

РАСШИРЕНИЕ ДИАПАЗОНА ПРИМЕНЕНИЯ ПНЕВМОАМОРТИЗАТОРОВ В СИСТЕМАХ МЯГКОЙ ПОСАДКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗРЫВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

П.А. Пономарев, С.Н. Скиданов, В.А. Тимохин

Пневматические амортизаторы применяются в системах мягкой посадки десантируемых объектов. В данной работе рассматривается математическая модель процесса приземления объекта с пневмоамортизаторами и исследуется влияние различных параметров на процесс торможения. Обосновывается применение в конструкции внутренних разрывных элементов, стягивающих начальный объем оболочки, которые повышают энергоемкость амортизатора.

С целью обеспечения безопасного приземления дистанционно-пилотируемых ЛА и различных военных и народно-хозяйственных грузов применяются различные типы систем мягкой посадки. Данные системы амортизируют удар, возникающий при посадке, и обеспечивают устойчивость десантируемого объекта. Эффективность подобных систем в целом в значительной степени определяется работой амортизаторов.

Пневмоамортизатор (ПА) относится к амортизирующим устройствам, которые поглощают кинетическую энергию снижающегося на парашюте объекта с момента соприкосновения с поверхностью земли за счет работы по сжатию газа и последующего истечения его через стравливающий клапан.

Для проведения теоретических расчетов была разработана математическая модель, описывающая процесс торможения приземляющегося объекта на ПА (рассматривалось только вертикальное движение объекта). Поскольку описание процесса приземления объекта на ПА сводится к установлению связи кинематических характеристик объекта с газодинамическими показателями газа, сжатого внутри оболочки, математическая модель должна включать в себя как уравнения механики, так и зависимости, определяющие состояние газа /1/. При разработке математической модели были сделаны следующие допущения: пневмокамеры ПА работают идентично, процесс сжатия газа в оболочке - адиабатический, температура и давление распределены равномерно по всему объему оболочки, растяжение материала оболочки находится в зоне упругих деформаций, приземляющийся объект считается абсолютно твердым телом, приземляющимся на плоскую горизонтальную поверхность.

Система дифференциальных уравнений (выведена аналогично /2/), описывающих движение объекта при приземлении на ПА, имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{dV_y}{dt} = \frac{1}{m}(F - mg) \\ \frac{dp}{dt} = -\left(\frac{G}{\rho W} + \frac{1}{W} \frac{dW}{dt}\right)\rho \\ \frac{dy}{dt} = V_y \end{cases} \quad (1)$$

где m - масса объекта, приходящаяся на один ПА; V_y - вертикальная скорость объекта; G - расход газа; F - сила реакции ПА; W - объем оболочки ПА; p - давление; ρ - плотность газа; γ - показатель адиабаты воздуха; g - ускорение свободного падения.

С момента появления избыточного давления ПА создает силу торможения, которая действует на объект. Сила F , вызванная избыточным давлением внутри оболочки и приложенная нормально к плоскости поверхности приземления, равна

$$F = \Delta p S \quad (2)$$

где S - контактная площадь между оболочкой и поверхностью приземления.

Работа A , которую совершает эта сила по торможению объекта равна

$$A = \int_{h_0}^h F dh \quad (3)$$

где dh - изменение высоты амортизатора; h - высота ПА; индекс 0 обозначает состояние параметра в начальный момент времени.

Поскольку во время процесса торможения существует однозначное соответствие кинематических параметров объекта и газодинамических характеристик ПА, то в общем случае расчет амортизатора сводится к тому, чтобы получить зависимости скорости V и высоты ПА h от времени t /1/.

Для мягкой посадки десантируемого объекта энергоемкость амортизационной системы должна быть равна сумме изменений кинетической и потенциальной энергий, которыми обладает объект

$$\int_{V_0}^V m V dV + \int_{h_0}^h mg dh = \int_{h_0}^h F dh \quad (4)$$

Если процесс, описываемый уравнением (4) разбить на ряд последовательных квазистационарных состояний то для каждого i -го шага будет действовать соотношение

$$\int_{V_{i-1}}^{V_i} mVdV + \int_{h_{i-1}}^{h_i} mgdh = \int_{h_{i-1}}^{h_i} Fdh \quad (5)$$

Откуда, вычисляя интегралы, получаем

$$\frac{mV_{i-1}^2}{2} + mgh_{i-1} = \frac{mV_i^2}{2} + mgh_i + A_i \quad (6)$$

где A_i - работа одной оболочки ПА на i -ом шаге

$$A_i = \frac{F_{i-1} + F_i}{2} \Delta h \quad (7)$$

Из (6) можно определить скорость V на i -ом шаге

$$V_i = \sqrt{V_{i-1}^2 + 2g\Delta h - 2A_i / m} \quad (8)$$

Если считать, что средняя скорость на i -ом шаге равна

$$V_{i \text{ ср}} = \frac{V_{i-1} + V_i}{2} = \frac{\Delta h_i}{\Delta t_i} \quad (9)$$

то время за которое ПА обожметса на h_i равно

$$\Delta t_i = \frac{2\Delta h_i}{V_{i-1} + V_i} \quad (10)$$

Действительный мгновенный секундный расход газа G_i из оболочки ПА (в момент времени t_i) определяется по формуле /3/

$$G_i = \mu\psi_i f_i \sqrt{\frac{p_i}{\nu_i}} \quad (11)$$

где μ - коэффициент расхода отверстия; f_i - сечение отверстия в момент t_i ; p_i - давление внутри оболочки в момент t_i ; ν_i - удельный объем истекающего газа в оболочке в момент t_i ; ψ_i - коэффициент, который зависит от природы газа и располагаемого отношения давлений p_a/p_i (p_a - атмосферное давление)

$$\psi_i = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \left[\left(\frac{p_a}{p_i} \right)^{\frac{2}{\gamma}} - \left(\frac{p_a}{p_i} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma}} \right]} \quad (12)$$

Для расчета площади проходного сечения клапана в каждый момент времени t_i будем использовать формулу

$$f_i = \frac{2W_{i-1}^{\frac{1-\gamma}{2}}}{\mu(\gamma-1)\nu_i\sqrt{RT_i}} \left[\left(\frac{p_{i-1}}{p_i} \right)^{\frac{\gamma-1}{2\gamma}} \left(\frac{W_{i-1}}{W_i} \right)^{\frac{\gamma-1}{2}} - 1 \right] \frac{W_i^{\frac{\gamma+1}{2}}}{\Delta t_i}, \quad (13)$$

где R - газовая постоянная для воздуха, T_i - температура газа.

Растяжение материала будет учитываться системой (1) в неявном виде: в уменьшение объема оболочки W за счет обжатия будет вноситься поправка на каждом шаге вычисления.

Изменения перегрузки n и избыточного давления p (параметров, характеризующих процесс торможения) по времени, рассчитанные по предложенной математической модели, показали хорошую сходимость с экспериментальными данными (см. рис. 1).

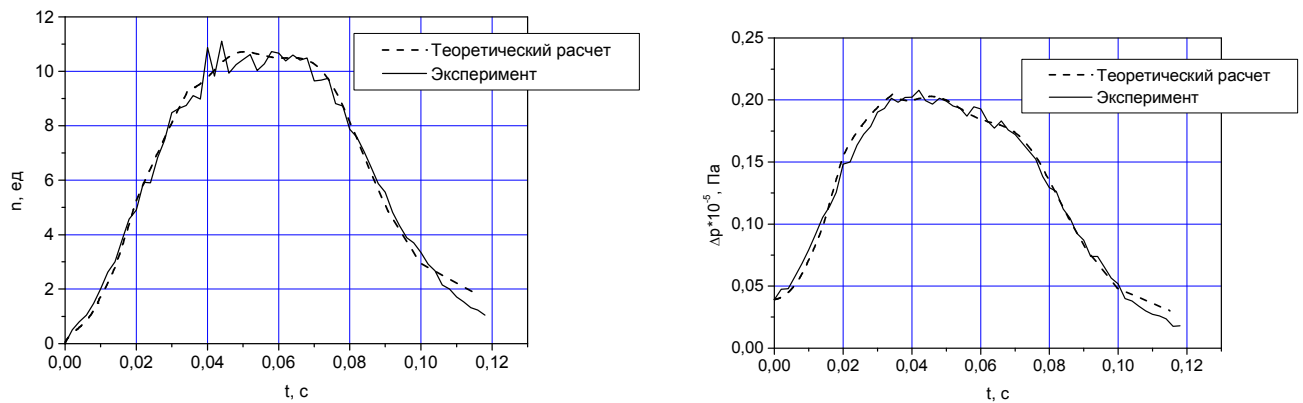


Рис. 1. Сравнение теоретических и экспериментальных данных.

Обычно величина энергетической отдачи ПА A_{na} определяется следующим образом /4/

$$A_{na} = \Delta p W \eta \eta_{об}, \quad (14)$$

где η - коэффициент полноты диаграммы обжатия ПА;

$\eta_{об}$ - коэффициент использования объема оболочки.

Из (14) видно, что увеличение энергетической отдачи требует увеличения избыточного давления и объема амортизатора. И та, и другая величины ограничены довольно узкими пределами. Поэтому для улучшения энергетических характеристик ПА было решено использовать другой подход.

Конечной целью повышения энергетической отдачи ПА является возможность применения амортизатора с исходным начальным значением объема оболочки W_0 для больших значений V_0 и m (при заданном значении p_0). Влияние этих параметров на процесс торможения для ПА, имеющего цилиндрическую форму поперечного сечения центральной части, представлено на рис. 2 и 3.

Из графиков видно, что при увеличении как V_0 , так и m , при одном и том же избыточном давлении $p_{ок}$, соответствующем открытию клапанов, вырастает конечная скорость торможения V_k . Если же увеличивать $p_{ок}$, то в первом случае вырастают и предельные перегрузки. Для большей массы можно подобрать рациональное значение $p_{ок}$ (предельные перегрузки при этом не увеличиваются), но это можно делать до определенного значения, величина которого определяется из условия прочности оболочки.

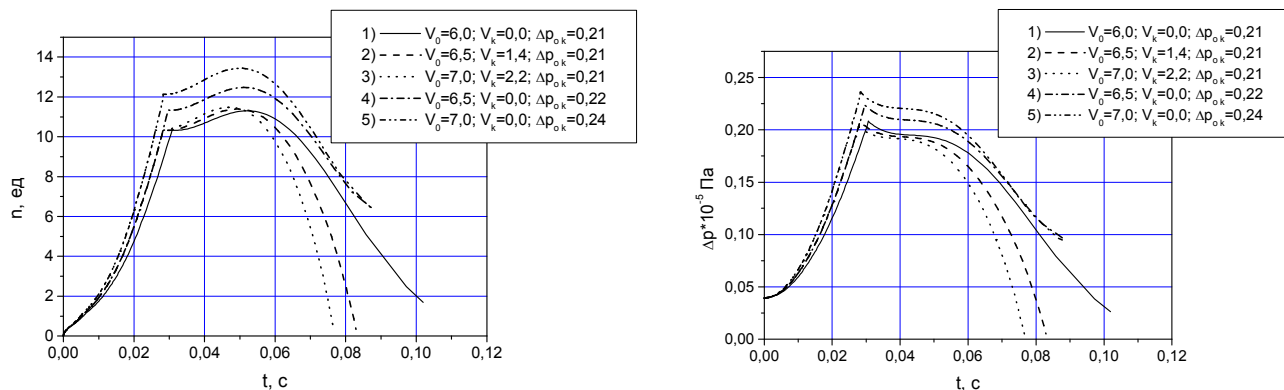


Рис. 2. Влияние начальной скорости V_0 и $p_{ок}$ на процесс торможения

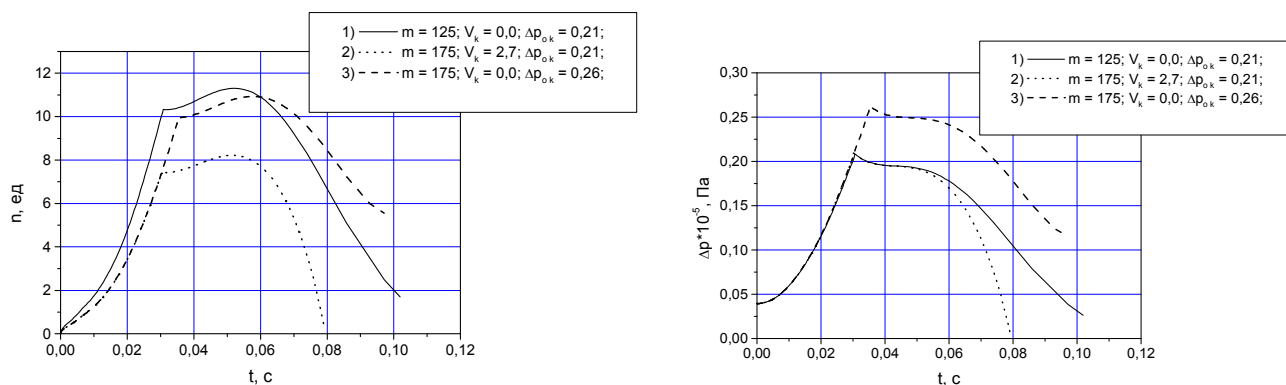


Рис. 3. Влияние массы m и $p_{ок}$ на процесс торможения

Как правило ограничиваются и предельная перегрузка, и конечная скорость (поскольку перегрузки, вызванные ударом о грунт, могут превысить допустимое значение).

Таким образом, чтобы расширить область применения данного ПА (обеспечить требуемые характеристики приземления, не увеличивая начальный объем оболочки и используя прежний материал, при больших значениях V_0 и m) необходимо в какой-то определенный момент времени замедлить нарастание избыточного давления (или даже обеспечить его падение) в оболочке при ее обжатии в процессе торможения. Это позволит позже выйти на максимальную перегрузку, тем самым увеличить промежуток времени, на котором процесс торможения осуществляется без травления газа из ПА, а чем дольше торможение осуществляется без истечения газа, тем большую энергию способен поглотить амортизатор.

Для этого надо каким-либо образом начать увеличивать объем оболочки, компенсируя этим ее обжатие. Реально это можно сделать путем постепенного разрыва каких-нибудь элементов, скрепляющих боковые стенки оболочки в начальный период обжатия, освобождая таким образом дополнительный объем внутри ПА.

В данной конструкции амортизатора для этих целей используются стяжки. В начальный момент времени они притягивают к центру цилиндрическую оболочку центральной части ПА и, тем самым, уменьшают начальный объем ПА. После достижения определенной величины избыточного давления отгарированный связывающий элемент разрывается и стяжка раскрывается, что приводит к постепенному увеличению текущего объема. Это, в свою очередь, вызывает замедление нарастания давления внутри оболочки.

При использовании стяжек в первую очередь необходимо рассмотреть влияние на процесс торможения следующих параметров: p_{pc} - избыточное давление, при котором начинают раскрываться стяжки; t_{pc} - время раскрытия стяжек.

Поскольку и раскрытие стяжек и открытие клапанов осуществляется под воздействием избыточного давления, то становится очевидным, что $p_{pc} < p_{ок}$ (давление открытия стяжек должно быть меньше давления открытия клапанов).

Выбор рационального давления раскрытия стяжек определяется необходимостью практически реализовать раскрытие стяжек до момента срабатывания клапанов. Эта последовательность реализуется различной прочностью отгарированных элементов (в нашем случае - ниток), которые удерживают стяжки и клапаны в исходном положении. При расчете приведенных на рис. 4 зависимостей эти параметры равнялись экспериментальным значениям и не являлись оптимальными.

Время раскрытия стяжек теоретически выбирается из условия повышения эффективности ПА (на графике зависимости $n = n(h)$ не должно быть “провала”).

На рис. 4 (графики 1) отображены зависимости n и p при значениях $p_{ок}$, p_{pc} и t_{pc} равных экспериментальным значениям.

Существует возможность повысить эффективность ПА, увеличив p_{pc} и уменьшив t_{pc} . Графики 2 соответствуют рациональному давлению p_{pc} и недостаточно большому t_{pc} - на графиках присутствует характерный для этого случая “провал” значений n и p .

Чтобы не допустить этого необходимо найти рациональное время t_{pc} . Графики 3 отображают процесс торможения при выбранных параметрах, обеспечивающих максимальный коэффициент полноты диаграммы для данных начальных условий. Аналогично p_{pc} и t_{pc} выбираются для других исходных данных.

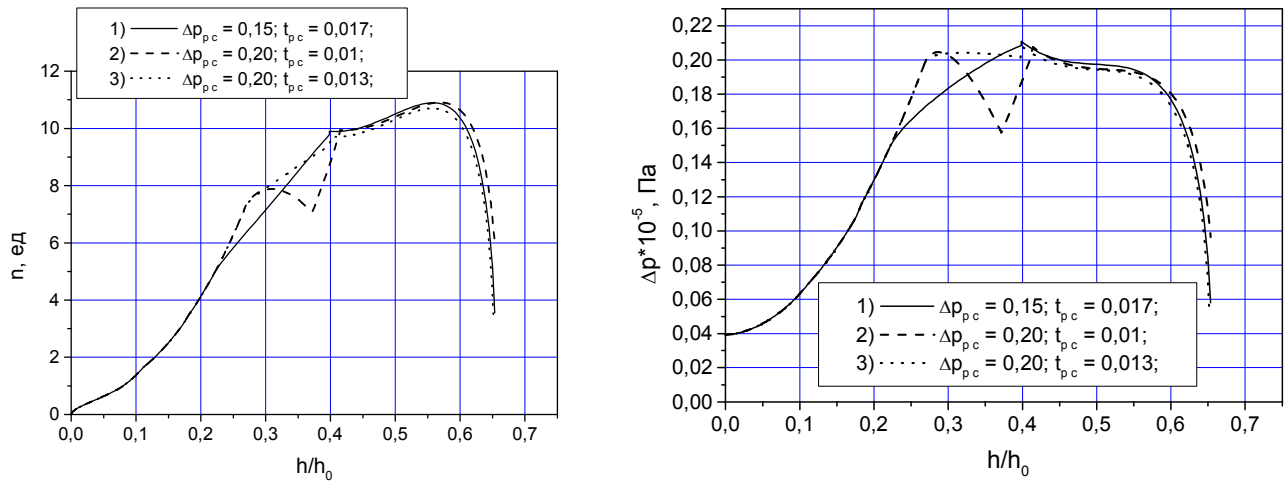


Рис. 4. Влияние параметров раскрытия стяжек на процесс торможения

Для выполнения требований, предъявляемых к процессу торможения, необходимо, чтобы конструкция амортизатора отвечала следующим условиям.

1. Должна быть обеспечена необходимая прочность материала оболочки, то есть в каждый момент времени обжатия должно выполняться неравенство

$$p_i < p_{пред} = [N] / R_{max}, \quad (15)$$

где p_i - текущее избыточное давление в оболочке; $p_{пред}$ - предельно допустимое избыточное давление; R_{max} - максимальный текущий радиус оболочки; $[N]$ - предельно допустимые усилия в материале оболочки с учетом коэффициента запаса прочности.

2. Известно [4], что идеальная система амортизации должна замедлять движение объекта следующим образом: на первом этапе замедление должно возрастать с максимально допустимой скоростью max ; на втором этапе, достигнув заданной максимальной перегрузки n_{max} , замедление должно оставаться постоянным. Поэтому на первом этапе текущая перегрузка n_i не должна превышать величину $n_{пред}$, рассчитанную по максимальной скорости нарастания перегрузки max

$$n_i \leq n_{пред} = max \cdot t_i, \quad (16)$$

где t_i - текущий интервал времени; а на втором этапе должно выполняться условие: $n_i \leq n_{max}$.

3. Конечная вертикальная скорость объекта (скорость после завершения процесса торможения) V_k должна равняться нулю, то есть энергоемкость ПА должна позволять рассеять кинетическую и потенциальную энергию той части массы приземляющегося объекта, которая приходится на данный амортизатор, в процессе обжатия его оболочки. Данные ограничения и определяют диапазон применения ПА.

Расчеты, выполненные с помощью разработанной математической модели наглядно доказывают, что применение элементов, стягивающих начальный свободный объем оболочки, повышает энергоемкость амортизатора и, тем самым, расширяет диапазон применения.

При проведении сравнительного анализа использовались абсолютно аналогичные амортизаторы при идентичных случаях нагружения. Отличие состояло в том, что в первом случае у ПА отсутствовали стяжки.

Диаграмма (см. рис. 5) показывает предельные возможности таких амортизаторов. По ней можно определить максимально допустимую начальную скорость торможения V_0 , при которой объект с массой m затормозится до конечной скорости $V_k = 0$, текущие значения перегрузки и избыточного давления при этом будут ниже предельно допустимых. В проведенном расчете процесса торможения принималось, что максимальная перегрузка n_{max} не должна превышать 10 единиц.

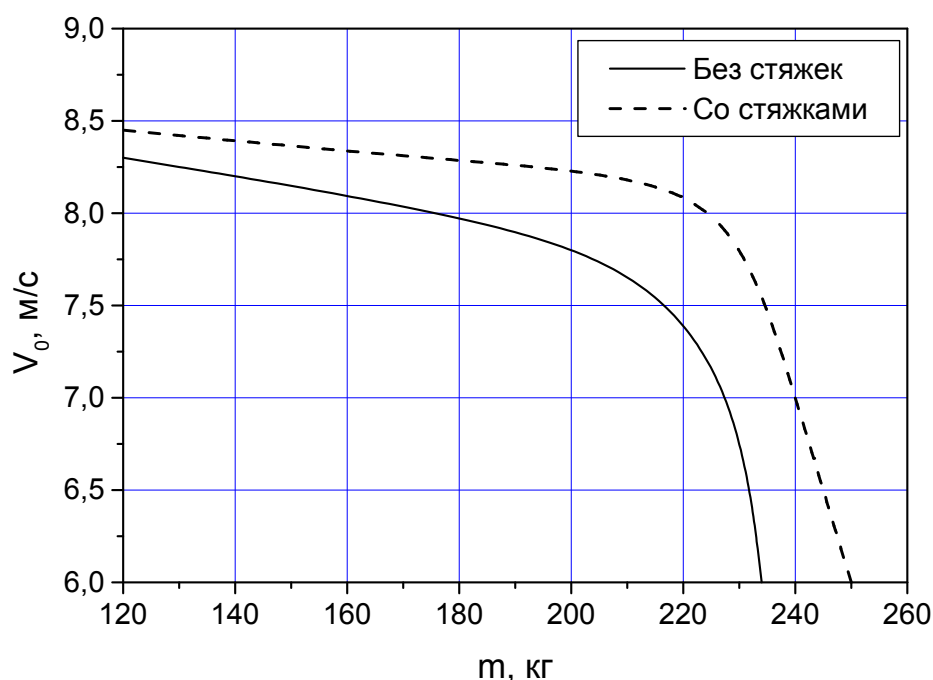


Рис. 5. Диапазон применения ПА с использованием стяжек и без них.

Исследования проводились следующим образом. Первоначально, исходя из возможного диапазона (начиная с 6 м/с), выбиралась начальная скорость торможения V_0 . Затем, соблюдая ограничение по перегрузке, определялась максимально возможная масса m , при которой выполнялись: условие прочности (15), неравенство (16) и равенство $V_k = 0$.

Проведенные расчеты показали, что для варианта без стяжек при скоростях 6 м/с и 7 м/с фактором, ограничивающим диапазон применения ПА, является прочность оболочки. При скорости около 8 м/с масса груза выбиралась так, чтобы конечная скорость не превышала нулевое значение, а при скоростях более 8,3 м/с снижение массы приводит к тому, что на начальном этапе перегрузка превышает предельно допустимое значение. Практически это означает, что скорость

незначительно превышающая 8,3 м/с является предельно допустимой для рассмотренного ранее амортизатора.

Из диаграммы видно, что применение стяжек в рассматриваемой конструкции амортизатора, позволяет увеличивать массу груза, приходящуюся на один ПА, (в зависимости от начальной скорости торможения) на 10...70 кг (5...50% первоначальной массы), при тех же параметрах процесса торможения. Таким образом, можно сделать вывод, что применение стяжек повышает энергоемкость ПА и расширяет диапазон его применения.

Эксперименты, проведенные на копровой установке кафедры 103 МАИ, подтвердили теоретические предположения.

Литература

1. Павлов А.С., Тимохин В.А. Учебное пособие к лабораторным работам “Конструкция и проектирование систем спасения”. - М.: МАИ, 1985. - 62 с.

2. Комаров С.С., Мискактин Н.И. Упругая характеристика конической оболочки пневмоамортизатора. // Экспериментальные и теоретические исследования систем механического оборудования: Тем. сб. науч. тр. - М.: МАИ, 1992. - С. 22-28.

3. Техническая термодинамика / Под ред. В.И. Крутова. - М.: Высшая школа, 1971. - 472 с.

4. Емельянов Ю.Н., Павлов А.С., Титов В.А. Проектирование систем мягкой посадки приземляющегося объекта. - М.: МАИ, 1988. - 62 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Пономарев Павел Ардалионович, аспирант кафедры систем оборудования летательных аппаратов Московского государственного авиационного института (технического университета).

Скиданов Сергей Николаевич, доцент кафедры систем оборудования летательных аппаратов Московского государственного авиационного института (технического университета), к.т.н.

Тимохин Владимир Алексеевич, доцент кафедры систем оборудования летательных аппаратов Московского государственного авиационного института (технического университета).