

ОПТИМИЗАЦИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КРЫЛЬЕВ КОСТЮМА WING-SUIT

Корнилович А. В., Кузьмичев В. Е.

ФГБОУ ВПО Ивановская государственная текстильная академия, Иваново, Россия, (153000, Иваново, пр.Шереметевский, 21), e-mail: ankorn-kshi@mail.ru

Рассматривается форма конструкции крыла, находящегося в напряженном состоянии во время полета спортсмена-парашютиста в костюме wing-suit. Конструкция крыла состоит из нескольких периодически повторяющихся элементов. В качестве геометрической модели базового элемента (сегмента) этой структуры принята цилиндрическая поверхность с поперечным сечением, контур которого представляет собой дугу, стянутую хордой. Применительно к выбранной геометрической модели из общих законов механики ткани выведена базовая система дифференциальных уравнений, связывающая между собой величину натяжения ткани, форму поперечного сечения оболочки крыла и скорость полета спортсмена в костюме wing-suit. Разработаны методы решения полученной системы уравнений. Показана зависимость площади поперечного сечения крыла от поперечных размеров сегментов и их количества. Доказано, что с увеличением количества сегментов площадь поперечного сечения крыла уменьшается. Теоретически выявлено оптимальное количество сегментов крыла, обеспечивающее минимальное аэродинамическое сопротивление костюма wing-suit.

Ключевые слова: оптимизация, костюм wing-suit, геометрическая модель, сегмент крыла, аэродинамическое сопротивление, натяжение ткани.

OPTIMIZATION OF AERODYNAMIC CHARACTERISTICS OF THE WING-SUIT

Kornilovich A. V., Kuzmichev V. E.

Ivanovo State Textile Academy, Ivanovo, Russia (153000, Ivanovo, Prospect Sheremetevsky, 21), e-mail: ankorn-kshi@mail.ru

The form of a wing structure under the definite air pressure during the flight of an athlete jumper wing of the wing-suit has been considered. The wing construction consists of a number of similar elements. The cylindrical surface with a cross-section resembling the are pulled in a chord was chosen as a geometric base element model of each wing segment. From the general laws of fabric mechanics applied to the selected geometrical model we worked out the basic system of differential equations. The above mentioned system links the amount of fabric tension, the shape of cross-section of a wing membrane and the athlete airspeed. The dependence of the cross-section area of the wing upon the dimensions of its segments and their number was shown. It was proved that the cross-section area of the wing decreased, if the number of segments was reduced. As a result, the optimal number of the wing segments securing minimal wind resistance of the wing-suit has been theoretically identified.

Keywords: optimization, wing-suit, a geometric model, a segment of the wing, the aerodynamic resistance, tension fabric.

Введение

Проблема выпуска отечественной конкурентоспособной одежды для парашютных видов спорта в условиях возможного приобретения зарубежных аналогов приобретает особую остроту. В настоящее время задача проектирования таких видов одежды с заданными аэродинамическими параметрами остается нерешенной.

Костюм wing-suit относится к одежде для парашютных видов спорта и к парашютному снаряжению, которое может быть использовано в качестве летательного средства для продления фазы полета спортсмена в свободном падении. Wing-suit должен обладать не только определенными эстетическими и эргономическими характеристиками, как и любой вид спортивной одежды, но и необходимыми в экстремальных условиях эксплуатации

аэродинамическими свойствами для обеспечения надежности, безопасности и длительности полета.

Конструктивной особенностью костюма является наличие дополнительных деталей – крыльев, расположенных между рукавами и станом куртки и между передними и задними частями брюк. На передних частях рукава куртки и передних частях брюк имеются специальные отверстия – воздухозаборники для наполнения костюма воздухом с образованием давления, необходимого для создания подъемной силы и продления фазы полета спортсмена [1].

Математическое моделирование формы конструкции крыла, находящегося в напряженном состоянии во время фазы полета в экстремальных условиях эксплуатации, как основного несущего элемента костюма, могло бы позволить осуществить проектирование его аэродинамической формы и обеспечить получение прогнозируемых (конструктивно-технологических и эксплуатационных) показателей.

Цель исследования

Оптимизация аэродинамических характеристик крыльев wing-suit для улучшения функциональных возможностей костюма при эксплуатации и повышения его безопасности за счет увеличения резерва аэродинамических свойств.

Материал и методы исследования

В качестве объекта исследования выбрано крыло костюма wing-suit с сегментами.

Теоретические исследования были проведены с использованием методов математического моделирования (методов механики ткани и аэродинамики).

Результаты исследования и их обсуждение

На основании изучения особенностей эксплуатации моделей-аналогов «Prodigy-1» и «Prodigy-2» производителя «Phoenix-fly» (Хорватия) [7] были установлены основные недостатки, снижающие надежность и безопасность костюмов: при высокой скорости снижения спортсменов в костюме имеет небольшую дальность полета (качество полета 1/2 – 1/1,5) и недостаточную устойчивость в фазе парения. Предлагается устранить имеющиеся недоработки за счет совершенствования конструкции крыла.

В крыле костюма wing-suit (рис.1) был выделен сегмент 1, расположенный между параллельными элементами поперечного сечения крыла (нервюрами) 2, соединяющими верхнюю 3 и нижнюю 4 детали, и рассмотрены условия его пространственного равновесия.

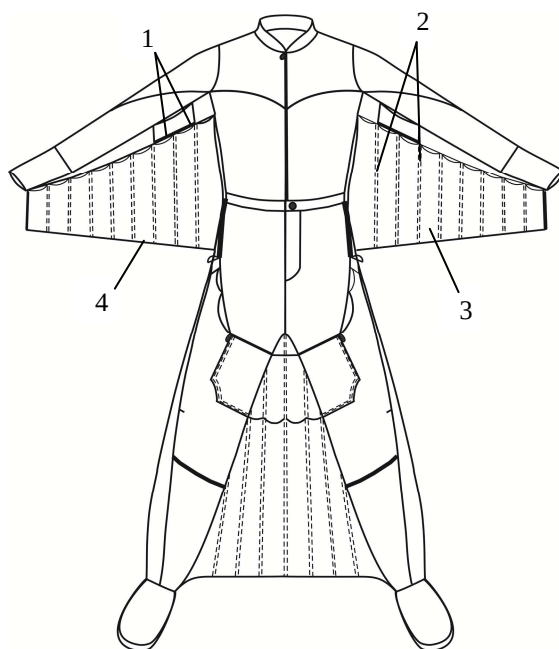


Рис.1. Технический рисунок костюма wing-suit, вид спереди

Были приняты следующие допущения:

- оболочка из воздухонепроницаемой ткани закреплена по прямым параллельным линиям Oz и AB (рис.2), соответствующим нервюрам 2 на рис.1;
- внутри оболочки поддерживается давление воздуха p , благодаря которому она приобретает максимально выпуклую форму;
- в каждом вертикальном сечении оболочки перпендикулярно оси Oz её форма будет постоянной.

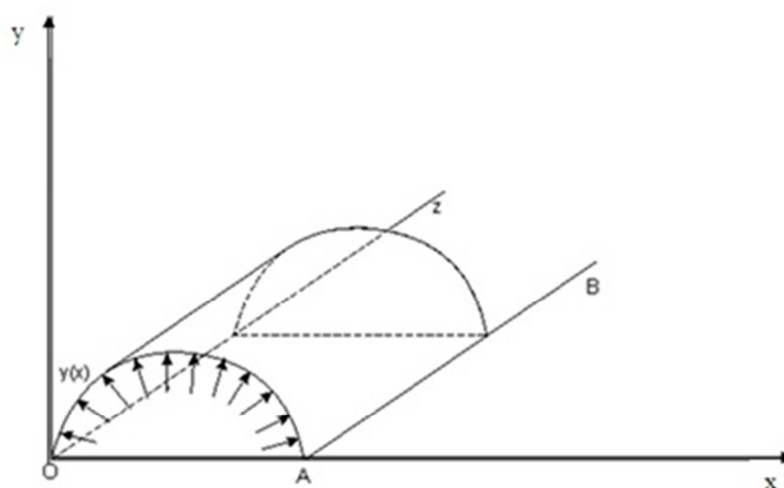


Рис. 2. Схема оболочки сегмента контура крыла, закреплённой по оси Oz и прямой AB

Было предположено, что задача об описании геометрии тканевой оболочки может быть сведена к определению параметров плоской кривой. Для решения этой задачи применялись методы механики ткани [3,4].

Согласно [3,4] уравнение, описывающее напряженное состояние контура сегмента, преобразуем к скалярному виду [3]:

$$\frac{d}{ds} \left(T \frac{dx}{ds} \right) + p_x = 0; \quad (1)$$

$$\frac{d}{ds} \left(T \frac{dy}{ds} \right) + p_y = 0, \quad (2)$$

где $\vec{p} = (p_x, p_y)$ – вектор, по величине равный давлению воздуха в оболочке и направленный в каждой точке линии контура оболочки по нормали;

T – сила натяжения ткани, приходящаяся на единицу длины сегмента;

s – длина дуги.

Так как в реальных условиях $(y')^2 \ll 1$, то приближенным решением системы дифференциальных уравнений является следующее уравнение параболы (рис.2):

$$y'' = -\frac{p}{c},$$

$$(3) \quad \text{где } p = \frac{\rho_a v^2}{2}, \rho_a - \text{плотность воздуха; } v - \text{скорость полета;}$$

c – постоянная.

Так как парабола пересекает начало координат, то ее уравнение удобнее записать в виде

$$y = ax(x - \tau), \quad (4)$$

где a, τ – постоянные.

$$\text{Отсюда: } y' = 2ax - a\tau; \quad y'' = 2a.$$

Так как $a = -p/(2c)$, то y' можно представить в виде следующей функции от x :

$$y' = 2 \left(-\frac{p}{2c} \right) x - \left(-\frac{p}{2c} \right) \tau = -\frac{px}{c} + \frac{p\tau}{2c} = kx + b,$$

$$\text{где } k = -\frac{p}{c}; \quad b = \frac{p\tau}{2c}.$$

Обозначим через L длину дуги. Согласно [6] величина L вычисляется по формуле:

$$L = \int_0^\tau \sqrt{1 + (y')^2} dx.$$

(5)

С учетом линейной функции $y'(x)$ находим, что

$$\sqrt{1 + (y')^2} \cong 1 + 0,5(y')^2 = 1 + 0,5(kx + b)^2. \quad (6)$$

Следовательно, из (5) получаем, что длину дуги L можно выразить следующей формулой:

$$L = \int_0^\tau [1 + 0,5(kx + b)^2] dx. \quad (7)$$

Обозначим $\varepsilon(x) = kx + b$. Из этой формулы следует, что при $x=0$ значение функции $\varepsilon(0) = b$, а при $x = \tau$ значение функции $\varepsilon(\tau) = k\tau + b$. Так как $dx = d\varepsilon/k$, то

$$L = \frac{1}{k} \int_b^{k\tau+b} [1 + 0,5\varepsilon^2] d\varepsilon = \frac{1}{k} \left[\varepsilon \left|_b^{k\tau+b} + \frac{1}{2 \cdot 3} \varepsilon^3 \right|_b^{k\tau+b} \right] =$$

$$= \tau + \frac{1}{6}(k^2\tau^3 + 3k\tau^2b + 3\tau b^2).$$

(8)

Подставим k и b в формулу для L :

$$L = \tau + \frac{1}{6}\left(\frac{p^2\tau^3}{c^2} - \frac{3p\tau^2p\tau}{c2c} + \frac{3\tau p^2\tau^2}{4c^2}\right) = \tau + \frac{p^2\tau^3}{24c^2}. \quad (9)$$

Преобразуя (9), получаем:

$$L - \tau = \frac{p^2\tau^3}{24c^2}. \quad (10)$$

Из выражения (10) получаем, что

$$c^2 = \frac{p^2\tau^3}{24(L-\tau)} \quad \text{или} \quad c = \frac{p\tau}{2} \sqrt{\frac{\tau}{6(L-\tau)}}.$$

Подставим выражение для c в формулу для a :

$$a = -\frac{2p}{2p\tau\sqrt{\frac{\tau}{6(L-\tau)}}} = -\frac{\sqrt{6(L-\tau)}}{\tau\sqrt{\tau}}. \quad (11)$$

Высота сегмента h определяется подстановкой $x = 0,5\tau$ в формулу (4). Следовательно, $h = y(0,5\tau)$. Отсюда имеем:

$$h = a \cdot \frac{\tau}{2}\left(\frac{\tau}{2} - \tau\right) = \left(-\frac{p}{2c}\right)\frac{\tau}{2}\left(-\frac{\tau}{2}\right) = \frac{p\tau^2}{8c}. \quad (12)$$

Подставляем c в формулу (12):

$$h = \frac{p\tau^2 \cdot 2}{8 \cdot p\tau} \sqrt{6(L-\tau)} = \frac{\sqrt{6\tau(L-\tau)}}{4}. \quad (13)$$

Из (13) определим L . Так как $4h = \sqrt{6\tau(L-\tau)}$, то $8h^2 = 3\tau L - 3\tau^2$. Таким образом, длина дуги L определяется:

$$L = \frac{8h^2 + 3\tau^2}{3\tau}. \quad (14)$$

Выразим a через τ и h :

$$a = -\frac{\sqrt{6\left(\frac{8h^2 + 3\tau^2}{3\tau} - \tau\right)}}{\tau\sqrt{\tau}} = -\frac{\sqrt{2 \cdot (8h^2)}}{\tau^2} = -\frac{4h}{\tau^2}. \quad (15)$$

Подставляем a в формулу (4) и получаем $y = -\frac{4hx}{\tau^2}(x - \tau) = \frac{4hx}{\tau^2}(\tau - x)$, отсюда

$$y = Ax(\tau - x),$$

где $A = \frac{4h}{\tau^2}$.

Обозначим через σ площадь фигуры под кривой $y(x)$. Величина σ вычисляется следующим интегрированием по формуле:

$$\begin{aligned} \sigma &= \int_0^\tau y(x)dx = A \int_0^\tau x(\tau - x)dx = A \left[\int_0^\tau \tau x dx - \int_0^\tau x^2 dx \right] = A \left[\tau \frac{x^2}{2} \Big|_0^\tau - \frac{1}{3} x^3 \Big|_0^\tau \right] = \\ &= \frac{2}{3} h\tau. \end{aligned} \quad (16)$$

Таким образом, площадь σ пропорциональна произведению высоты сегмента на его

ширину. Обозначим размах крыла через L_k , а количество сегментов – n . Следовательно,

$$\tau = \frac{L_k}{n}. \quad (17)$$

Площадь i -того поперечного сечения будет находиться по формуле:

$$\sigma_i = \frac{2}{3} h \frac{L_k}{n}, \quad (18)$$

а суммарная площадь поперечных сечений сегментов будет равна

$$S = \sum_i^n \sigma_i = n \frac{2}{3} h \frac{L_k}{n} = \frac{2}{3} h L_k. \quad (19)$$

Полученные выражения показывают, что площадь S не зависит от количества сегментов n , а зависит от их высоты h .

Очевидно, что наибольшее значение производная $y'(x)$ имеет в точках $x = 0$ и $x = \tau$. Так как $y'(x) = (A\tau - 2Ax)$, то $y'(0) = A\tau$.

Обозначим $y'(0)$ через β_1 . Так как $A\tau = \beta_1$, то $A\tau = \frac{4h}{\tau^2} \tau = \frac{4h}{\tau} = \beta_1$.

Таким образом, из этого соотношения вытекает: $h = 0,25\beta_1\tau = \beta_2\tau$, где $\beta_2 = 0,25\beta_1$.

Следовательно, площадь поперечного сечения крыла определяется по формуле:

$$S = \frac{2}{3} \beta_2 \tau L_k \quad (20)$$

Так как $\tau = \frac{L_k}{n}$, то формула (20) принимает следующий вид:

$$S = \beta_3 n \tau^2 = \beta_2 \frac{L_k^2}{n}, \quad (21)$$

где $\beta_3 = \frac{2}{3} \beta_2$.

Следовательно, с увеличением количества сегментов площадь поперечного сечения крыла уменьшается, что ведет к уменьшению коэффициента аэродинамического сопротивления костюма wing-suit [2].

Результаты теоретических исследований формы крыла были подтверждены экспериментальным путем с использованием оригинальной авторской установки (рис.3) и применены для совершенствования костюма wing-suit (рис.4). Техническая новизна полученных результатов подтверждена патентом РФ на полезную модель «Костюм для парашютных видов спорта» №110609 [5].

Выводы

С целью оптимизации аэродинамических характеристик крыльев wing-suit проведено математическое моделирование напряженного состояния сегмента крыла костюма для парашютных видов спорта. Доказано, что с увеличением количества сегментов в крыле коэффициент аэродинамического сопротивления костюма уменьшается, что приводит к улучшению функциональных возможностей костюма при эксплуатации и повышению его безопасности. На основе математического моделирования и экспериментальных данных

установлено, что оптимальная конструкция крыла костюма для парашютных видов спорта состоит из 8-ми сегментов.

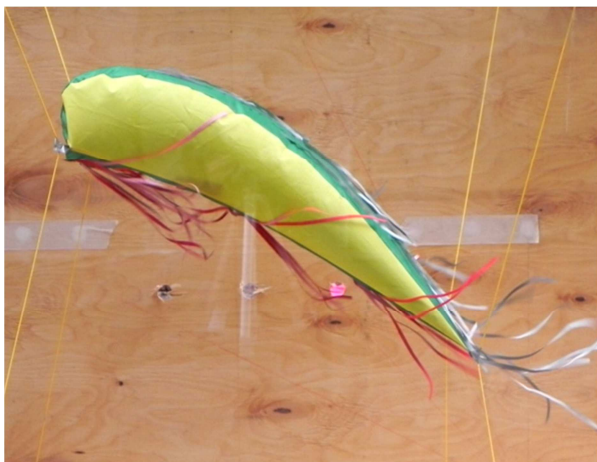


Рис. 3. Эксперимент в оригинальной авторской установке, имитирующей аэродинамические воздушные потоки



Рис. 4. Крыло костюма в готовом виде

Список литературы

1. Корнилович А. В. Применение процессного подхода при проектировании одежды для экстремальных видов спорта / А. В. Корнилович, Л. Ю. Киприна // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2010. – № 5 (326). – С.75-77.
2. Краснов Н. Ф. Аэродинамика. Ч. 1. Основы теории. Аэродинамика профиля и крыла: Учеб.для втузов / Н. Ф. Краснов. – М.: Высшая школа, 1976. – 250 с.
3. Меркин Д. Р. Введение в механику гибкой нити / Д. Р. Меркин. – М.: Наука, 1980. – 240 с.
4. Мигушов И. И. Механика текстильной нити и ткани / И. И. Мигушов. – М.: Легкая индустрия, 1980. – 160 с.
5. Патент РФ на полезную модель №110609, 27.11.2011. Оверчук И. С., Корнилович А. В., Кузьмичев В. Е. Костюм для парашютных видов спорта//2011131586;. Заявл.27.07.2011.
6. Сизый С. В. Лекции по дифференциальной геометрии. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 376 с.
- 7.Официальный сайт компании «Phoenix-fly» (Хорватия). – URL: <http://www.phoenix-fly.com/products/wingsuits/phoenix-fly-prodigy-2.html> (дата обращения 10.07.2011).

Рецензенты:

Корнилова Надежда Львовна, доктор технических наук, доцент по кафедре технологии швейных изделий, проректор по научной работе ФГБОУ ВПО «Ивановская государственная текстильная академия», г. Иваново.

Никифорова Елена Николаевна, доктор технических наук, профессор по кафедре начертательной геометрии и черчения, проректор по учебной работе ФГБОУ ВПО «Ивановская государственная текстильная академия», г. Иваново.