис. 8.

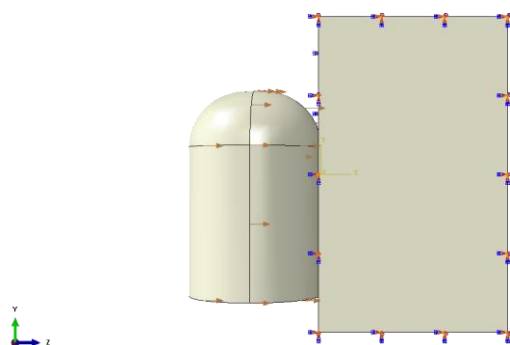


Рис. 8 Геометрические модели ударного элемента и упругопластической преграды.

Начальные и граничные условия, а также метод решения остаются без изменений. Результат математического моделирования в виде полей напряженно-деформированного состояния и скоростей представлен на рисунках 9, 10, 11 и 12 (для наглядности масштаб деформации увеличена в 5 раз).

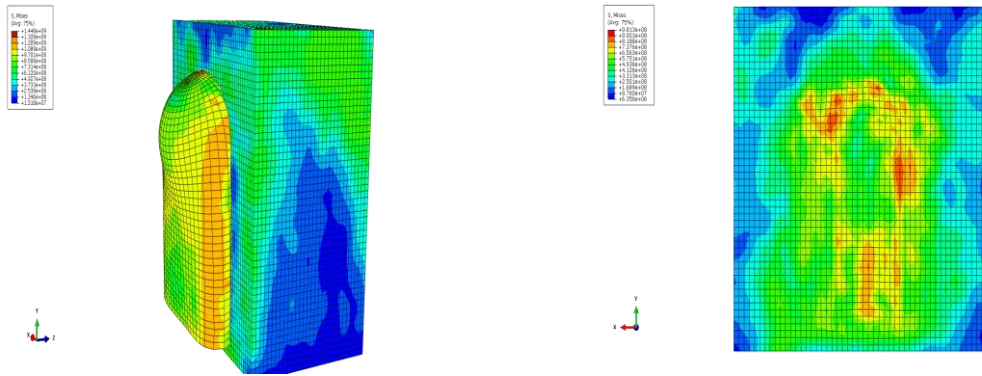


Рис. 9 Поле напряжений

а) Общий вид напряжённого состояния

б) напряженное состояние в области пластической деформации

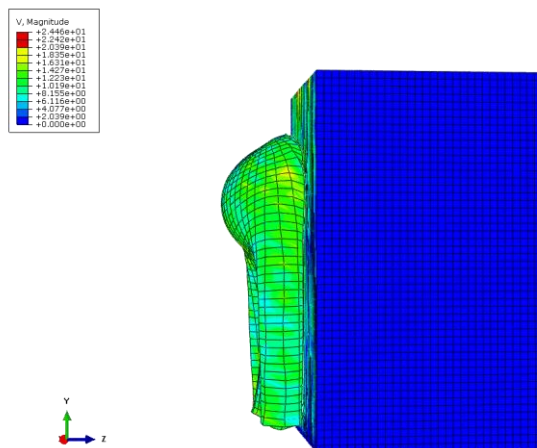


Рис. 10 Поле скоростей

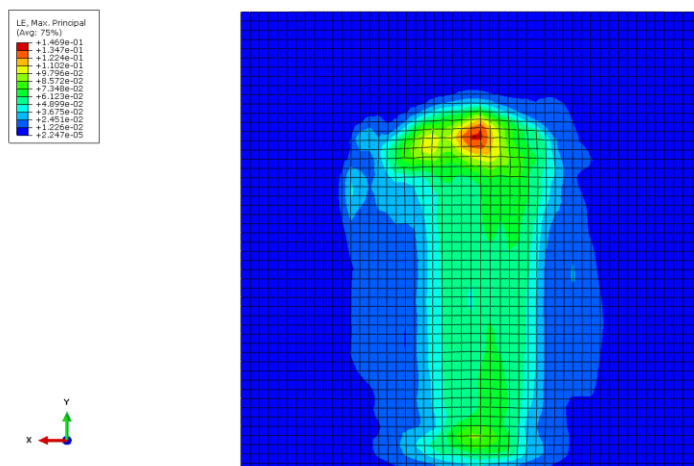


Рис. 11 Поле деформаций

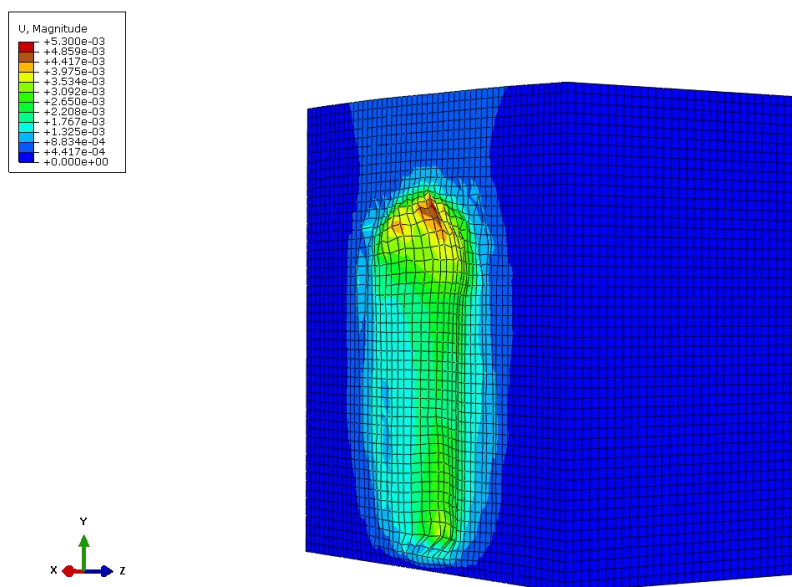


Рис. 12 Поле перемещений

Практический интерес результатов вышеизложенного математического моделирования для формирования методик определения контактных зон по результату ударного взаимодействия представляют поля перемещений и

деформаций на упругопластической преграде. Анализируя их, можно получить представление о площади пораженного участка и соответствующей силе, а в дальнейшем и скорости ударного элемента.

В реальных условиях поля напряжений и скоростей получить, как правило, не представляется возможным. Поэтому в дальнейшем будем оперировать полями перемещений и деформаций.

Имея свойства повреждённого материала (рис. 3), соотношения теории пластичности и трёхмерной теории упругости (в случае отсутствия информации о пластическом поведении материала), можно получить примерную картину НДС в зонах повреждения упругопластической преграды.

Зная приближенное к реальному состояние НДС объекта, а также площадь пораженной зоны преграды, можно получить значение силы, действующей на ударный элемент (в случае необходимости дополнительные кинематические параметры).

Для оценки контактной зоны ударного элемента разработан алгоритм, сопоставляющий площадь поражённого участка на упругопластической преграде и площади проекций ударного элемента. Пошагово поворачивая ударный элемент, определяется проекция объекта на упругопластической преграде. Наиболее близкие результаты по площади выдаются в порядке убывания. Данный алгоритм позволяет также определить положение ударного элемента относительно упругопластической преграды.

Выполнив все вышеуказанные этапы, проводится математическое

моделирование для восстановления картины ударного взаимодействия. В случае отрицательного результата и несовпадения поля деформированного состояния проводится подбор силы, действующей на ударный элемент, а в случае отрицательного результата при подборе силы, действующей на ударный элемент, согласно алгоритму, изменяется положение ударного элемента.

В итоге методика по определению контактных зон по результату ударного взаимодействия сводится к следующему алгоритму:

1. Определение (замер) результата ударного взаимодействия, в виде величин деформации, перемещений материала, а также площади поражённого участка.
2. Оценка силы ударного взаимодействия по известному НДС и свойствам материала.
3. Определение положения ударного элемента относительно упругопластической преграды.
4. Моделирование ударного процесса на основании полученных начальных условий
5. В случае удовлетворительного совпадения деформированного состояния модели с реальным объектом можно судить об адекватности определённых зон контакта по результату ударного взаимодействия.
6. В случае неудовлетворительного совпадения деформированного состояния с реальным объектом необходимо скорректировать значение силы, а при необходимости переопределить положение ударного элемента относительно

упругопластической преграды, повторив пункты (4,5,6).

Стоит отметить, что данная методика имеет достаточную точность только лишь для более простых конструкций. Для определения контактных зон более сложных конструкций, например имеющих выступающие профили, для случая сложного последовательно-окружного движения, а также на случай возможного разрушения элементов ударника методика должна быть доработана.

### **Заключение**

Разработана численная модель определения контактных зон по результату ударного взаимодействия авиационных конструкций с упруго-пластическими преградами. Приведен метод моделирования ударного процесса для получения качественной оценки результатов ударного взаимодействия.

Построены конечноэлементные математические модели ударного процесса. Получены численные результаты НДС ударного взаимодействия.

Предложена методика определения контактных зон на ударных элементах по результату ударного взаимодействия.

Указаны недостатки, а также варианты для развития и совершенствования вышеуказанной методики.

*Выражаю благодарность моему научному руководителю Фирсанову Валерию Васильевичу, профессору, доктору технических наук, заведующему кафедрой «Машиноведение и детали машин» Московского авиационного института.*

### Библиографический список

1. Нестеров В.А., Обносков Б.В., Трусов В.Н. и др. Системы снаряжения летательных аппаратов. – М.: Издательско-торговая корпорация «Дашков и К°», 2017. – 552 с.
2. Власов В.З. Общая теория оболочек. – М.: Гостехиздат, 1949. – 784 с.
3. Тишков В.В., Фирсанов В.В. Многоуровневый подход при построении расчётных моделей динамического состояния объектов авиационной техники при среднескоростном ударе о твёрдую преграду // Научный вестник МГТУ ГА. 2010. № 161. С. 74 - 84.
4. Тишков В.В., Фирсанов В.В. Комбинированная аналитическая модель динамического состояния объекта авиационной техники при ударе о твёрдую преграду // Научный вестник МГТУ ГА. 2007. № 123. С. 58 - 67.
5. Тишков В.В., Фирсанов В.В. Расчётный метод для прогнозирования безопасности авиационных объектов при внештатных ситуациях // Труды МАИ. 2007. № 26. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=34028>
6. Сидоренко А.С. Динамическое деформирование конструкции авиационного изделия при ударе о преграду // Научный вестник МГТУ ГА. 2007. № 123. С. 48 - 57.
7. Вербицкий А.Б., Сидоренко А.С. Динамическое состояние конструкции авиационного носителя при аварии на этапах взлета и посадки // Труды МАИ. 2013. № 67. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=41442>

8. Вербицкий А.Б. Сидоренко А.С. Динамическое деформирование конструкции авиационного изделия при аварийном соударении с преградой // Труды МАИ. 2014. № 78. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=53502>
9. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. - М.: Мир, 1975. - 543 с.
10. Зенкевич О., Морган К. Конечные элементы и аппроксимация. - М.: Мир, 1986. - 318 с.
11. Формалев В.Ф., Ревещников Д.Л. Численные методы. - М.: Физматлит, 2004. - 400 с.
12. Чигарев А.В., Кравчук А.С., Смалюк А.Ф. ANSYS для инженеров. - М.: Машиностроение-1, 2004. - 512 с.
13. Лукьянова А.Н. Моделирование контактного взаимодействия деталей. - Самара: Самарский государственный технический университет, 2012. - 86 с.
14. Филоненко-Бородич М.М. Теория упругости. - М: Государственное издательство физико-математической литературы, 1959. - 364 с.
15. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести: учебник для студентов вузов. – М.: Машиностроение, 1968. - 400 с.
16. Качанов Л.М. Основы механики разрушения. - М.: Наука, 1974. - 311 с.
17. Работнов Ю.Н. Ползучесть элементов конструкций. - М.: Наука, 1966. - 752 с.
18. Flores P., Ambrosio J., Claro J.C.P., Lankarani H.M. Influence of the contact-impact force model on the dynamic response of multi-body systems. Proceedings of the Mechanical Engineers Part K // Journal of Multi-body Dynamics, 2006, vol. 220, pp. 21 – 34.



19. Bathe K.J., Wilson E.L. Large Eigenvalue Problems in Dynamic Analysis // Journal of the Engineering Mechanics Division, 1972, no. 98, pp. 1471 – 1485.
20. Abrahamson G.R., Lindberg H.E. Peak load-impulse characterization of critical pulse loads in structural dynamics // Nuclear Engineering and Design, 1976, vol. 37, issue 1, pp. 35 - 46.
21. Xing YuFeng, Zhu DeChao. Analytical solutions of impact problems of rod structures with springs // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1998, vol. 160, issue 3–4, pp. 315 – 323.