

Научная статья

УДК 539.39

DOI: [10.34759/trd-2022-125-11](https://doi.org/10.34759/trd-2022-125-11)

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПНЕВМАТИЧЕСКОГО АМОРТИЗАТОРА С ВОЗДУХОПРОНИЦАЕМОЙ ТКАНЕВОЙ ОБОЛОЧКОЙ

Игорь Олегович Аверьянов<sup>1✉</sup>, Андрей Геннадьевич Васильченко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>АО «МКПК «Универсал» им. А.И. Привалова», Москва, Россия

<sup>2</sup>АО «НИИ Парашютостроения», Москва, Россия

<sup>1</sup>[i.averyanov@mail.ru](mailto:i.averyanov@mail.ru)✉

<sup>2</sup>[was-an@yandex.ru](mailto:was-an@yandex.ru)

**Аннотация.** Приведено обоснование выбора модели воздухопроницаемости применительно к задаче об амортизаторе с тканевой оболочкой, работающем в условиях изменяющихся характеристик среды протекания. Представлена математическая модель амортизатора, имеющего стравливающие клапаны и воздухопроницаемую тканевую оболочку. Проведено расчетно-экспериментальное исследование влияния учета воздухопроницаемости оболочки амортизатора на траекторию движения закреплённого на нём груза.

**Ключевые слова:** пневматический амортизатор, пневмоамортизатор, тканевая оболочка, система мягкой посадки, воздухопроницаемость, статистическое моделирование процесса приземления.

*Для цитирования:* Аверьянов И.О., Васильченко А.Г. Математическая модель пневматического амортизатора с воздухопроницаемой тканевой оболочкой // Труды МАИ. 2022. № 125. DOI: [10.34759/trd-2022-125-11](https://doi.org/10.34759/trd-2022-125-11)

Original article

## MATHEMATICAL MODEL OF AIR DAMPER WITH PERMEABLE FABRIC SHELL

Igor O. Averyanov<sup>1✉</sup>, Andrey G. Wasilchenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>МКПК «Universal» by A.I. Privalov, Moscow, Russia

<sup>2</sup>JSC “NII Parachutostroyeniya”, Moscow, Russia

<sup>1</sup>[i.averyanov@mail.ru](mailto:i.averyanov@mail.ru) ✉

<sup>2</sup>[was-an@yandex.ru](mailto:was-an@yandex.ru)

**Abstract.** One of the phase of landing process for cargo dropped system with air dampers (System) is when the cargo moves on the damper during its compression. It may lead to cargo bounce and sometimes to its overturn. The System trajectory on this phase depends on experiment conditions: landing velocity, mass that comes to the damper, environment conditions and regime of gas expelling from air damper camera that is controlled with valves. Generally, materials of dampers shells are not hermetic – air permeability may have an influence on System landing dynamics. In this article we describe the mathematical model of the air damper with air permeability fabric shell for its further using in the tasks of System landing parameters prediction with variable experiment conditions.

Considering dynamic model consists of cargo (mass) and cylindrical air damper with a valve. The law of the mass moving describes by one-dimensional equilibrium equation, where reaction from the damper is defined with equation of state for ideal gas. Forth integration method is used to solutions on each step.

The model of gas expelling through the shell has been developed. Analysis of existing permeability theories shows that Rysev's law is the the most appropriate for the considering task: this theory is based on Rahmatulin's non-linear law of pressure gradient to gas velocity, but transformed with similarity theory to nondimensional parameters, related only to fabric characteristics - it makes possible not to consider experiment conditions if we knew them. Based on assumption that gas conditions inside the camera keep constant during the integration step of dynamic mass-to-damper model, we find the value of flow rate through the fabric shell on this step (with formulas of Rysev's law) and add it to the value of valve flow rate.

There are two experiment-calculated tasks are presented to evaluate the influence of permeability on System dynamics: 1 – we put the mass on air damper and find fabric characteristics; 2 – we make a drop test with the same mass and damper. Analysis shows well correlation of experimental results and calculated results received from the developed model. Comparison of the solutions with and without permeable shells of the air damper shows the essential difference on the phase of mass bounce.

Thus, we can conclude that the influence of gas permeability through the damper shell has to be taking into account to define the dynamics of mass-to-air damper system, especially in the tasks of bounce and overturn prediction.

**Keywords:** soft landing system, air damper, dropped cargo landing, fabric permeability, Rysev's model

**For citation:** Averyanov I.O., Wasilchenko A.V. Mathematical model of air damper with permeable fabric shell. *Trudy MAI*, 2022, no. 125. DOI: [10.34759/trd-2022-125-11](https://doi.org/10.34759/trd-2022-125-11)

## Введение

Одним из этапов процесса посадки груза с закрепленным на нём пневматическим амортизационным устройством (далее всё вместе – объект) [1-2] является движение груза на амортизационном устройстве (АУ, амортизатор), сопровождающееся возможным отскоком объекта, в некоторых случаях приводящим к его опрокидыванию [3]. Траектория движения приземляющегося объекта на данном этапе во многом зависит от условий эксперимента: скорости посадки, приходящей на амортизатор массы груза, параметров среды, а также режима стравливания газа из камеры амортизатора, регулирование которого производится с помощью клапанов. Материалы оболочек камер амортизаторов в общем случае не являются герметичными – их воздухопроницаемость может оказывать влияние на динамику приземления объекта. В данной работе описывается разработанная математическая модель пневматического амортизатора с воздухопроницаемой тканевой оболочкой для использования в задачах прогнозирования параметров приземления объекта, характеризующихся вариативностью условий проводимых экспериментов [4].

## Обзор теорий воздухопроницаемости

Основоположником исследований в области проницаемости материалов считается Дарси, занимавшийся гидрологией и предположивший линейную зависимость характеристики скорости фильтрации от напора (или скорости протекания среды  $V$  от перепада давлений  $\Delta p$ ). Введя коэффициент проницаемости  $k$ , эту зависимость в общем виде можно представить как

$$V = k \cdot \Delta p \quad (1)$$

Работы многих исследователей показали, что при возрастании скорости протекания среды зависимость (1) перестаёт быть линейной [5]. Рахматуллин, занимавшимся исследованиями воздухопроницаемости тканевых материалов, была предложена следующая форма квадратичной зависимости перепада давлений от скорости протекания среды, в которой коэффициенты  $a$  и  $b$  подбирались под условия проводимых экспериментов

$$\Delta p = a \cdot V_i + b \cdot V_i^2 \quad (2)$$

Таким образом, связь перепада давления и скорости проникания становилась всё более сложной; уравнения (1) и (2) – это последовательные разложения зависимости  $\Delta p(V_i)$  в ряд всё с большим количеством членов.

Установленные линейная (1) и нелинейная (2) зависимости в том или ином виде используются в различных отраслях народного хозяйства, в том числе в текстильной промышленности при определении воздухопроницаемости

технических тканей. Так современные методы моделирования процессов взаимодействия воздухонаполняемых оболочек с твёрдыми телами (например процесс посадки объекта с системой воздушной амортизации [6-12], процесс раскрытия автомобильных подушек безопасности [13]) основаны на использовании численных методов, в которых проницаемость тканевых материалов задаётся линейным законом: в частности, согласно [14] условие проницаемости записывается как

$$(CDARCY + CDF \cdot |V_i|) \cdot PORE \cdot V_i = PERMi \cdot f_i \frac{\partial P_a}{\partial x_i}, \quad i=1,2,3 \quad (3)$$

В уравнении (3):  $CDARCY$  - коэффициент Дарси;  $CDF$  - дополнительный коэффициент, применяемый для учёта вязкости воздушного потока на больших скоростях протекания;  $PORE$  - коэффициент пористости материала;  $V_i$  - скорость протекания среды в направлении  $i$ ;  $PERMi$  - коэффициент проницания;  $\partial P_a / \partial x_i$  - градиент давления по направлению  $i$ ;  $f_i$  - некоторая функция накладываемая на градиент давления.

Анализируя формулу (3), можно заключить следующее: формула представляет собой модифицированную запись зависимости (1) при коэффициенте  $CDF = 0$  и использовании выражения для градиента давления без наложения какой-либо функции  $f_i$ ; в общем виде формула (3) выражает нелинейную зависимость перепада давления от скорости протекания среды и при задании соответствующих параметров может являться аналогом зависимости (2).

Общим недостатком описанных линейной и нелинейной теорий в формах (1) и (2)-(3) соответственно, является то обстоятельство, что используемые в этих зависимостях коэффициенты отражают условия конкретных экспериментов, в то время как задача проектирования тканевых пневматических амортизаторов предполагает необходимость рассмотрения их работы в условиях изменяющихся характеристик среды протекания.

Герасимато, взяв за основу зависимость (2) и используя методы теории размерности и подобия [15], предложил обратиться к физической сути явления проницания и ввести безразмерные переменные, характеризующие закон протекания среды через ткань. С целью получения безразмерных критериев самой ткани и придания им физического смысла Рысевым разработана видоизменённая запись структуры закона протекания среды через ткань - введены безразмерный коэффициент сопротивления ткани  $c_{w_0}$  и эффективный диаметр нити  $d_{эф}$ . Получив своё развитие в работах [16-18], данный подход к оценке воздухопроницаемости в настоящее время используется при проектировании парашютных систем [18].

Согласно [16-18], закон протекания газообразной среды через ткань запишется следующим образом

$$\frac{c_w}{c_{w_0}} = 1 + \frac{1}{Re_T}, \quad (4)$$

$$c_w = \frac{\Delta p}{\rho \cdot V^2 / 2},$$

$$\text{Re}_T = V \cdot \rho \cdot d_{\text{эф}} / \mu$$

В формулах (4):  $c_w$  - безразмерный коэффициент сопротивления ткани в конкретных условиях эксперимента;  $\text{Re}_T$  - число Рейнольдса из теории подобия, характеризующее процесс протекания среды через ткань;  $c_{w_0}$  - предельный безразмерный коэффициент сопротивления ткани при  $\text{Re}_T \rightarrow \infty$ , в дальнейшем названный «сопротивляемостью»;  $V$  - скорость протекания воздуха через ткань;  $\Delta p$  - избыточное давления;  $\rho$  - плотность среды;  $\mu$  - коэффициент кинематической вязкости. Таким образом, коэффициенты  $a$  и  $b$  из (2) (в которых смешаны характеристики ткани и среды) выражены через два параметра  $c_{w_0}$  и  $d_{\text{эф}}$ , являющихся характеристиками конкретной ткани.

В случае, когда условия эксперимента известны, оболочки воздушных амортизаторов изготовлены из обладающих малой пористостью тканей и их нагруженность избыточным внутренним давлением невысока для оценки влияния воздухопроницаемости оболочек амортизаторов на динамику приземления объекта возможно использование линейной зависимости в виде (1). Однако в общем случае, при решении задач динамики работы тканевых пневматических амортизаторов, следует использовать нелинейную теорию протекания среды через ткань – зависимости (2)-(3) и (4). При этом, использование закона протекания, выраженного зависимостями (4), позволяет по известным характеристикам ткани проводить расчётную оценку параметров воздухопроницаемости тканевой оболочки амортизатора при различных условиях эксперимента [4]. Следует также отметить,



что оболочки амортизаторов в основном изготавливаются из технических тканей, применяемых в парашютостроении, характеристики которых известны и определены для использования в зависимостях (4).

Таким образом, задачей данного исследования является разработка математической модели (ММ) пневматического амортизатора с воздухопроницаемой тканевой оболочкой с использованием нелинейной теории протекания среды через ткань (4) с целью уточнения динамики приземления объекта на этапе обжатия его амортизационной системы.

### **ММ пневматического амортизатора с газонепроницаемой оболочкой**

Предварительно описывается ММ тканевого пневматического амортизатора (амортизатора, АУ) с газонепроницаемой оболочкой, аналогичная [19-21]: стравливание газа из амортизатора осуществляется только с помощью регулируемых клапанов; закон изменения площади стравливающих клапанов известен и является функцией избыточного давления  $f_i = f(\Delta p_i)$ ; заполняющий камеру амортизатора газ идеален и сжимается по адиабатическому закону; температура и давление внутри камеры распределены равномерно.

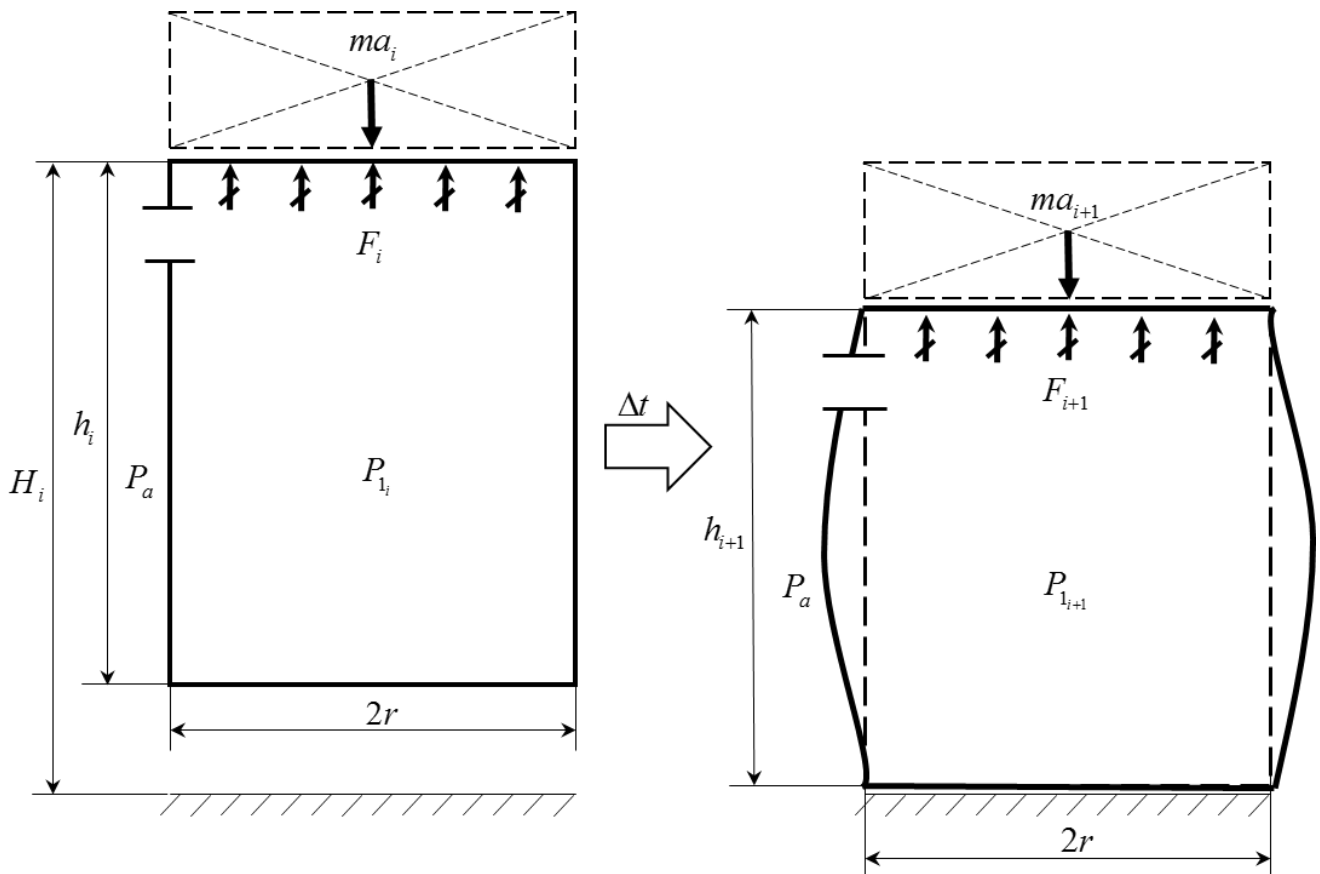


Рисунок 1. Схема работы амортизатора

Тогда, с учётом принятых допущений, сопротивление амортизатора обжатию является функцией скорости его обжатия  $F = f(V)$ , определяемой скоростью вертикального поступательного движения груза массы  $m$ . Уравнение движения находящегося в поле сил тяжести  $g$  груза для случая вертикальной посадки запишется следующим образом:

$$\overline{F} + \overline{mg} = \overline{ma} \quad (5)$$

Интегрируя уравнения движения груза как твёрдого тела по времени с заданным шагом  $\Delta t$  с использованием метода конечных разностей [22], процесс обжатия амортизатора сводится к рассмотрению его  $i$  квазистационарных

состояний, в каждом из которых оболочка амортизатора находится в равновесном состоянии.

Режим истечения газа из АУ со стравливающим клапаном и газонепроницаемой стенкой на  $i$  – м шаге интегрирования по времени определяется таким параметром, как действительный мгновенный секундный расход

$$G_i = \mu \cdot \psi_i \cdot f_i \cdot p_i \cdot \sqrt{\frac{1}{R \cdot T_i}} \quad (6)$$

Здесь:  $\mu$  - коэффициент расхода воздуха;  $\psi_i$  - коэффициент, зависящий от природы газа;  $f_i$  - площадь стравливающего клапана;  $p_i$  - давление в АУ;  $R$  - газовая постоянная воздуха (287,05 Дж/кг·град);  $T_i$  - абсолютная температура газа.

Указанные в правой части формулы (6) переменные, характеризующие состояние газа в камере амортизатора  $\psi_i$ ,  $p_i$  и  $T_i$ , а также передаваемое от амортизатора на груз усилие  $F_i$ , определяются по известным методикам, изложенным, например в [19-21]. В то же время понятно, что в [19-21] описан предельный случай воздухопроницаемой ткани для пневматического амортизатора, которой в природе нет – любая ткань имеет хоть малую, но проницаемость. Учтём реальные характеристики проницаемости ткани по зависимости (4).

## **ММ пневматического амортизатора с воздухопроницаемой оболочкой**

Принимаются следующие допущения:

- 1) оболочка амортизатора, представляющая собой тканевый пакет (внутренняя и внешняя оболочки с армирующими лентами), может быть представлена по аналогии с [16-18] в качестве эквивалентной однородной ткани с характеристиками  $d_{эф}$  и  $c_{w_0}$ ;
- 2) характеристики воздухопроницаемости рассматриваемой эквивалентной ткани не зависят от её деформации;
- 3) динамический процесс истечения воздуха через оболочку может быть рассмотрен как сумма квазистационарных состояний на каждом шаге интегрирования по времени  $\Delta t$  процесса обжатия амортизатора со срабатывающим клапаном.

Рассматриваемый процесс протекания газообразной среды через ткань представляет собой процесс преодоления этой среды некоего барьера в виде тканевой стенки и пристеночных - областей [18]. Схематичный график перепада давлений на стенке оболочки представлен на рисунке 2 – а). На нём тканевая стенка, разделяющая пространство на 2 области, с левой стороны обдувается воздушным потоком, имеющим скорость  $V_1$ . Создаваемая сила, воздействующая на стенку, вызвана перепадом давлений  $\Delta p = p_1 - p_2$ , где  $p_1$  и  $p_2$  давления до ткани и за ней. За пределом  $\delta$ -области справа скорость воздушного потока по-прежнему равна  $V_1$ . При этом сама ткань характеризуется такими параметрами как эффективный диаметр нити  $d_{эф}$  и сопротивляемость  $c_{w_0}$ .

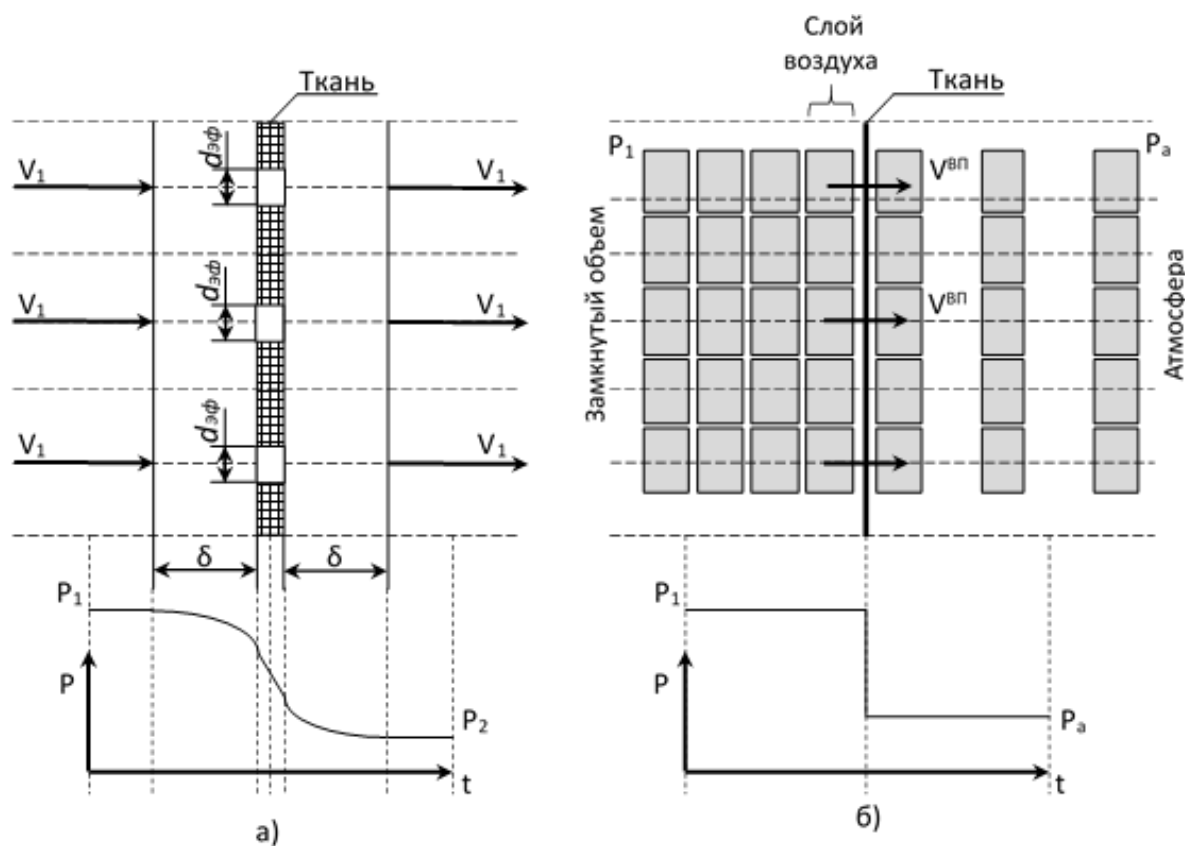


Рисунок 2. Схема протекания воздуха через тканевую оболочку: а) модель воздухопроницаемости ткани [18]; б) предложенная модель воздухопроницаемости

Предлагаемая схема протекания воздуха через оболочку представлена на рисунке 2 – б). На ней тканевая оболочка представляется в виде границы, разделяющей замкнутый объём и атмосферу. Воздух внутри оболочки (слева от границы) представляется в виде прилегающих друг к другу слоёв. Равномерность расположения слоёв воздуха обуславливается сделанным ранее допущением о том, что внутри АУ распределение давления и температуры равномерное. Перепад давлений  $\Delta p = p_1 - p_a$  осуществляется скачком на границе самой оболочки.

За некоторое время  $\overline{\Delta t}$  под воздействием перепада давлений  $\Delta p$  слой воздуха проникает через оболочку и оказывается вне объёма АУ. При этом этот слой

воздуха в процессе проникновения через оболочку приобретает некоторую скорость, среднее значение которой равно  $V^{BII}$ . Положив, что шаг интегрирования по времени процесса обжата АУ  $\Delta t$  и время проникновения через границу одного слоя  $\overline{\Delta t}$  связаны соотношением  $\Delta t = n \cdot \overline{\Delta t}$ , а также учитывая допущение № 3 о квазистационарности процесса на интервале времени  $\Delta t$  (в смысле постоянства значений перепада давления  $\Delta p$ , плотности и температуры среды внутри АУ на рассматриваемом шаге интегрирования по времени уравнений, описывающих обжатие АУ), можно заключить, что

$$V_i^{BII} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n V_j^{BII} \quad (7)$$

Здесь:  $V_i^{BII}$  - средняя скорость потока на  $i$ -м шаге интегрирования процесса обжата АУ;  $V_j^{BII}$  - средняя скорость слоя газа, проходящего через границу на  $j$ -м шаге интегрирования процесса протекания.

Таким образом, объём воздуха, вышедшего на  $i$ -м шаге интегрирования из АУ через оболочку площадью  $S_i$  за время  $\Delta t$

$$W_i^{BII} = \sum_{j=1}^n (V_j^{BII} \cdot \overline{\Delta t} \cdot S_i) = V_i^{BII} \cdot \Delta t \cdot S_i \quad (8)$$

Пусть известны характеристики ткани  $d_{эф}$  и  $c_{w_0}$ . Тогда для  $i$ -го шага интегрирования по времени, подставив второе выражение формулы (4) в первое и решив полученное квадратное уравнение относительно  $Re$ , получим

$$\text{Re}_i = \frac{1}{2} \cdot \left( \sqrt{1 + \frac{8 \cdot \Delta p_i \cdot \rho_i \cdot d_{\text{эф}}^2}{c_{w_0} \cdot \mu^2}} - 1 \right) \quad (9)$$

Выражая скорость из третьего выражения формулы (4), можно определить среднюю скорость потока воздуха через ткань

$$V_i^{\text{ВП}} = \frac{\text{Re}_i \cdot \mu}{\rho_i \cdot d_{\text{эф}}} \quad (10)$$

Определив объём вышедшего через оболочку воздуха  $W_i^{\text{ВП}}$  по формуле (8) и зная площадь оболочки амортизатора  $S_i$ , масса вышедшего через оболочку газа и связанный с этим действительный мгновенный секундный расход определяются соответственно как

$$\begin{aligned} m_{\text{г}_i}^{\text{ВП}} &= W_i^{\text{ВП}} \cdot \rho_i, \\ \Delta G_i^{\text{ВП}} &= \frac{m_{\text{г}_i}^{\text{ВП}}}{\Delta t} \end{aligned} \quad (11)$$

Действительный мгновенный секундный расход для АУ со стравливающим клапаном и воздухопроницаемой оболочкой получается совмещением формулы (6) и второго выражения формулы (11)

$$G_i = \mu \cdot \psi_i \cdot f_i \cdot p_i \cdot \sqrt{\frac{1}{R \cdot T_i}} + \Delta G_i^{\text{ВП}} \quad (12)$$

Таким образом, в ММ учтены реальные характеристики воздухопроницаемости ткани для пневматического амортизатора.

## Экспериментальное исследование влияния воздухопроницаемости тканевой оболочки амортизатора на динамику приземления системы груз-амортизатор

С целью определения характеристик проницаемости тканевой оболочки амортизатора проведён следующий эксперимент: цилиндрический тканевый пневматический амортизатор с заглушённым стравливающим клапаном своим верхним основанием закреплён к клетки, поднятой в начальный момент времени на высоту амортизатора (нижнее основание амортизатора касается пола). В процессе эксперимента клетка освобождается, под действием её собственного веса происходит обжатие амортизатора (см. кинограмму на рисунке 3).

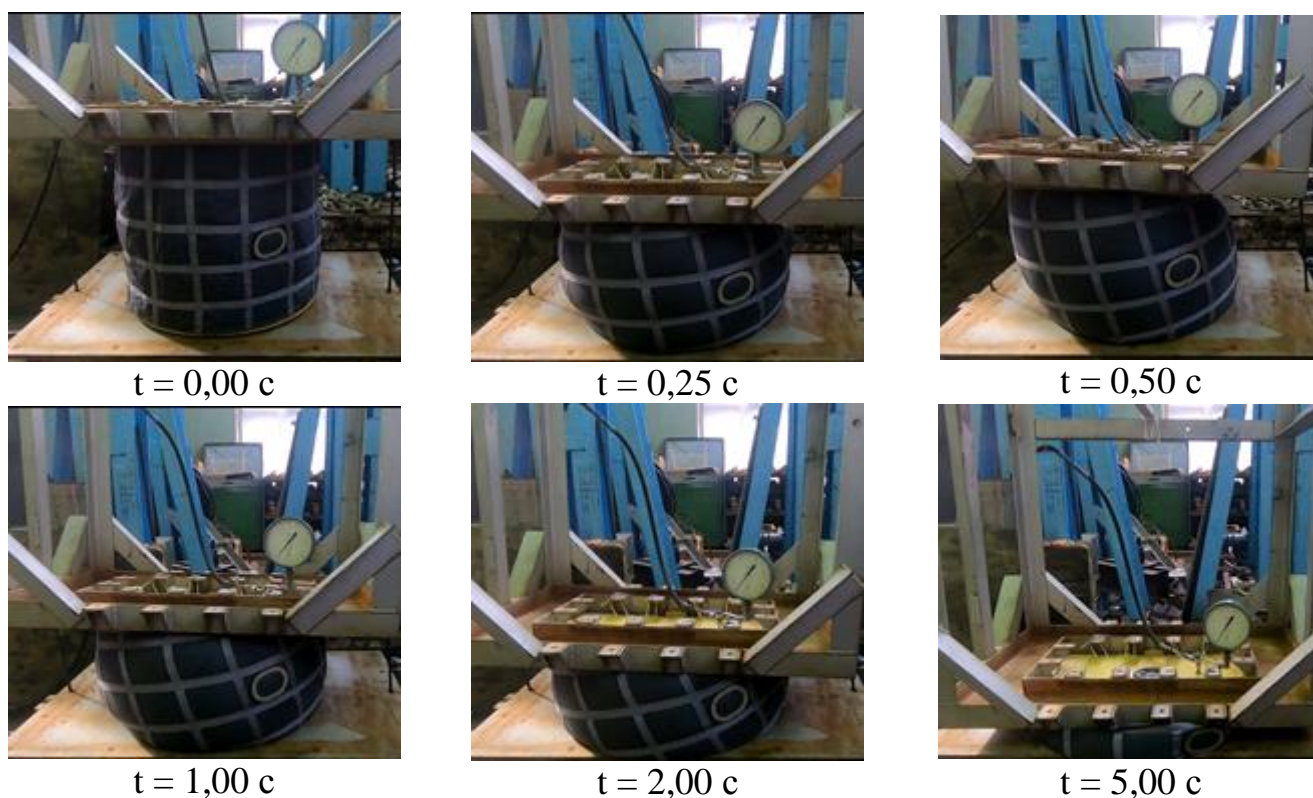


Рисунок 3. Кинограмма обжатия амортизатора

На рисунке 4 сплошной тонкой линией представлены экспериментальные данные по изменению перемещения верхнего основания амортизатора во времени,



полученные обработкой видеозаписи процесса обжатия (тонкими вертикальными пунктирными линиями обозначены моменты времени, соответствующие кадрам на рисунке 3), тонкой горизонтальной пунктирной линией показана остаточная высота амортизатора, сплошной жирной - результат расчёта с заложенными характеристиками тканевой оболочки  $d_{эф} = 0,0001\text{ м}$ ,  $c_{w_0} = 10^6$ .

Для демонстрации устойчивости алгоритма разработанной математической модели процесса динамического обжатия амортизатора на рисунке 4 штрих-пунктирной линией показан график расчётного перемещения верхнего основания, полученный для газонепроницаемой (герметичной) оболочки при  $\Delta G^{BII} = 0$  в формуле (12).

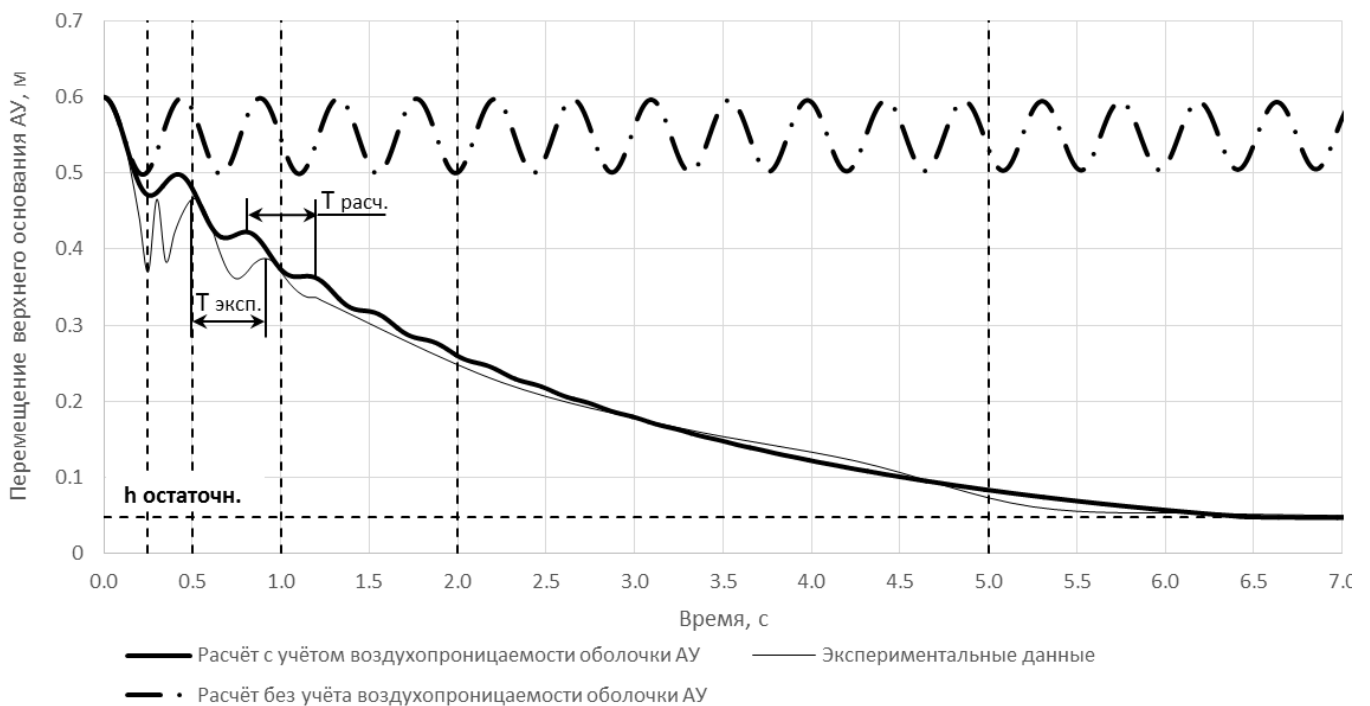


Рисунок 4. Перемещение верхнего основания амортизатора при обжатии клетью, м

Анализ представленных на рисунке 4 графиков расчётных и экспериментальных значений перемещений верхнего основания амортизатора позволяет сделать заключение, о удовлетворительном совпадении траекторий движения при установлении режима обжатия (начиная с  $t = 1,0$  с) и времени полного истечения воздуха из камеры амортизатора ( $\sim 6,0$  с). В то же время штрих-пунктирная линия расчётного перемещения верхнего основания, полученная для газонепроницаемой (герметичной) оболочки вообще не совпадает с данными эксперимента. Некоторые отличия (20%) расчётных и экспериментальных значений на первоначальном этапе обжатия АУ с воздухопроницаемой оболочкой объясняются несоответствием форм потери устойчивости оболочки амортизатора: на втором кадре кинограммы процесса обжатия (рисунок 3,  $t = 0,25$  с) видно, что амортизатор приобрёл наклон и имеет место излом оболочки в месте контакта с клетью с правой стороны, в то время как в ММ данные эффекты не учитываются – деформации цилиндрической оболочки амортизатора симметричны относительно его центральной оси. После 2-й с от начала движения отличие расчёта и эксперимента снижается до 4%. При этом, не смотря на различия в амплитудах некоторых колебаний, в целом наблюдается соответствие периодов колебательных процессов:  $T_{\text{расч.}} \approx T_{\text{эсп.}}$  (см. рисунок 4).

Таким образом, по результатам данной расчётно-экспериментальной работы по плавному обжатию цилиндрического амортизатора продемонстрированы общая работоспособность ММ амортизатора с воздухопроницаемой оболочкой и

соответствие заложенных характеристик ткани  $d_{эф} = 0,0001$  м,  $c_{w_0} = 10^6$  физическим свойствам тканевой оболочки рассматриваемого амортизатора.

На рисунке 5 представлена кинограмма копрового сброса того же амортизатора, что был рассмотрен в предыдущем примере, но с открытым клапаном, закон стравливания которого известен. В начальный момент времени избыточное давление внутри камеры отсутствует.

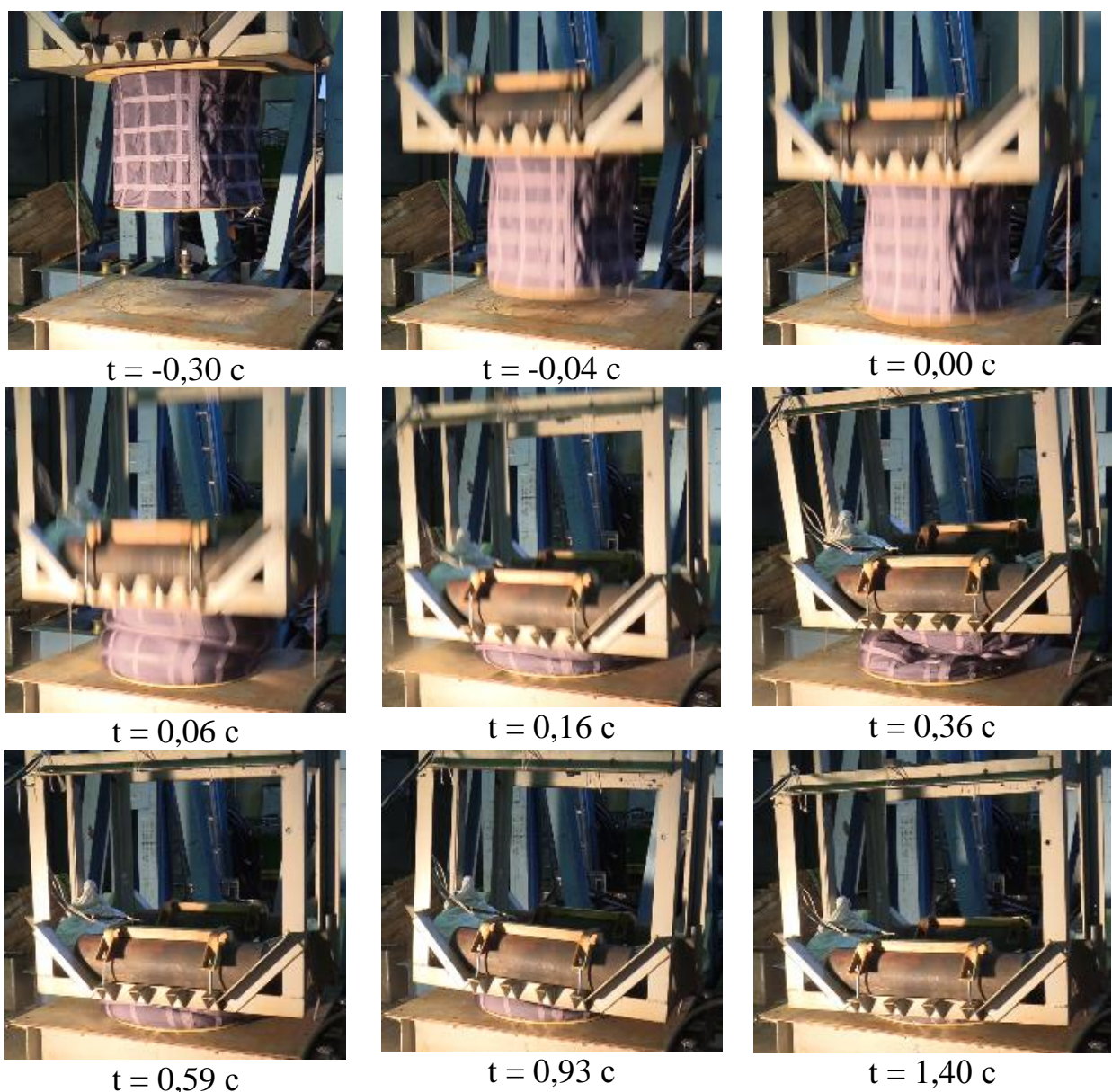


Рисунок 5. Кинограмма копрового сброса клетки с амортизатором

Аналогично предыдущему случаю результат обработки видеозаписи копрового сброса представлен на рисунке 6 в виде графика изменения положения верхнего основания амортизатора (тонкая сплошная линия) во времени. За начальный момент времени принят момент касания нижнем основанием амортизатора пола (рисунок 5,  $t = 0,00$  с).

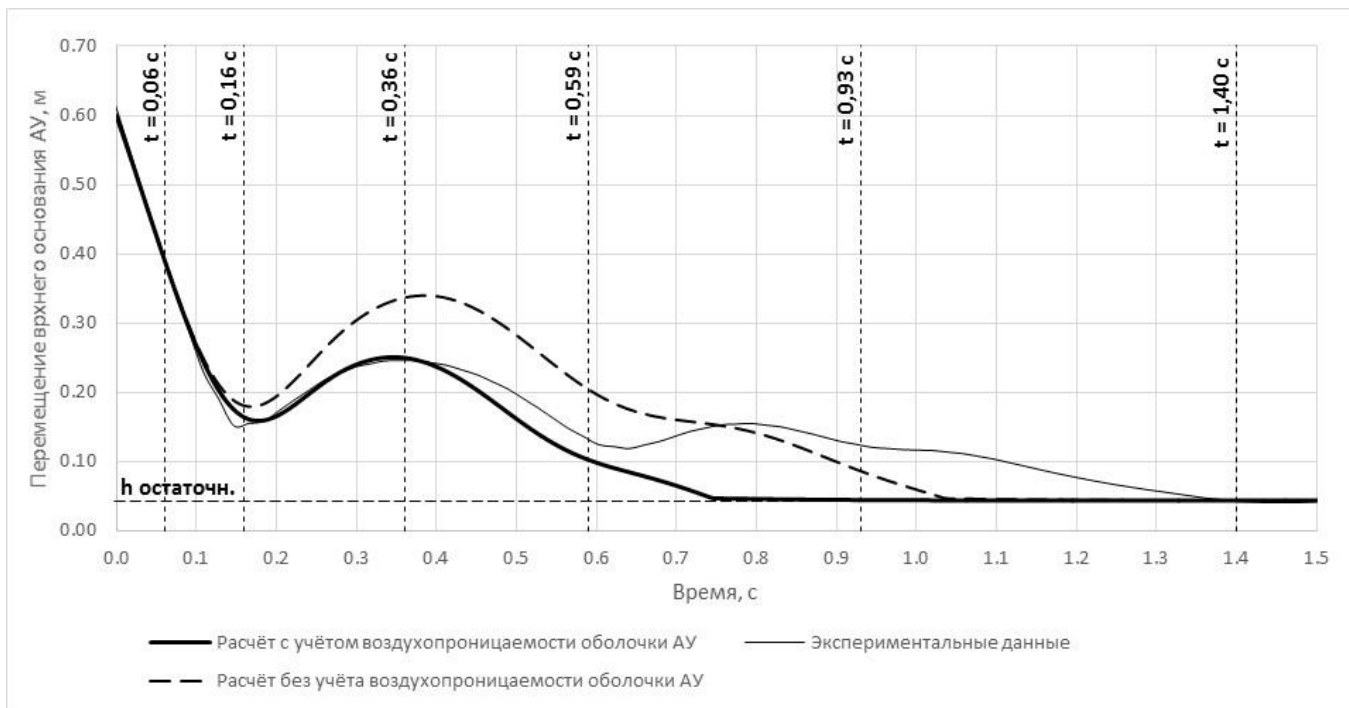


Рисунок 6. Вертикальные перемещения верхнего основания амортизатора при копровом сбросе, м

Там же приведены расчётные значения соответствующих перемещений, полученные с использованием математической модели амортизатора, истечение газа из которого задавалось формулой (12): сплошная толстая линия соответствует случаю амортизатора с воздухопроницаемой стенкой, толстая пунктирная линия — с герметичной стенкой (в формуле (12) принималось  $\Delta G^{BII} = 0$ ).

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод об удовлетворительном совпадении результатов эксперимента с результатом расчёта по предлагаемой математической модели, учитывающей воздухопроницаемость тканевой оболочки амортизатора. Наблюдаемое расхождение этих результатов в конечной фазе приземления амортизатора (при  $t > 0,59$  с), объясняется тем обстоятельством, что в эксперименте при складывании тканевая стенка амортизатора заслоняла стравливающий клапан, препятствуя выходу через него воздуха и тормозя дальнейший ход обжатия. Сопоставление результатов расчёта рассматриваемого процесса приземления объекта с учётом и без учёта воздухопроницаемости оболочки амортизатора, при одинаковых условиях эксперимента, показывает существенность влияния учёта эффекта воздухопроницаемости оболочек на траекторию движения приземляющегося объекта, прежде всего при его отскоке – рисунок 6,  $t = 0,36$  с. Величина отскока по ММ герметичного амортизатора на 40% выше величины отскока по ММ воздухопроницаемого амортизатора при идентичности величины отскока по ММ воздухопроницаемого амортизатора данным эксперимента.

### **Заключение**

На основании нелинейной теории протекания среды через ткань, записанной в форме (4), разработана математическая модель пневматического амортизатора со стравливающим клапаном и воздухопроницаемой тканевой оболочкой,

позволяющая по известным характеристикам тканевой оболочки  $d_{эф}$  и  $c_{w_0}$  уточнить решение задачи динамики приземления объекта с амортизатором. Проведенное расчётно-экспериментальное исследование влияния воздухопроницаемости тканевой оболочки амортизатора на динамику приземления системы груз-амортизатор показало необходимость учёта эффекта воздухопроницаемости при анализе динамики работы подобных систем, особенно при прогнозировании параметров отскока объекта, возникающего на этапе обжатия амортизатора.

### **Список источников**

1. Трямкин А.В., Емельянов Ю.Н. Математическая модель процесса торможения объекта десантирования парашютно-реактивной системой // Труды МАИ. 2000. № 1. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=34731>
2. Трямкин А.В., Скиданов С.Н. Исследование процесса наполнения парашютных систем // Труды МАИ. 2001. № 3. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=34686>
3. Аверьянов И.О., Зинин А.В. Математическая модель процесса приземления недеформируемого груза с амортизирующим устройством на жесткую площадку // Труды МАИ. 2022. № 124. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=167067>. DOI: [10.34759/trd-2022-124-12](https://doi.org/10.34759/trd-2022-124-12)
4. Аверьянов И.О. Применение метода Монте-Карло для прогнозирования надёжности процесса приземления систем мягкой посадки с пневмоамортизаторами

// Труды МАИ. 2020. № 115. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=119896>. DOI: [10.34759/trd-2020-115-03](https://doi.org/10.34759/trd-2020-115-03)

5. Куличенко А.В. Разработка моделей и экспериментальных методов изучения воздухопроницаемости текстильных материалов: дисс. ... д.т.н. – М.: МГУДТ, 2005. - 340 с.
6. Аверьянов И.О., Сулейманов Т.С., Тараканов П.В. Разработка обобщённой методики расчета систем мягкой посадки с пневмоамортизаторами // Труды МАИ. 2017. № 92. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=77448>
7. 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. DOI: [10.12733/jics20105798](https://doi.org/10.12733/jics20105798)
8. Per-Olof Marklund, Larsgunnar Nilsson. Simulation of airbag deployment a coupled fluid-structure approach // 7<sup>th</sup> International LS-Dyna Users Conference, 2002. URL: <https://www.dynalook.com/conferences/international-conf-2002>
9. Yves de Lassat de Pressigny, Vincent Lapoujade. Numerical simulation of ground impact after airdrop // 5<sup>th</sup> European LS-Dyna Users Conference, 2005. URL: <https://www.dynalook.com/conferences/european-conf-2005>
10. Yves de Lassat de Pressigny, Thierry Baylot. Simulation of the impact on ground of airdrop loads to define a standard worst case test // 6<sup>th</sup> European LS-Dyna Users Conference, 2007. URL: <https://www.dynalook.com/conferences/european-conf-2007>
11. Masoud Alizadeh, Ahmad Sedaghat, Ebrahim Kargar. Shape and orifice optimization of airbag systems for UAV parachute landing // International Journal of

Aeronautical and Space Sciences, 2014, vol. 15(3), pp. 112-121. URL: <https://doi.org/10.5139/IJASS.2014.15.3.335>

12. Pan Cao, Xuyan Hou, Yongbin Wang, Meng Li, Xiaoshan Rao, Yuetian Shi. Flexible airbag cushioning for Martian landing based on discrete element method // Advances in Space Research, 2019, vol. 63, issue 8, pp. 2566-2583. URL: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.01.007>

13. Huajian Zhou, Zhihua Zhong, Manjiang Hua. Design and Occupant-Protection Performance Analysis of a New Tubular Driver Airbag // Research Vehicle Engineering, 2018, vol. 4, issue 2, pp. 291-297. URL: <https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.03.015>

14. LS-DYNA KEYWORD USER'S MANUAL. URL: [www.dynasupport.com/manuals/](http://www.dynasupport.com/manuals/)

14. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. – М.: Наука, 1977. - 440 с.

15. Рысев О.В., Вишняк А.А., Чуркин В.М., Юрцев Ю.Н. Динамика связанных тел в задачах движения парашютных систем. – М.: Машиностроение, 1992. – 288 с.

16. Рысев О.В., Пономарев А.Т., Васильев М.И., Вишняк А.А., Днепров И.В., Мосеев Ю.В. Парашютные системы. – М.: Наука.Физматлит, 1996. - 288 с.

17. Лялин В.В., Морозов В.И., Пономарев А.Т. Парашютные системы. Проблемы и методы их решения. – М.: Физматлит, 2009. – 576 с.

18. Емельянов Ю.Н., Павлов А.С., Титов В.А. Проектирование системы мягкой посадки приземляющегося объекта. – М.: Изд-во МАИ, 1988. – 62 с.



19. Пономарев П.А. Исследование и выбор рациональных параметров пневматического амортизатора для посадки дистанционно-пилотируемых летательных аппаратов. Дисс. ... к.т.н., Москва, МАИ, 2000, 145 с.
20. 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. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=34708>
21. Амосов А.А., Дубинский Ю.А., Копченова Н.В. Вычислительные методы для инженеров. – М.: Высшая школа, 1994. – 544 с.

## References

1. Tryamkin A.V., Emel'yanov Yu.N. *Trudy MAI*, 2000, no. 1. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=34731>
2. Tryamkin A.V., Skidanov S.N. *Trudy MAI*, 2001, no. 3. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=34686>
3. Aver'yanov I.O., Zinin A.V. *Trudy MAI*, 2022, no. 124. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=167067>. DOI: [10.34759/trd-2022-124-12](https://doi.org/10.34759/trd-2022-124-12)
4. Aver'yanov I.O. *Trudy MAI*, 2020, no. 115. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=119896>. DOI: [10.34759/trd-2020-115-03](https://doi.org/10.34759/trd-2020-115-03)
5. Kulichenko A.V. *Razrabotka modelei i eksperimental'nykh metodov izucheniya vozdukhopronitsaemosti tekstil'nykh materialov* (Development of models and experimental

methods for research of fabric materials permeability), Doctor's thesis, Moscow, MSUDT, 2005, 340 p.

6. Aver'yanov I.O., Suleimanov T.S., Tarakanov P.V. *Trudy MAI*, 2017, no. 92. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=77448>

7. 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. DOI: [10.12733/jics20105798](https://doi.org/10.12733/jics20105798)

8. Per-Olof Marklund, Larsgunnar Nilsson. Simulation of airbag deployment a coupled fluid-structure approach, *7th International LS-Dyna Users Conference*, 2002. URL: <https://www.dynalook.com/conferences/international-conf-2002>

9. Yves de Lassat de Pressigny, Vincent Lapoujade. Numerical simulation of ground impact after airdrop, *5th European LS-Dyna Users Conference*, 2005. URL: <https://www.dynalook.com/conferences/european-conf-2005>

10. Yves de Lassat de Pressigny, Thierry Baylot. Simulation of the impact on ground of airdrop loads to define a standard worst case test, *6th European LS-Dyna Users Conference*, 2007. URL: <https://www.dynalook.com/conferences/european-conf-2007>

11. Masoud Alizadeh, Ahmad Sedaghat, Ebrahim Kargar. Shape and orifice optimization of airbag systems for UAV parachute landing, *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, 2014, vol. 15(3), pp. 112-121. URL: <https://doi.org/10.5139/IJASS.2014.15.3.335>

12. Pan Cao, Xuyan Hou, Yongbin Wang, Meng Li, Xiaoshan Rao, Yuetian Shi. Flexible airbag cushioning for Martian landing based on discrete element method, *Advances in*

*Space Research*, 2019, vol. 63, issue 8, pp. 2566-2583. URL: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.01.007>

13. Huajian Zhou, Zhihua Zhong, Manjiang Hua. Design and Occupant-Protection Performance Analysis of a New Tubular Driver Airbag, *Research Vehicle Engineering*, 2018, vol. 4, issue 2, pp. 291-297. URL: <https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.03.015>

14. *LS-DYNA KEYWORD USER'S MANUAL*. URL: [www.dynasupport.com/manuals/](http://www.dynasupport.com/manuals/)

15. Sedov L.I. *Metody podobiya i razmernosti v mekhanike* (Methods of similarity and dimensionality in mechanics), Moscow, Nauka, 1977, 440 p.

16. Rysev O.V., Vishnyak A.A., Churkin V.M., Yurtsev Yu.N. *Dinamika svyazannykh tel v zadachakh dvizheniya parashyutnykh system* (Dynamics of connected bodies in the tasks of parachute systems movement), Moscow, Mashinostroenie, 1992, 288 p.

17. Rysev O.V., Ponomarev A.T., Vasil'ev M.I., Vishnyak A.A., Dneprov I.V., Moseev Yu.V. *Parashyutnye sistemy* (Parachute systems), Moscow, Nauka.Fizmatlit, 1996, 288 p.

18. Lyalin V.V., Morozov V.I., Ponomarev A.T. *Parashyutnye sistemy. Problemy i metody ikh resheniya* (Parachute systems. Problems and methods of their solving), Moscow, Fizmatlit, 2009, 576 p.

19. Emel'yanov Yu.N., Pavlov A.S., Titov V.A. *Proektirovanie sistemy myagkoi posadki prizemlyayushchegosya ob'ekta* (Developing of soft landing system), Moscow, Izd-vo MAI, 1988, 62 p.

20. Ponomarev P.A. *Issledovanie i vybor ratsional'nykh parametrov pnevmaticheskogo amortizatora dlya posadki distantsionno-pilotiruemykh letatel'nykh apparatov* (Analysis

and choice of rational parameters of pneumatic shock absorber for the landing aircrafts),  
Doctor's thesis, Moscow, MAI, 2000, 145 p.

21. Ponomarev P.A., Skidanov S.N., Timokhin V.A. *Trudy MAI*, 2000, no. 2. URL:  
<http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=34708>

22. Amosov A.A., Dubinskii Yu.A., Kopchenova N.V. *Vychislitel'nye metody dlya inzhenerov* (Numerical methods for engineers), Moscow, Vysshaya shkola, 1994, 544 p.

Статья поступила в редакцию 09.07.2022

Статья после доработки 11.07.2022

Одобрена после рецензирования 18.07.2022

Принята к публикации 25.08.2022

The article was submitted on 09.07.2022; approved after reviewing on 18.07.2022;  
accepted for publication on 25.08.2022