

## **Разработка обобщенной методики расчёта систем мягкой посадки с пневмоамортизаторами**

**Аверьянов И.О.\*, Сулейманов Т.С.\*\*, Тараканов П.В.\*\*\***

*Центр проектирования «Технодинамика»,  
ул. Ибрагимова, 29, Москва, 105318, Россия*

*\*e-mail: [i.averyanov@mail.ru](mailto:i.averyanov@mail.ru)*

*\*\*e-mail: , [timurijwbb@mail.ru](mailto:timurijwbb@mail.ru)*

*\*\*\*e-mail: [pashabeetle@yandex.ru](mailto:pashabeetle@yandex.ru)*

### **Аннотация**

Рассмотрена возможность применения связанной конечно-элементной и конечно-объёмной постановки для решения динамической задачи о приземлении объекта с пневмоамортизаторами. Проведена верификация предлагаемого решения общеизвестными методами, теории упругости и газодинамики. Для подтверждения работоспособности разрабатываемого подхода приведено решение плоской задачи о вертикальном сбросе объекта, закреплённого на упругой платформе, на податливое основание с использованием двух амортизаторов.

**Ключевые слова:** система мягкой посадки, система мягкого приземления, десантируемая техника, пневмоамортизатор.

### **1. Введение**

В настоящее время актуальной является задача оперативной доставки грузов в разные географические районы мира: песчаные, равнинные и горные местности

южных широт, зоны средней полосы, характеризующиеся бесконечными лесными массивами и болотистыми местностями, а также арктические снежные просторы. Эту задачу выполняет авиация - десантируя грузы с помощью специально предназначенных для этого парашютно-реактивных систем и парашютных платформ, хорошо зарекомендовавших себя за долгую историю их эксплуатации [1].

В настоящей статье рассматриваются вопросы проектирования парашютных платформ, в надёжной работе которых - безопасном приземлении - важную роль играют пневмоамортизаторы (ПА), гасящие ударные нагрузки и обеспечивающие устойчивость объектов транспортирования. Они представляют собой газонаполненные оболочки различной формы. Принцип их работы заключается в поглощении кинетической энергии снижающегося на парашюте объекта через сжатие имеющегося в них газа и последующего его спуска с помощью дросселирующего клапана. Опыт использования подобных ПА показал как их положительные стороны – простоту в эксплуатации, многократность применения, относительно небольшие габариты и массу в походном положении [2], так и отрицательные – это, прежде всего, проблема устойчивости приземляющегося объекта, приводящая к его отскакиванию и опрокидыванию. Данная проблема может быть обусловлена особенностями самой местности приземления – наклон площадки приземления, податливость грунта (приземление на воду, в снег), имеющиеся препятствия (деревья и пр.), - а также воздействием внешних факторов – таких как ветер, задающих горизонтальную составляющую движения приземляющегося объекта.

В настоящее время существует множество работ, посвящённых моделированию работы ПА: в МАИ данной тематикой занимались А.С. Павлов, В.А. Тимохин, Пономарёв П.А., Скиданов С.Н. и другие специалисты [2, 3]; за долгую историю создания парашютно-десантной техники большой опыт накоплен на МКПК "Универсал" [1]; за рубежом из последних работ следует отметить [4].

Анализируя накопленный опыт, можно заключить, что на данный момент существует множество расчётных методик и методов, используемых при проектировании ПА: математическая модель процесса торможения, на основе связанного решения кинематических уравнений движения объекта и уравнений газодинамики, разработана П.А. Пономарёвым [2]; анализ зарубежных источников [4] и др. показал популярность использования модуля Airbag программного комплекса LS-Dyna для решения похожих задач.

Авторы данной работы предприняли попытку разработать обобщённую методику расчёта пневмоамортизаторов. Подход к решению данной задачи должен позволять учитывать: возможную газопроницаемость камер ПА, податливость поверхности приземления и упругость несущей платформы приземляющегося объекта, влияние работы камер ПА друг на друга, работу материала ПА в том числе в зоне упруго-пластических деформаций.

## **2. Описание математической модели**

Парашютная система с ПА является сложной динамической системой, обладающей вариативными граничными условиями и высокой степенью

нелинейности - как геометрической (большие деформации оболочек ПА), так и физической (податливость грунта, упругость узлов и агрегатов парашютной системы, упруго-пластическое поведение материала оболочки). Для математического моделирования процесса приземления рассматривается система, состоящая из груза, закреплённого на упругой платформе, системы ПА, представленных в виде цилиндрических оболочек, и податливого основания. Решение задачи предлагается искать в связанном виде: метод конечных элементов - для моделирования упругой платформы, основания и оболочек (ПА), и метод конечных объёмов - для моделирования газодинамических процессов [5]. Для решение задачи используется явная постановка.

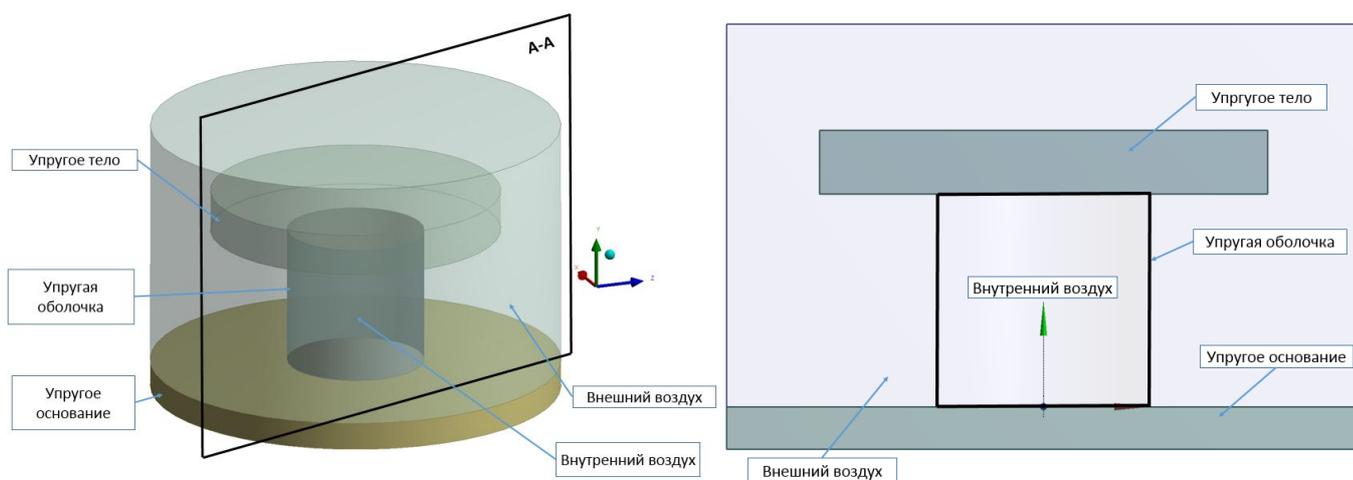


Рис.1. Математическая модель ПА

Далее рассматривается и приводится описание разрабатываемой математической модели типового ПА – упрощённой модели (рис.1), обычно парашютные системы оснащены четырьмя и более подобными амортизаторами. В соответствии с приведённым выше рисунком, парашютная платформа и основание представлены в

виде цилиндрических тел, обладающих упругостью. ПА представляет собой тонкостенный конус, состоящих из упругих элементов. Тканевый материал ПА моделируется в виде мембраны. Сложности решения подобных задач сводятся к отысканию корректной схемы задания граничных условий. Ниже приводится верификация предлагаемого подхода методами теории упругости и газодинамики.

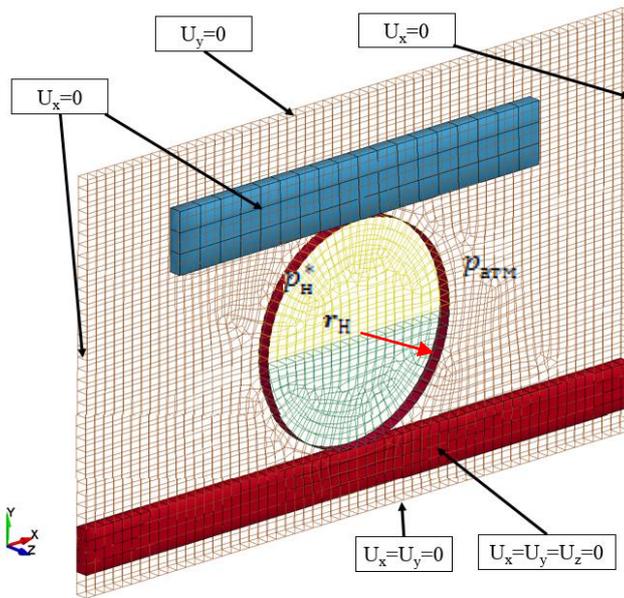
### **3. Теоретическая верификация используемого метода**

Теоретическая верификация математического моделирования поведения демпфирующих подушек состоит из нескольких задач:

- Задача статического воздействия на демпфирующую подушку;
- Задача динамического воздействия на демпфирующую подушку;
- Задача истечения воздуха из демпфирующей подушки через отверстие.

#### **3.1. Задача статического воздействия на демпфирующую подушку**

Для упрощения теоретических выкладок верификация разрабатываемого решения проводилась с использованием упрощённой плоской модели ПА с круглым сечением единичной толщины (рис.2). Т.к. математическая модель состоит из объёмных элементов, то используемые в плоской постановке задачи подходы верны для общего (объёмного) случая её применения. Ниже представлена модель и граничные условия.



$$r_H = 0,5\text{м}$$

$$\delta = 0,001\text{м}$$

$$m = 185\text{кг}$$

$$p_{\text{атм}} = 101300\text{Па}$$

Рис.2. Упрощённая математическая модель ПА

К демпфирующей подушке сферической формы, заполненной воздухом и расположенной на горизонтальной гладкой поверхности, приложили вертикальную статическую нагрузку. Нагрузка действует вдоль вертикальной оси симметрии подушки, учитываются только вертикальные перемещения. Давление воздуха внутри подушки выше чем внешнее атмосферное давление, в начальный момент времени напряжения в цилиндрической оболочке отсутствуют. При аналитическом решении задачи сначала рассматривается изменение внутреннего давления в связи с растяжением оболочки, а затем изменение внутреннего давления под воздействием вертикальной статической нагрузки.

В качестве материала оболочки демпфирующей подушки используется армированная ткань. Ввиду малой изгибной жесткости ткани, рассматриваются

только упругие деформации оболочки ПА. В плоской постановке задачи выражение для деформации оболочки будет иметь вид (1):

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{N}{AE} = \frac{\Delta p_n r_n}{E \delta} \quad (1)$$

Где:

$\Delta p_n = (p_n^* - p_{\text{атм}})$  – разность внутреннего начального и внешнего давления подушки в начальный момент времени;

$p_n^*$  – внутреннее давление в начальный момент времени;

$p_{\text{атм}}$  – внешнее атмосферное давление;

$r_n = 0,5 \text{ м}$  – радиус кривизны оболочки в начальный момент времени;

$E = 200 \text{ ГПа}$  – модуль упругости оболочки;

$\delta = 0,001 \text{ м}$  – толщина стенки оболочки.

Объем после растяжения оболочки, в плоской постановке (объем приравнен к площади):

$$V = \pi[r_n(\varepsilon + 1)]^2 \quad (2)$$

Воздух внутри оболочки описывается уравнением состояния идеального многоатомного газа [6].

$$p_0^* = \frac{m_{\text{возд}} RT}{M V} \quad (3)$$

Где:

$m_{\text{возд.}} = 0,075 \text{ кг}$  – масса воздуха;

$M = 0,029 \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$  – молярная масса воздуха;

$R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$  – газовая постоянная;

$T = 293 \text{ К}$  – абсолютная температура воздуха;

$p_0^*$  – внутреннее давление воздуха после растяжения оболочки.

Изменение давления воздуха внутри подушки происходит без теплообмена, поэтому процесс можно считать адиабатическим (4).

$$p^* V^\gamma = \text{const} \quad (4)$$

$p^*$  – давление воздуха;

$\gamma = 1,4$  – постоянная адиабаты.

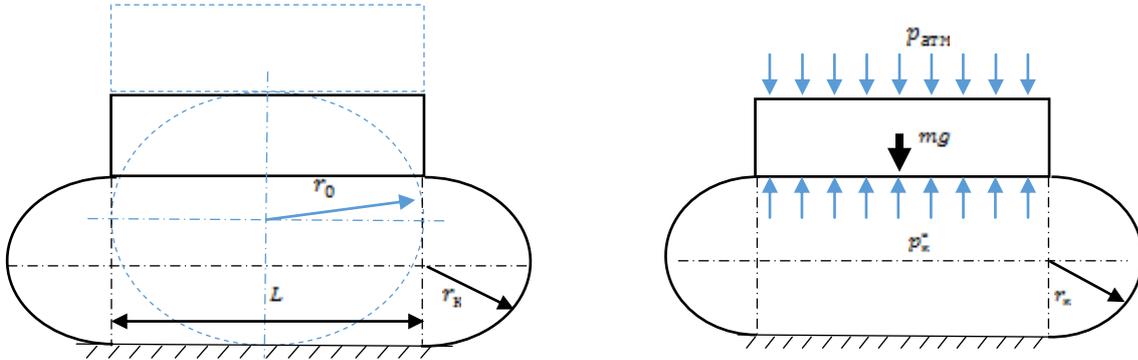
После растяжении оболочки под действием внутреннего давления рассматривается влияние вертикальной статической нагрузки. В состоянии равновесия оболочка изменяет свою геометрию, которая, при отображении на плоскости, рассматривается как прямоугольник с двумя симметричными относительно вертикальной оси полукругами (рис. 3). После растяжения оболочка сохранят свои размеры. Таким образом:

$$2L + 2\pi r_{\text{к}} = 2\pi r_0 \quad (5)$$

$r_0$  – радиус окружности оболочки после растяжения;

$r_k$  – радиус кривизны окружности в состоянии равновесия;

$L$  – длина площадки контакта.



а) формоизменение цилиндрической  
оболочки под действием груза и  
внутреннего давления

б) равновесие системы

Рис.3. К задаче о статическом равновесии цилиндрической оболочки

На основании (4) произведение давления и объема воздуха внутри подушки после растяжения стенок и в состоянии равновесия равны.

$$p_k^*(2r_k L + \pi r_k^2)^y = p_0^*(\pi r_0^2)^y \quad (6)$$

В состоянии равновесия нагрузка со стороны груза уравнивается давлением со стороны подушки на площадке контакта (рис. 3 б).

$p_k^*$  – внутреннее давление оболочки в состоянии равновесия;

Разрешив полученное уравнение относительно  $r_k$ , проводится численная оценка внутреннего давления оболочки в состоянии равновесия. При воздействии внешней вертикальной статической нагрузки  $mg = 1815 \text{ Н}$  и внутреннего давления  $p^*_H = 136841 \text{ Па}$  получили, что значение внутреннего давления в подушке под воздействием статической нагрузки увеличилось на  $(p - p_0) = 26400 \text{ Па}$  до  $163241 \text{ Па}$ , перемещение груза  $(h_0 - h) = 0,344 \text{ м}$ .

Ниже на графиках приведены результаты расчётов рассматриваемой математической модели. Математическое моделирование движения груза, лежащего на цилиндрической оболочке показывает, что после установления движения величина опускания груза равна  $0,376 \text{ м}$  (см. линию тренда на рис.4), а величина внутреннего давления в цилиндрической оболочке равна  $158000 \text{ Па}$  (рис.5).

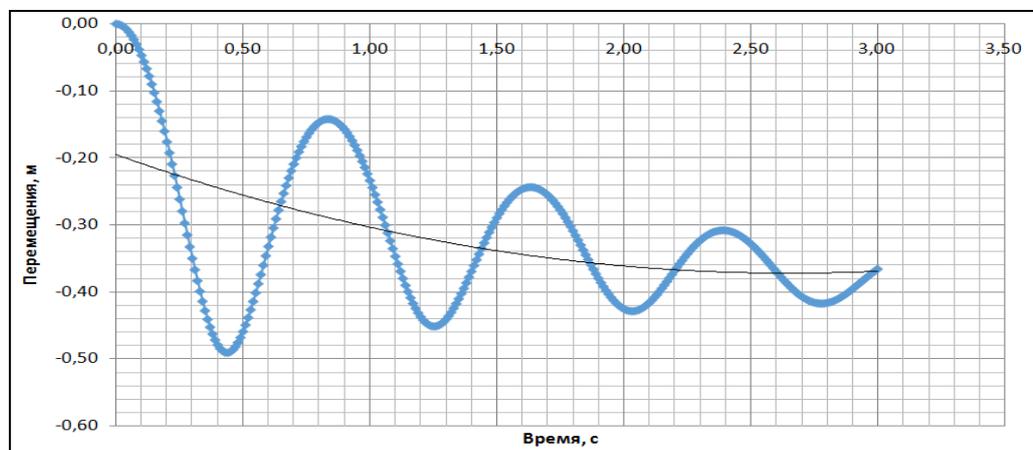


Рис. 4. Перемещение груза

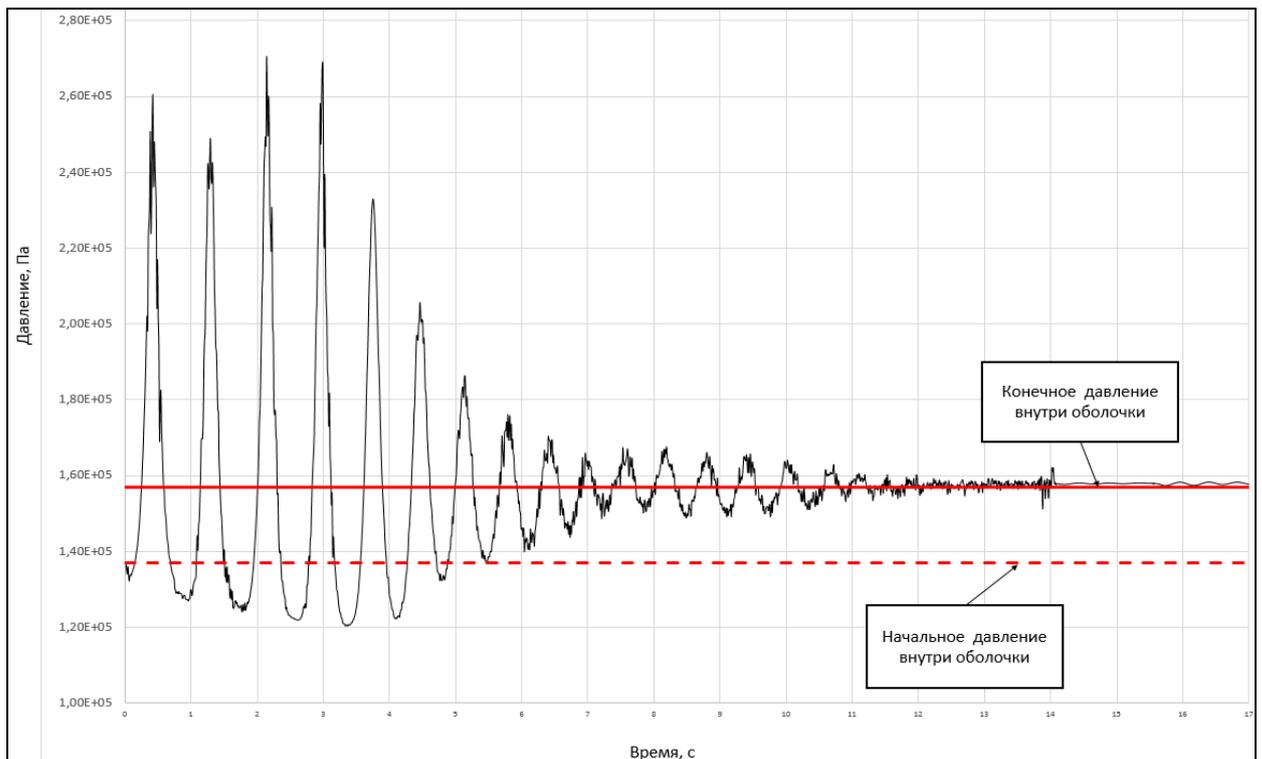


Рис.5. Изменение внутреннего давления цилиндрической оболочки

По данным результатам можно сделать вывод об удовлетворительном совпадении результатов математического моделирования движения с аналитическим расчётом. Большая сходимость результатов достигается общеизвестными подходами – использованием более мелкой сетки как для упругих конструкций, так и для областей внутреннего и внешнего пространства, а также уменьшением шага интегрирования по времени.

### 3.2 Задача динамического воздействия на демпфирующую подушку

Груз с закрепленной демпфирующей подушкой сферической формы, наполненной воздухом, падает, с ускорением свободного падения, на гладкий пол. В

момент соударения с полом, подушка начинает деформироваться, а внутреннее давление воздуха увеличиваться до установления статического равновесия.

Воздействие внутреннего давления подушки на груз рассматривается, как упругое усилие, изменяющееся со временем. Таким образом, характер деформации сферической демпфирующей подушки описывается сжатием трёх последовательно соединенных пружин с различной жесткостью [7] (рис.6). Величина деформации в состоянии равновесия в областях контакта оболочки с поверхностью основания и контакта оболочки с грузом равна, поэтому:

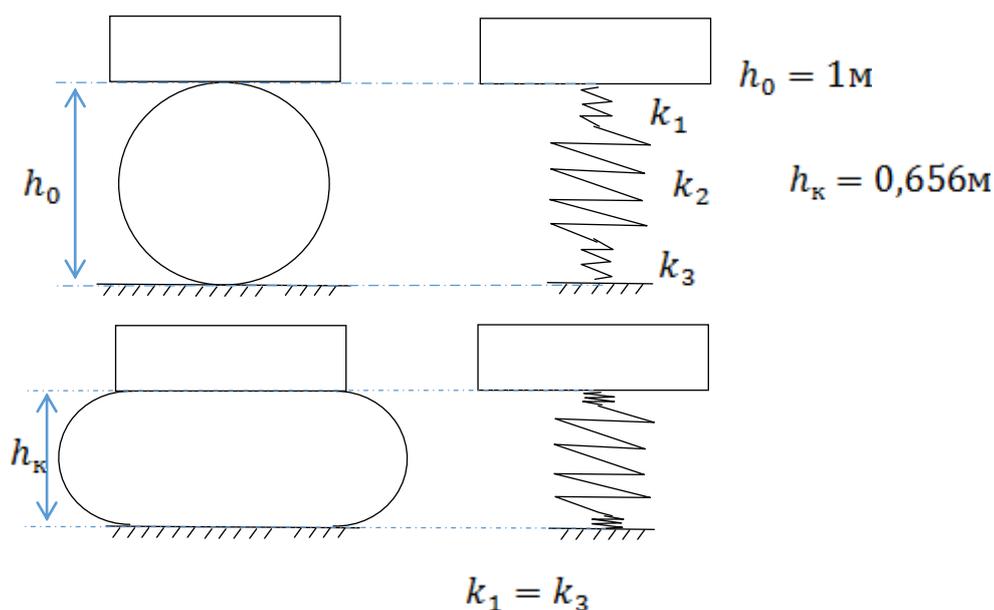


Рис. 6. К задаче о динамическом расчёте системы упругое тело - цилиндрическая оболочка - упругое основание

Потенциальная энергия деформации сосредоточена в тех пружинах, которые имеют наименьшую жесткость, поэтому закон сохранения энергии в момент равновесия с достаточной точностью можно записать:

$$mgh_0 + \frac{mv_0^2}{2} = mgh_k + \frac{(k_1+k_2)x^2}{2} \quad (7)$$

Где:

$h_0$  – начальная высота груза;

$h_k$  – высота груза в момент равновесия;

$x = \frac{h_0-h_k}{2}$  – деформация пружин.

$v_0$  – начальная скорость груза с подушкой.

Тогда суммарная жесткость равна:

$$k = (k_1 + k_2) = \frac{m[2g(h_0-h)+v_0^2]}{\left(\frac{h_0-h_k}{2}\right)^2} \quad (8)$$

Частота колебаний груза:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (9)$$

Период колебаний груза:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (10)$$

По результатам аналитических расчётов период колебания груза равен 0,79 1/сек, что соответствует периоду колебаний груза, приведённых на рис.4 - рис.5 (период колебаний груза на рис.4 соответствует периоду гармонического изменения внутреннего давления в цилиндрической оболочке на рис.5). Величины амплитуд

колебаний не рассматриваются в виду трудности учёта демпфирующих эффектов при аналитическом расчёте.

### 3.3 Задача изменения давления внутри сферической подушки при истечении воздуха из отверстия

Имеется прямоугольная ёмкость с отверстием, в начальный момент времени, давление внутри оболочки превышает атмосферное (рис. 7). Газ внутри с снаружи ёмкости идеальный. Оболочка абсолютно жёсткая.

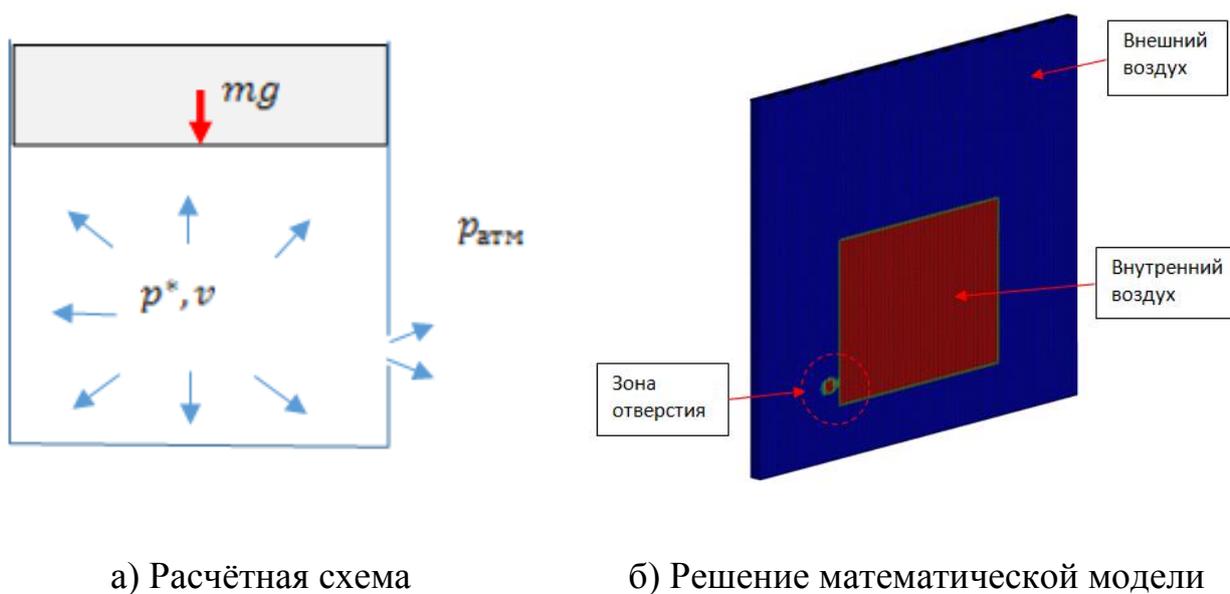


Рис.7. К задаче об истечении сжатого воздуха через отверстие.

Скорость истечения воздуха из резервуара с прямоугольным отверстием [8], при площади отверстия  $0,0032 \text{ м}^2$ .

$$W = \sqrt{2 \frac{k}{k-1} p^* v \left[ 1 - \left( \frac{p_{\text{атм}}}{p^*} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} \quad (11)$$

$v = \frac{V}{m}$  – удельный объем воздуха в подушке;

$k$  – показатель изоэнтропы;

Расход воздуха при истечении из отверстия:

$$m = f \sqrt{2 \frac{k}{k-1} \frac{p^*}{v} \left[ \left( \frac{p_{\text{атм}}}{p^*} \right)^{\frac{2}{k}} - \left( \frac{p_{\text{атм}}}{p^*} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} \quad (12)$$

$f$  – площадь отверстия;

$\mu = 0,8$  – коэффициент сопротивления воздуха при истечении газа из резервуара при прямоугольном отверстии [9].

Кинограмма решения математической модели представлена снизу.

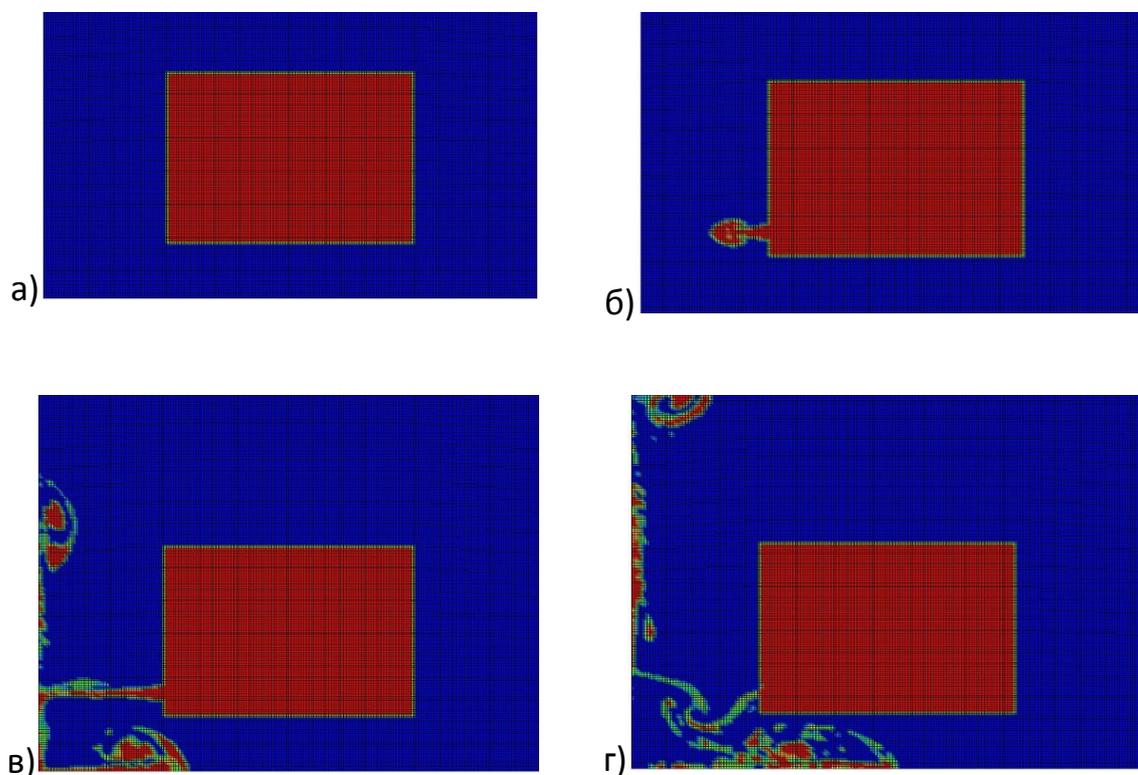


Рис.8. Кинограмма решения задачи об истечении сжатого воздуха через отверстие

Из приведённого на рис.8 решения видно, что в процессе истечения газа из оболочки во внешнее пространство происходит накопление давления в этом пространстве – газ не выходит за пределы отведённой области. В связи с этим обстоятельством приведённые ниже сравнительные результаты математического моделирования истечения газа и аналитического решения отличаются.

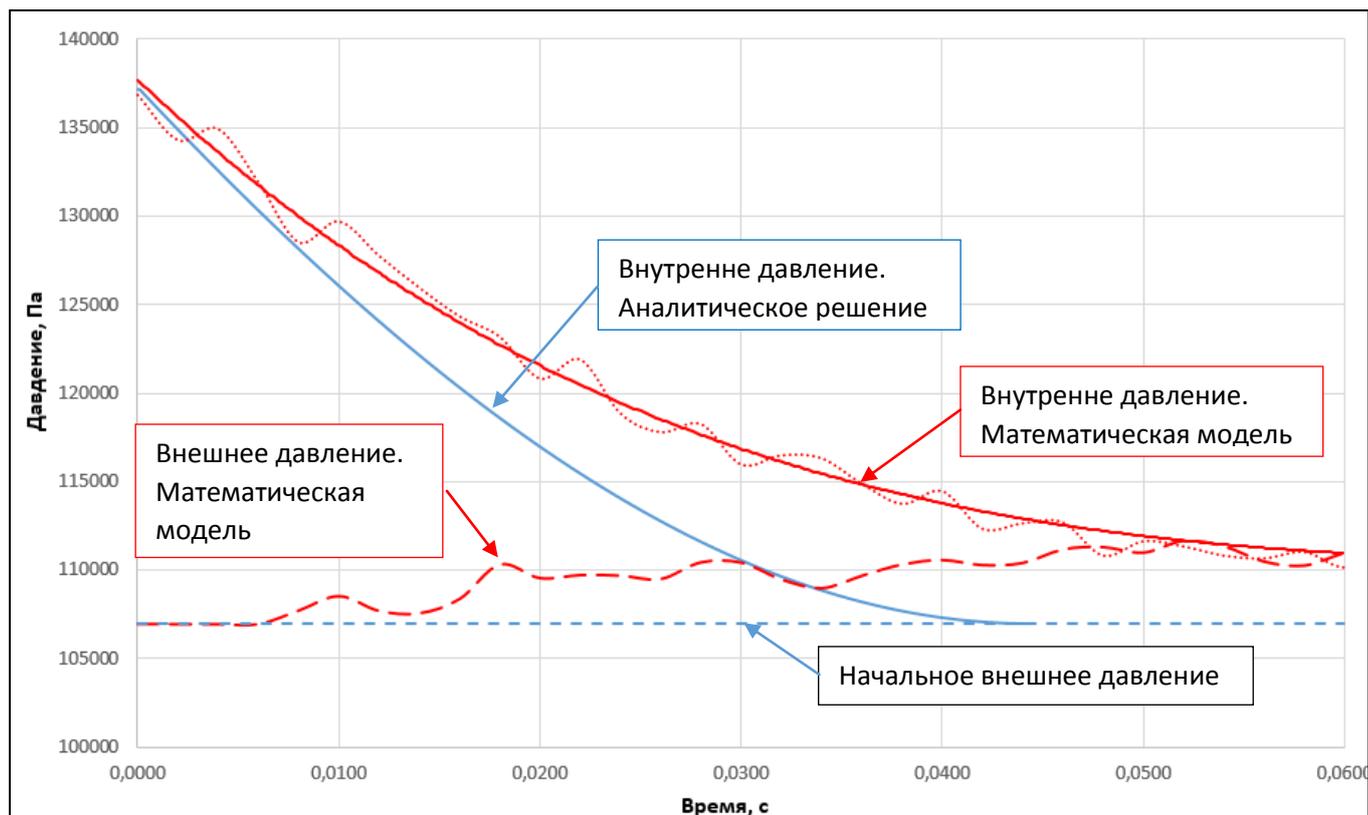


Рис.9. Задача об истекании газа. Сравнение результатов аналитического решения с результатами расчёта математической модели

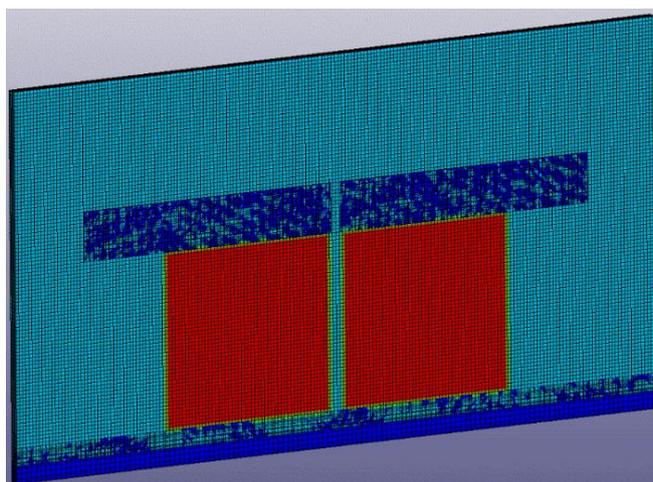
На приведённом на рис. 9 графике красной сплошной линией (тренд) показано изменение внутреннего давления оболочки по времени – решение математической модели; при этом красная пунктирная линия показывает нарастание давления внешнего пространства. При значении времени 0,05 с внутреннее и внешнее

давления уравниваются на величине 111500 Па. Синей сплошной линией показано аналитическое решение - изменение внутреннего давления оболочки во времени. Давление уравнивается с внешним давлением (синяя пунктирная линия) за 0,04с.

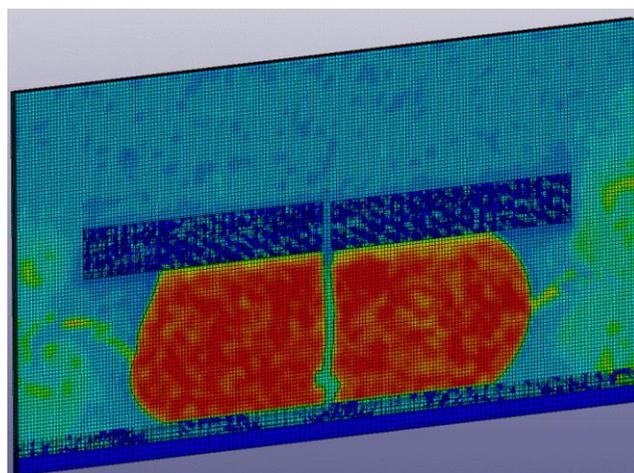
По результатам проведенного исследования можно сделать вывод, что для более точного учёта перетекания давлений из области внутреннего пространства в область пространства внешнего, необходимо увеличить размер расчётной области внешнего пространства. Целесообразность данного уточнения определяется постановкой конкретной задачи. В большинстве случаев интерес представляет только начальный этап работы амортизатора - до уравнивания груза.

#### **4. Математическое моделирование вертикального приземления объекта**

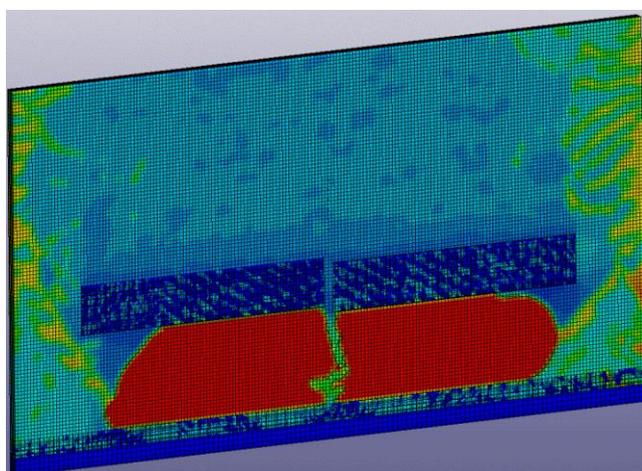
Ниже представлена кинограмма математического моделирования вертикального приземления объекта (рассматривается в составе платформы) с ПА. Т.к. задача решается в плоской постановке, то для того, чтобы образовавшийся в зазоре между двумя ПА воздух не портил картину деформаций оболочек ПА и выходил в окружающее пространство, платформа была разделена на две части. Сама платформа и основание - упругие тела. Для ускорения времени счёта в данном примере рассматривается небольшой размер окружающего внешнего пространства.



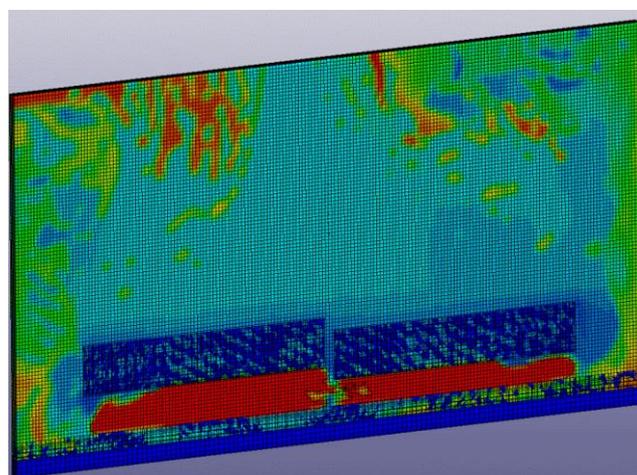
$t = 0.000 \text{ c}$



$t = 0.007 \text{ c}$



$t = 0.014 \text{ c}$



$t = 0.030 \text{ c}$

Рис.10. Кинограмма результатов математического моделирования системы мягкой посадки приземляющегося объекта с двумя ПА. Плоская задача

По приведённой на рис.10 картине деформаций оболочек ПА видно их взаимное влияние друг на друга.

## 5. Выводы

1. На данном этапе авторами продемонстрирована возможность получения решения обобщённой задачи о приземлении объекта с использованием системы мягкого приземления с ПА, позволяющего:

- уточнить динамическое поведение приземляющегося объекта (рис.4, рис.5, рис.7);
- учесть напряжённо-деформированное состояние оболочки ПА (рис.4, рис.5);
- учесть взаимное влияние пневмоамортизаторов (рис.10);
- учитывать податливость поверхности приземления и упругость платформы (рис.10).

2. На упрощённых примерах представлена верификация разрабатываемой математической модели ПА общеизвестными методами классической механики, теории упругости и газодинамики. По её результатам можно сделать вывод об удовлетворительном совпадении численного решения, получаемого с помощью разрабатываемой математической модели, результатам приближённого теоретического решения. Для выявленных расхождений результатов даются объяснения и приводятся пути их устранения.

В дальнейшем предполагается провести ряд уточняющих исследований и сравнить полученные решения с решениями других авторов и экспериментальными данными.

## Библиографический список

1. Федосеев С.Л. Парашютно-десантная техника «Универсала» // Техника и вооружение. 2011. № 2. С. 2-10.
2. Пономарев П.А. Исследование и выбор рациональных параметров пневматического амортизатора для посадки дистанционно-пилотируемых летательных аппаратов: дисс. ... канд. техн. наук. – М: 2000, 145 с.
3. Пономарев П.А., Скиданов С.Н., Тимохин В.А. Расширение диапазона применения пневмоамортизаторов в системах мягкой посадки с использованием разрывных элементов // Труды МАИ, 2000, № 2:  
<http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=34708>
4. Qu Pu, Yang Zhen, Shi Rui. Research on Airbags Landing System for Airborne Vehicle Airdrop, Journal of Information and Computational Science, 2015, vol. 12(5), pp. 2035-2042.
5. Аверьянов И.О., Зинин А.В., Ширококов В.В. Расчетное моделирование систем мягкой посадки с пневмоамортизаторами // Материалы XXII Международного симпозиума “Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред” имени А.Г. Горшкова, Москва, МАИ, 2016, т. 2, С. 14-16.
6. Савельев И.В. Курс общей физики: учебное пособие – М.: Наука, 1982. - 432 с.
7. Бутиков Е.И. Физика в примерах и задачах. – М.: Наука, 1989. - 464 с.
8. Сивухин Д.В., Курс общей физики: Термодинамика и молекулярная физика. – М.: Наука, 1990. - 591 с.

9. Идельчик И.Е., Штейнберг М.О. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – М.: Машиностроение, 1992. - 672 с.