

УДК 629.734.7

П.И. Иванов¹, М.В. Ситайло², Р.П. Иванов³¹ Херсонский национальный технический университет, Феодосийский факультет² Государственный научно-испытательный центр Вооруженных сил Украины, Феодосия³ Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков

МЕТОДЫ УМЕНЬШЕНИЯ МИНИМАЛЬНО БЕЗОПАСНОЙ ВЫСОТЫ ПРИМЕНЕНИЯ (ДЕСАНТИРОВАНИЯ) ПАРАШЮТНЫХ СИСТЕМ

Задача уменьшения минимально безопасной высоты десантирования сегодня является одной из важнейших задач и одним из приоритетных направлений в области парашютостроения. В статье приведен анализ процесса десантирования системы груз-парашют. Выделены этапы, требующие минимизации времени их реализации. Приведены примеры практических методов уменьшения потери высоты на некоторых этапах. Построена математическая модель процесса торможения системы. Используя результаты моделирования, можно уточнить существующие общепринятые экспериментальные данные при подготовке к десантированию, что может существенно расширить диапазон возможностей применения парашютной системы по минимально безопасной высоте десантирования.

Ключевые слова: парашют, минимально безопасная высота, десантирование.

Введение

Необходимость минимизации высоты десантирования обусловлена целым рядом причин. Это, например, необходимость обеспечения скрытной от радаров противника доставки десанта и техники, необходимость экстренной доставки в заданную точку поверхности грузов и людей (с минимально возможным временем снижения и рассеиванием по площади приземления), необходимость обеспечения минимально возможного времени и пути наполнения парашюта при бейс-джампинге (от англ. B.A.S.E.—акроним от слов: Building (здание), Antenna (антенна), Span (мост), Earth (земля), jump - прыгать) и ряд других случаев [1 – 3].

В целом, высоту десантирования можно разбить на следующие основные этапы.

1. Этап свободного падения – от момента отделения от носителя и до момента введения парашюта в действие. Задачей этого этапа обычно является снижение скорости движения системы парашютист-парашют (груз-парашют) до величины, ниже критической скорости наполнения парашюта, или предельного по прочности парашюта скоростного напора, или ниже величины предельного значения перегрузки, действующей на парашютиста.

2. Этап вытягивания парашютной системы (ПС) – с момента введения парашюта в действие и до момента вытягивания купола и строп парашюта на полную длину.

3. Этап наполнения – с момента вытягивания купола и строп парашюта на полную длину и до момента, когда купол парашюта в первый раз примет свою полностью наполненную геометрическую форму.

4. Этап переходного режима снижения – от момента полного наполнения купола парашюта и до момента, когда скорость снижения системы станет примерно равной скорости установившегося снижения на данной высоте.

5. Этап установившегося снижения – от момента выхода в режим установившегося снижения на данной высоте и до момента посадки.

Высота применения (десантирования) системы определяется суммой высот всех пяти перечисленных выше этапов.

Если стоит задача минимизации высоты применения (десантирования) парашютной системы, то этапы 1 и 5 из высоты десантирования, как правило, стараются исключить. Таким образом, при рассмотрении минимально безопасной высоты десантирования целесообразно рассматривать только этапы 2-4.

Результаты исследований

Под минимально безопасной высотой применения (десантирования) H_{\min} понимается минимально возможная геометрическая высота, обеспечивающая безопасное приземление объекта с заданной степенью надежности. Таким образом, высота H_{\min} предполагает минимизацию длительности и протяженности каждого из этапов 2-4.

Рассмотрим детально этапы 2-4 с целью оценки возможной минимизации их длительности и протяженности.

Второй этап – этап вытягивания парашютной системы.

Существуют две основные схемы вытягивания парашюта – ударная и безударная [1]. Возможны также и комбинации этих схем. Задача здесь состоит

в том, чтобы выбрать такие технологии укладки и монтажа ПС, которые позволили бы минимизировать по времени и протяженности второй этап. Это могут быть специфические схемы и компоновки относительного расположения купола и строп ПС, различные схемы крепления их при условии обеспечения высокого уровня надежности функционирования системы на этапе вытягивания и т.д.

Потеря высоты h_2 и время вытягивания t_2 на втором этапе может быть приближенно оценена расчетным путем с учетом длины полностью вытянутой парашютной системы и скорости в момент начала вытягивания, либо по результатам экспериментальных данных.

Третий этап – этап наполнения парашюта.

Рассмотрим третий этап – этап наполнения парашюта в процессе вертикального движения парашютиста, имеющего полетную массу m и скорость в момент начала наполнения парашюта V_0 на высоте h_0 . Тогда, очевидно, можно записать два равенства – законы сохранения энергии и количества движения:

$$\frac{mV_0^2}{2} - \frac{mV_h^2}{2} = - \int_{h_0}^{h_H} Q(h)dh \quad (1)$$

и

$$mV_0 - mV_h = - \int_0^{t_h} Q(t)dt \quad (2)$$

Здесь: V_h – скорость в момент полного наполнения парашюта; h_H – высота в момент полного наполнения парашюта; t – время текущее; $Q(h)$, $Q(t)$ – сила сопротивления парашюта; t_h – время в момент полного наполнения парашюта.

Знак минус в правой части равенств (1) и (2) говорит о том, что сила сопротивления действует против направления скорости движения системы.

Из закона сохранения энергии следует, что разность кинетических энергий в начале и конце наполнения тем больше, чем больше величина интеграла, стоящего в правой части равенства (1), представляющего собой работу по торможению системы, совершаемую силой сопротивления $Q(h)$ в процессе наполнения парашюта.

Таким образом, с одной стороны, чем больше сила сопротивления парашюта в процессе его наполнения (т.е. чем больше площадь под кривой $Q(h)$), тем больше величина интеграла и тем больше разность кинетических энергий в начале и в конце наполнения, а значит, меньше скорость системы в конце – в момент полного наполнения парашюта, что является весьма желательным. Отметим, что площадь под кривой определяется ее «полнотой» и амплитудой (максимальным значением), т.е. жела-

тельно, чтобы она была как можно больше и имела как можно больше участков с отрицательной величиной ее второй производной (и с большой скоростью нарастания ее во времени).

Однако, с другой стороны, чем больше величина $Q(h)$ и скорость ее нарастания, тем больше и перегрузка, действующая на парашютиста в направлении таз-голова, что является весьма нежелательным (отметим, что увеличить предел переносимости по перегрузке можно, расположив парашютиста так, чтобы перегрузка действовала в направлении живот-спина).

Таким образом, приходим к выводу, что здесь нужно искать разумный компромисс между скоростью нарастания и амплитудой перегрузки, действующей на парашютиста, исходя из переносимости ее человеком. Это непосредственно следует из закона сохранения количества движения (2), где в правой части стоит величина интегрального импульса, действующего на парашютиста в процессе наполнения парашюта.

Ясно, что интеграл, стоящий в правой части равенства (1), будет являться функцией верхнего предела h_H – значения высоты в момент полного наполнения парашюта.

Очевидно, что потеря высоты при наполнении парашюта Δ_H будет разностью высот: $\Delta_H = h_0 - h_H$. Важно, чтобы потеря высоты при наполнении парашюта была как можно меньше, т.е., значение h_H как можно ближе было бы к значению h_0 .

Однако, с другой стороны, чем ближе h_H к значению h_0 , тем меньше величина интеграла, стоящего в правой части равенства (1), что является весьма нежелательным, поскольку скорость в конце наполнения в таком случае будет еще довольно значительной величиной.

Очевидно, что здесь нужно искать компромисс между величиной потери высоты, которая должна быть как можно меньше, например, при низковысотном десантировании, и величиной нагрузки (перегрузки) и скорости ее нарастания, действующих на парашютиста при наполнении парашюта, которые не должны превышать предельно допустимых для человека значений.

Скорость нарастания и величина нагрузки (перегрузки), действующие на парашютиста при наполнении парашюта (т.е. форма кривой $Q(t)$), зависят от скоростного напора в момент начала наполнения, а также от конструкции самого парашюта.

Известно, что парашюты с большой величиной проницаемости и парашюты больших площадей имеют достаточно пологую часть кривой нарастания перегрузки, в то время как малопроницаемые и па-

рашюты с центральной стропой имеют весьма крутую часть кривой нарастания перегрузки. Таким образом, резерв дальнейшего уменьшения минимально безопасной высоты применения на этапе наполнения заключается в поиске оптимальной конструкции ПС, обеспечивающей минимизацию времени и протяженности этого этапа.

Например, для бейс-прыжков используются специальные парашюты-крыло, заметно отличающиеся от обычных [2]:

- усиление одной третьей части верхнего основания (от передней кромки) тканью нулевой проницаемости (ZP – Zero Porosity);

- в ранец укладывается только основной парашют;

- свободные концы основного парашюта через КЗУ (кольцевое замковое устройство) крепятся к ранцу (запасного парашюта нет);

- основной парашют укладывается без камеры для ускорения процесса раскрытия;

- вместо обычного слайдера используется сетчатый, также для ускорения процесса раскрытия.

Часто бейс-прыжки связаны с минимальным временем свободного падения, раскрытием купола на минимальной высоте.

Времени на борьбу с отказом парашюта в таких условиях нет, поэтому запасной парашют не используется, зато основной укладывается как запасной весьма тщательно [2].

Потеря высоты на третьем этапе может быть приближенно оценена по формуле $h_3 = c\sqrt{F_{\Pi}}$, а время вытягивания t_3 может быть приближенно оценено расчетным путем с учетом скорости в момент начала наполнения, либо по результатам экспериментальных данных. Здесь c – эмпирический коэффициент, зависящий от проницаемости ткани купола.

Четвертый этап – этап переходного режима снижения.

Подробно рассмотрим четвертый этап – этап переходного режима снижения системы парашютист-парашют. Очевидно, что скорость системы парашютист-парашют в момент полного наполнения парашюта v_H будет еще значительно выше скорости установившегося снижения v_{CH} , обеспечивающей безопасную (мягкую) посадку. Таким образом, необходимо еще определенное время Δt (после полного наполнения парашюта) для того, чтобы скорость системы в переходном процессе стала равной посадочной.

Для осесимметричных куполов парашютов обычно принимается $\Delta t = 2$ с. Этого времени в большинстве случаев оказывается достаточно для того, чтобы система полностью вышла на установившийся режим.

Запишем уравнение движения системы в переходном режиме снижения (после момента полного наполнения купола парашюта):

$$mg - Q(t) = m \frac{dv}{dt}. \quad (3)$$

Здесь $Q(t) = c_{\Pi} F_{\Pi} \frac{\rho v^2}{2}$ – сила сопротивления полностью наполненного парашюта в переходном режиме; v – скорость текущая; c_{Π} – коэффициент сопротивления парашюта; F_{Π} – площадь купола парашюта; ρ – плотность воздуха на высоте наполнения парашюта; g – ускорение свободного падения.

Уравнение (3) является обыкновенным дифференциальным уравнением первого порядка с разделяющимися переменными.

Разделяя переменные и интегрируя, получим:

$$\frac{1}{A} \int \frac{dv}{v_{CH}^2 - v^2} = \int dt + C_1,$$

откуда

$$\frac{1}{2v_{CH}} \ln \left| \frac{v_{CH} + v}{v_{CH} - v} \right| = At + AC_1,$$

$$\ln \left| \frac{v_{CH} + v}{v_{CH} - v} \right| = 2v_{CH} At + 2v_{CH} AC_1,$$

$$\ln \left| \frac{v_{CH} + v}{v_{CH} - v} \right| = 2v_{CH} At + \ln C,$$

$$\ln \frac{1}{C} \left| \frac{v_{CH} + v}{v_{CH} - v} \right| = 2v_{CH} At.$$

Откуда потенцируя, получим:

$$e^{2v_{CH} At} = \frac{1}{C} \left| \frac{v_{CH} + v}{v_{CH} - v} \right|.$$

Из условия:

$$t = 0, \quad v = v_H,$$

получим выражение для константы:

$$C = \left(\frac{v_{CH} + v_H}{v_{CH} - v_H} \right).$$

Отсюда теперь легко получить закон изменения скорости системы в переходном режиме:

$$v(t) = v_{CH} \frac{\left[\left(\frac{v_{CH} + v_H}{v_{CH} - v_H} \right) e^{2v_{CH} At} - 1 \right]}{\left[\left(\frac{v_{CH} + v_H}{v_{CH} - v_H} \right) e^{2v_{CH} At} + 1 \right]}. \quad (4)$$

В приведенных выше вычислениях:

$v_{CH} = \sqrt{\frac{2mg}{\rho c_{\Pi} F_{\Pi}}}$ – скорость системы в установившемся режиме снижения;

$A = \frac{\rho c_{\Pi} F_{\Pi}}{2m}$ – баллистический коэффициент.

На рис. 1 представлена динамика изменения скорости движения системы парашютист-парашют $v(t)$ при следующих исходных данных:

$$\begin{aligned} c_{\Pi} &= 0,8, F_{\Pi} = 60 \text{ м}^2, \\ \rho &= 1,2 \text{ кг/м}^3, g = 9,81 \text{ м/с}^2, \\ m &= 60 \text{ кг}, v_{\text{н}} = 20 \text{ м/с}, \\ A &= 0,48 \text{ м}^{-1}, v_{\text{сн}} = 4,521 \text{ м/с}. \end{aligned}$$

Горизонтальной пунктирной чертой здесь также представлена асимптота кривой

$$v(t) = v_{\text{сн}} = 4,521 \text{ м/с}.$$

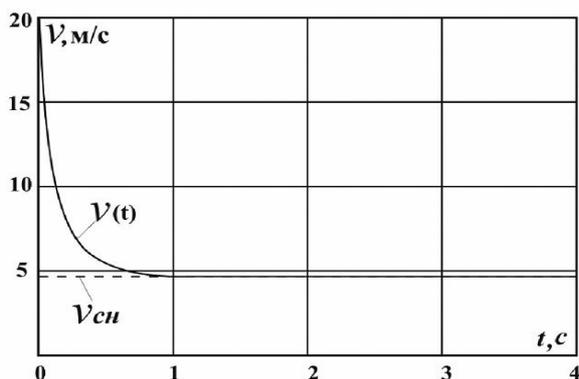


Рис. 1. Зависимость скорости движения системы парашютист-парашют от времени на четвертом этапе

Анализ рис. 1 показывает, что контакт кривой $v(t)$ со своей горизонтальной асимптотой (скоростью установившегося снижения) происходит практически при $t_4 = 1,2 \text{ с}$, что явно меньше, чем 2 с, принятые в руководствах по испытаниям парашютной техники.

На рис. 2 для сравнения представлены кривые изменения скорости движения системы парашютист-парашют $v(t)$ для двух различных масс парашютистов $m_1 = 60 \text{ кг}$ и $m_2 = 100 \text{ кг}$ при следующих исходных данных:

$$\begin{aligned} c_{\Pi} &= 0,8, F_{\Pi} = 60 \text{ м}^2, \rho = 1,2 \text{ кг/м}^3, \\ g &= 9,81 \text{ м/с}^2, v_{\text{н}} = 20 \text{ м/с}. \end{aligned}$$

Горизонтальными пунктирными линиями здесь также представлены асимптоты кривых

$$v(t) = v_{\text{сн}} = 4,521 \text{ м/с}$$

(для полетной массы $m_1 = 60 \text{ кг}$) и

$$v(t) = v_{\text{сн}} = 5,836 \text{ м/с}$$

(для полетной массы $m_2 = 100 \text{ кг}$).

Сравнительный анализ динамики кривых показывает, что с увеличением полетной массы, характер их изменения становится менее крутым и контакт кривой $v(t)$ со своей горизонтальной асимптотой

(скоростью установившегося снижения) происходит практически при $t_4 = 1,3 \text{ с}$, т.е. с увеличением массы время четвертого этапа незначительно возрастает. Представляет практический интерес сравнительный анализ динамики изменения кривых $v(t)$ при изменении характеристики парашюта $c_{\Pi}F_{\Pi}$.

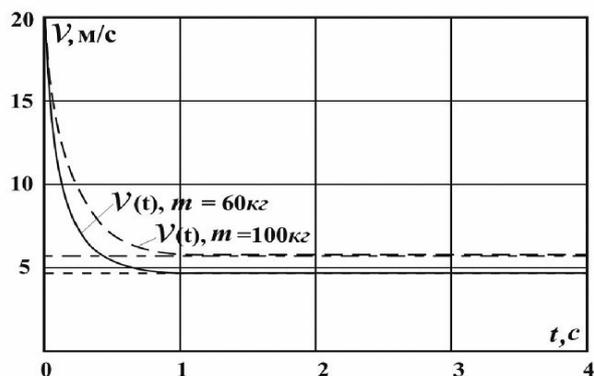


Рис. 2. Зависимости скорости движения системы парашютист-парашют от времени на четвертом этапе

На рис. 3 для сравнения представлены кривые изменения скорости движения $v(t)$ системы парашютист-парашют для двух различных значений характеристики парашюта $c_{\Pi}F_{\Pi} - 30 \text{ м}^2$ и 60 м^2 для полетной массы $m = 60 \text{ кг}$, при тех же значениях остальных параметров, что и в предыдущих рассмотренных случаях:

$$\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3, g = 9,81 \text{ м/с}^2, v_{\text{н}} = 20 \text{ м/с}.$$

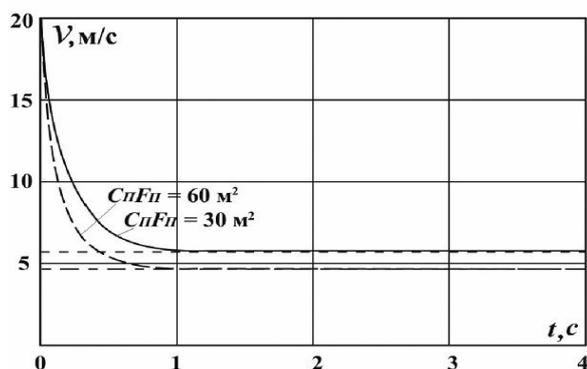


Рис. 3. Зависимости скорости движения системы парашютист-парашют от времени на четвертом этапе

Для характеристики $c_{\Pi}F_{\Pi} = 30 \text{ м}^2$ скорость установившегося снижения $v_{\text{сн}} = 5,718 \text{ м/с}$, а время точки контакта кривой $v(t)$ со своей горизонтальной асимптотой равно: $t_4 = 1,5 \text{ с}$.

Для характеристики $c_{\Pi}F_{\Pi} = 60 \text{ м}^2$ скорость установившегося снижения $v_{\text{сн}} = 4,044 \text{ м/с}$, а вре-

мя точки контакта кривой $v(t)$ со своей горизонтальной асимптотой практически равно $t_4 = 1,1$ с.

Т.е., с увеличением значения характеристики $c_{\Pi}F_{\Pi}$ скорость снижения уменьшается, уменьшается и длительность четвертого этапа, чего и следовало ожидать.

Сравнительный анализ динамики кривых показывает, что при постоянной полетной массе, с уменьшением характеристики $c_{\Pi}F_{\Pi}$ характер изменения кривых $v(t)$ становится менее крутым и контакт кривой $v(t)$ со своей горизонтальной асимптотой (скоростью установившегося снижения) происходит практически при $t_4 = 1,5$ с, т.е. время четвертого этапа незначительно возрастает.

Потеря высоты на четвертом этапе может быть получена путем интегрирования уравнения кривой (4) по времени в пределах от 0 до t_4 :

$$h_4 = \int_0^{t_4} v(t) dt. \quad (5)$$

На рис. 4 для сравнения представлены кривые изменения высоты на четвертом этапе для двух различных полетных масс

$$m_1 = 60 \text{ кг} \text{ и } m_2 = 100 \text{ кг}$$

при одинаковых всех остальных значениях характеристик:

$$c_{\Pi} = 0,8, \quad F_{\Pi} = 60 \text{ м}^2,$$

$$\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3, \quad g = 9,81 \text{ м/с}^2, \quad v_H = 20 \text{ м/с}.$$

Верхняя кривая соответствует большей полетной массе.

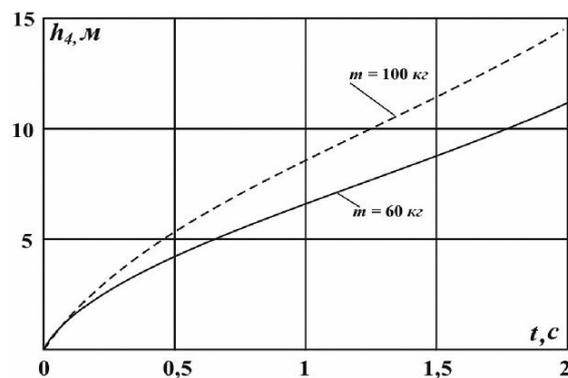


Рис. 4. Зависимости изменения высоты системы парашютист-парашют от времени на четвертом этапе

Из графиков видно, что существенное увеличение массы парашютиста (от 60 до 100 кг) не приводит к значительной разнице в потере высоты ко второй секунде: 14 м против 11 м.

По формуле (5) может быть оценена потеря высоты на четвертом этапе, а время движения на этом

этапе может быть предварительно определено по точке практического выхода скорости снижения (4) системы на свою горизонтальную асимптоту.

Получим аналитическое выражение для изменения высоты во времени.

Интегрируем выражение (4) по времени:

$$h(t) = \int v(t) dt = \int v_{\text{ch}} \left[\frac{C e^{2v_{\text{ch}}At} - 1}{C e^{2v_{\text{ch}}At} + 1} \right] dt,$$

где $C = \left(\frac{v_{\text{ch}} + v_H}{v_{\text{ch}} - v_H} \right)$, $A = \frac{\rho c_{\Pi} F_{\Pi}}{2m}$.

Выполняя замену $z = e^{2v_{\text{ch}}At}$, получим

$$dt = \frac{dz}{2v_{\text{ch}}Az}$$

и

$$h(t) = v_{\text{ch}} \int \frac{[Cz - 1]}{[Cz + 1]} \frac{dz}{2v_{\text{ch}}Az} = \frac{1}{2A} \left(2C \int \frac{dz}{Cz + 1} - \int \frac{dz}{z} \right).$$

Интегрируя выражения, стоящие в скобках, получим:

$$h(t) = v_{\text{ch}} \int \frac{[Cz - 1]}{[Cz + 1]} \frac{dz}{2z} = \frac{1}{2A} \ln \left(\frac{C e^{2v_{\text{ch}}At} + 1}{e^{v_{\text{ch}}At}} \right)^2 \cdot C_0,$$

где C_0 – произвольная постоянная, которую найдем из начальных условий:

$$t = 0, \quad h(t) = 0.$$

Тогда

$$C_0 = \frac{1}{(C + 1)^2}.$$

И, окончательно получим формулу для изменения высоты во времени на четвертом этапе:

$$h(t) = \frac{1}{2A} \ln \left(\frac{C e^{2v_{\text{ch}}At} + 1}{e^{v_{\text{ch}}At}} \right)^2 \cdot \frac{1}{(C + 1)^2}. \quad (5,а)$$

Если h_H – геометрическая высота положения объекта над уровнем посадочной поверхности в момент полного наполнения парашюта, то изменение высоты объекта во времени над поверхностью посадки найдем по формуле:

$$h_4(t) = h_H - h(t). \quad (5,б)$$

На рис. 5 представлены зависимости для изменения высоты во времени на четвертом этапе $h(t)$ (возрастающая кривая) и изменение высоты объекта во времени над поверхностью посадки $h_4(t)$ (убывающая кривая) при заданном значении геометрической высоты положения объекта над уровнем посадочной поверхности в момент полного наполнения $h_H = 20$ м, рассчитанные по формулам (5а) и (5б) соответственно.

Полученные по математической модели (3) точные аналитические зависимости (4), (5,а) и (5,б) могут быть эффективно использованы при уточнении действующих методик определения минимально безопасной высоты применения парашюта.

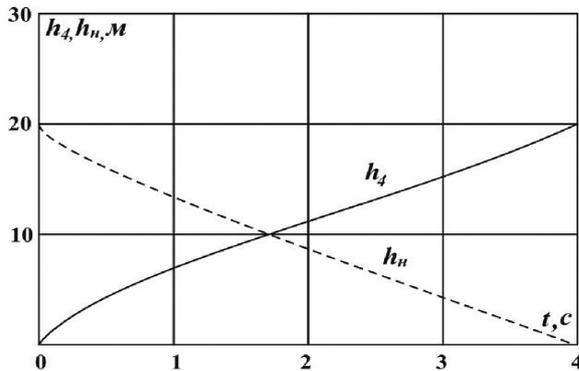


Рис. 5. Зависимости изменения и потери высоты системы парашютист-парашют от времени на четвертом этапе

Окончательно минимально безопасную высоту применения парашюта можно определить как сумму потерь высот на всех трех этапах – со второго по четвертый включительно:

$$H_{\min} = h_2 + h_3 + h_4.$$

Отсюда становится ясным, что для минимизации минимально безопасной высоты применения парашюта, необходимо стремиться к максимально возможному снижению высот каждого из трех ее этапов: второго, третьего и четвертого.

Выводы

1. Построена математическая модель и получены точные аналитические зависимости для скорости и пути системы объект–парашют на четвертом этапе процесса наполнения, которые могут быть эффективно использованы при уточнении действующих методик определения минимально безопасной высоты применения парашюта.

2. В задачах уменьшения минимально безопасной высоты применения H_{\min} необходимо стремиться к максимально возможному снижению высот каждого из трех этапов: второго, третьего и четвертого.

Список литературы

1. Иванов П.И. Летные испытания парашютных систем : монография / П.И. Иванов. – Феодосия : ДНВЦ, 2001ю – 332 с. – ISBN 966-7832-09-0.
2. Псурцев П.А. Прыжки с парашютом [Электронный ресурс] / П.А. Псурцев. – 136 с. – Режим доступа к книге : www.parashut.com.
3. Ситайло М.В. Анализ особенностей двухоболочковых людских планирующих парашютных систем [Электронный ресурс] / М.В. Ситайло. Режим доступа к книге : pariplaner.ucoz.ru.

Поступила в редколлегию 8.11.2013

Рецензент: канд. техн. наук проф. В.В. Кириченко, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

МЕТОДИ ЗМЕНШЕННЯ МІНІМАЛЬНО БЕЗПЕЧНОЇ ВИСОТИ ЗАСТОСУВАННЯ (ДЕСАНТУВАННЯ) ПАРАШУТНИХ СИСТЕМ

П.І. Іванов, М.В. Сітайло, Р.П. Іванов

Завдання зменшення мінімально безпечної висоти десантування сьогодні є однією з найважливіших завдань і одним з пріоритетних напрямів у сфері парашутобудування. У статті наведено аналіз процесу десантування системи вантаж-парашют. Виділено етапи, що вимагають мінімізації часу їх реалізації. Наведені приклади практичних методів зменшення втрати висоти на деяких етапах. Побудовано математичну модель процесу гальмування системи. Використовуючи результати моделювання, можна уточнити існуючі загальноприйняті експериментальні дані при підготовці до десантування, що може істотно розширити діапазон можливостей застосування парашютної системи за мінімально безпечної висоти десантування.

Ключові слова: парашют, мінімально безпечна висота, десантування.

METHODS OF REDUCTION OF THE MINIMUM SAFE ALTITUDE OF AIR RELEASE OF PARACHUTE SYSTEMS

P.I. Ivanov, M.V. Sitailo, R.P. Ivanov

The task of reduction of the minimum safe altitude of air release is now one of the most important tasks, and one of the priorities in the field of parachute-building. There is an analysis of the process of cargo-parachute system air release in the article. The stages that require time minimizing were pointed out. The examples of practical methods of reduction of height loss of on some stages were made. A mathematical model of the braking system was built. Using the modeling results, it became possible to specify existing conventional experimental data in preparation to airdropping, that can significantly extend the range of possible applications of parachute system at the lowest safe altitude of air dropping.

Keywords: parachute, minimum safe altitude, airdropping.