

УДК 687.016:658.011.56

ГИБРИДНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КАК ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ КРЫЛА КОСТЮМА WINGSUIT

Корнилович А.В.

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный политехнический университет», Текстильный институт, Иваново, e-mail: ankorn-kshi@mail.ru

Рассматривается гибридное моделирование в качестве технологии, составляющей неотъемлемую часть процесса проектирования костюмов wingsuit. Предложена методика расчета геометрических характеристик тканевых элементов, составляющих крыло костюма wingsuit. На базе уточненных уравнений, моделирующих напряженное состояние конструкции крыла во время наполнения его полостей воздухом при свободном парении спортсмена, выведена формула для расчета протяженности линии контура сегмента крыла. Расчетные значения использованы для построения имитационной модели крыла костюма wingsuit в программных системах SolidWorks и CosmosFloWorks. Степень турбулизации воздушных потоков при обтекании крыла исследована в натурном эксперименте в аэродинамической трубе. На основании полученных результатов разработан комплекс входной информации, позволяющий оптимизировать конструктивные параметры крыла костюма wingsuit для повышения резерва аэродинамических свойств.

Ключевые слова: гибридное моделирование, оптимизация, костюм wingsuit, конструктивные параметры крыла, Solid Works, Cosmos Flo Works

HIBRID SIMULATION AS A TOOL FOR OPTIMIZATION OF CONSTRUCTIVE CHARACTERISTICS OF THE WING OF A WINGSUIT

Kornilovich A.V.

Ivanovo State Polytechnical University, Textile institute, Ivanovo, e-mail: ankorn-kshi@mail.ru

The article deals with hybrid simulation as the technology making an integral part of wingsuit design process. The method of calculating of geometrical characteristics of the fabric elements which form the wing of a wingsuit is offered. The special formula for calculation the line extent of the wing segment contour was deduced on the basis of the specified equations modeling a tension state of the design of the wing while filling its cavities by air at free soaring of an athlete. Calculated values are used for creation of imitating model of the wing of a wingsuit in the program systems SolidWorks and CosmosFloWorks. Extent of air streams turbulization at a flow of the wing is investigated in natural experiment in a wind tunnel. The input information complex allowing to optimize constructive characteristics of the wing of a wingsuit to increase the reserve of aerodynamic properties was formed on basis of the received results.

Keywords: hibrid simulation, optimization, wingsuit, constructive characteristics of the wing, SolidWorks, CosmosFloWorks

Дальность полета спортсмена в фазе свободного парения без парашюта зависит от многих факторов: от конструкции костюма wingsuit, от степени подготовки спортсмена и его умения пилотировать и от метеоусловий во время полета. Каждый из перечисленных факторов является существенным. Однако, поскольку погодные условия во время полета спортсмена от него не зависят, управляемыми факторами являются конструктивное устройство костюма и техническая подготовка парашютиста.

Особенностью костюма, используемого в экстремальных условиях эксплуатации – в воздушной среде, является наличие трех двухслойных крыльев, наполняемых под давлением через воздухозаборники набегающим потоком (ram-air) и приобретающих особую, необходимую для увеличения подъемной силы, аэродинамическую форму [8].

Не останавливаясь на порядке подготовки спортсмена и правилах его поведения во время свободного полета, определим как важнейшую цель оптимизацию конструк-

тивных параметров крыла костюма wingsuit для повышения резерва его аэродинамических свойств. Поставленная цель может быть достигнута только в результате исследований на стыке дисциплин: аэродинамики, механики ткани и динамики полета.

Развитие компьютерной техники, науки о механике сплошных сред и вычислительной аэродинамики в настоящее время позволяет ограничить круг задач, необходимых для экспериментального исследования, заменяя натурные опыты вычислительными экспериментами. В данной работе были применены современные технологии аэродинамического моделирования, которые включают в себя гибридное моделирование [9], объединяющее методы математического моделирования с экспериментальными методами.

Методика использования гибридного моделирования состояла из следующих основных этапов:

1. Аналитическое моделирование напряженного состояния конструкции сег-

мента контура крыла и его геометрических характеристик [2].

2. Имитационное моделирование крыла костюма wingsuit в программных системах Solid Works и Cosmos Flo Works с использованием расчетных значений геометрических характеристик, полученных на первом этапе [1].

3. Физическое моделирование системы «крыло костюма wingsuit – набегающий поток воздуха» при проведении натурного эксперимента в аэродинамической трубе [3].

4. Верификация математической модели на физической модели.

На первом этапе при исследовании напряженного состояния крыла полагали, что модель ткани, используемая для изготовления костюма wingsuit, обладает нерастяжимостью и идеальной гибкостью, а также воздухопроницаемостью. Кроме этого, пренебрегли силой притяжения, действующей на ткань, то есть при составлении математической модели контура сегмента крыла считали ткань невесомой. Данное положение было обусловлено тем, что сила натяжения ткани, приходящаяся на единицу длины сегмента, значительно превосходит силу притяжения, действующую на ткань.

Были приняты следующие допущения:

- оболочка из ткани закреплена по прямым параллельным линиям Oz и AB (рис. 1), соответствующим нервюрам крыла костюма [2];

- внутри оболочки поддерживается давление воздуха p , благодаря которому она приобретает максимально выпуклую форму;

- в каждом вертикальном сечении оболочки перпендикулярно оси Oz её форма постоянна.

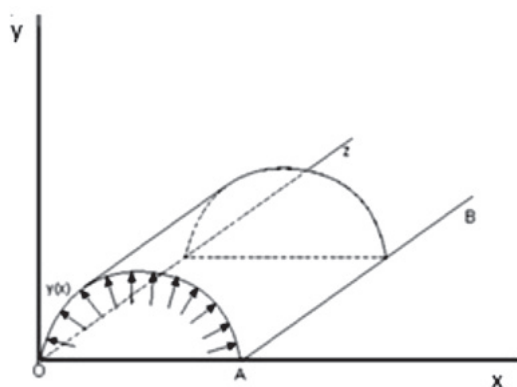


Рис. 1. Схема оболочки сегмента контура крыла, закрепленной по оси Oz и прямой AB

Из последнего допущения следует, что рассматривается плоская задача статического равновесия тканевой поверхности сегмента, как оболочки. Для решения этой

задачи были применены методы механики гибких оболочек.

Известный труд проф. И.И. Мигушова [5] охватывает широкий круг вопросов, связанных с моделированием движения упругой и растяжимой ткани. В этой работе приводятся исследования объектов с учетом таких механических свойств материала, как растяжимость и упругость. С точки зрения применения этих теоретических разработок, в нашем случае они представляются достаточно сложными, так как было принято, что тканевая оболочка сегмента имеет идеальную гибкость и является нерастяжимой. Полагаем, что задача об описании геометрии тканевой оболочки может быть сведена к определению параметров плоской кривой.

Рассматривается нагруженное состояние оболочки на участке вдоль оси Oz, равном единице длины. Вводим координату s по контуру ткани (рис. 2). Пусть точка M имеет координату s . Выделим бесконечно малый элемент ткани MM_1 , его длину обозначим через ds , тогда точка M_1 будет иметь координату $s + ds$.

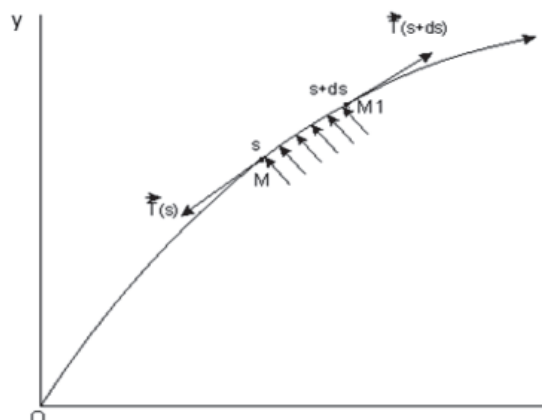


Рис. 2. Состояние равновесия бесконечно малого участка сегмента

Рассмотрим равновесие элемента MM_1 . Обозначим через \vec{T} силу натяжения ткани, действующую на отрезке вдоль оси Oz, равном единице длины. Отметим, что величина T имеет размерность Н/м. На элемент ds действует сила натяжения $\vec{T}(s)$ и $\vec{T}(s + ds)$, а также сила, обусловленная избыточным давлением воздуха внутри сегмента. Уравнение контура ткани, который она приобретает под давлением нагнетаемого под нее воздуха при свободном парении спортсмена, запишется следующим образом [4]:

$$\frac{d\vec{T}}{ds} = \vec{p}, \quad (1)$$

где \vec{P} – вектор, по величине равный давлению воздуха в оболочке и направленный в каждой точке линии контура оболочки по нормали.

Векторное уравнение (1) приведем к скалярному виду [2]:

$$\begin{aligned} \frac{d}{ds} \left(T \frac{dx}{ds} \right) + p_x &= 0; \\ \frac{d}{ds} \left(T \frac{dy}{ds} \right) + p_y &= 0, \end{aligned} \quad (2)$$

где p_x и p_y – проекции вектора на оси Ox и Oy (рис. 1).

Известно, что [7]:

$$ds = \sqrt{1 + y'^2} dx. \quad (3)$$

Поскольку решение системы уравнений (2) в общем виде является сложной задачей, то был разработан метод нахождения приближенного решения этой системы уравнений с учетом того, что в реальных условиях высота оболочки сегмента контура крыла должна быть примерно в два раза меньше ее ширины. В этом случае без какого-либо существенного ущерба для точности расчетов приняли, что величина угла наклона касательной к линии контура оболочки по линиям её крепления вдоль прямых Oz и AB не превосходит 30° . В этом случае выполняется условие $(y')^2 \ll 1$. Тогда система уравнений (2) принимает вид:

$$\begin{aligned} T' [1 - 0,5(y')^2] - Ty'y'' - py' &= 0; \\ y'' T [1 - 1,5(y')^2] + Ty' [1 - 0,5(y')^2] + p &= 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Полученная система обыкновенных дифференциальных уравнений (4) является нелинейной. Для интегрирования этой системы была использована ее особенность, заключающаяся в том, что левая ее часть не зависит явно от x и y . Этот факт позволил в качестве переменной величины выбрать производную y' , а в качестве независимой переменной – y . Обозначив $w = y'$, имеем, что,

$$\begin{aligned} dx &= \frac{dy}{w}; \\ y'' &= \frac{dw}{dx} = w \frac{dw}{dy} = ww', \end{aligned}$$

где w' обозначает производную w по y , а не по x . Следовательно, система уравнений (4) может быть приведена к следующему виду:

$$\begin{aligned} T'(1 - 0,5w^2) - Tw^2w' - pw &= 0; \\ ww'T(1 - 1,5w^2) + T'w(1 - 0,5w^2) + p &= 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Выполняя последовательно преобразования (5), приходим к следующему уравнению:

$$w(1 + 0,5w^2)w'' = -(1 - 2,5w^2)(w')^2, \quad (6)$$

которое без существенной потери точности можно привести к виду

$$ww'' = (3w^2 - 1)(w')^2. \quad (7)$$

Решением (7) является следующее соотношение:

$$\frac{dy}{dx} = \pm \sqrt{\frac{2}{3} \frac{1}{\ln(C_2 \pm 3C_1 y)}}, \quad (8)$$

где C_1 и C_2 – константы.

В (8) знак «+» относится к восходящей ветви линии сегмента контура крыла, знак «-» – к нисходящей.

Величина длины линии сегмента контура крыла L определяется по формуле [7]:

$$L = \int_0^{\tau} \sqrt{1 + (y')^2} dx. \quad (9)$$

С использованием зависимости (9) разработан комплекс входной информации, позволяющий оптимизировать конструктивные параметры крыла костюма wingsuit для повышения резерва его аэродинамических свойств.

На втором этапе гибридного моделирования расчетные значения величины были использованы для построения имитационной модели крыла костюма wingsuit в программных системах Solid Works и Cosmos Flo Works. Численное моделирование показало возможность улучшения аэродинамических характеристик конструкции крыла костюма wingsuit по сравнению с моделями-аналогами [8] за счет увеличения длины пробега воздушной струи над крыльями.

Степень турбулизации воздушных потоков при обтекании усовершенствованной конструкции крыла изучали на третьем этапе с помощью физического моделирования в натурном эксперименте в аэродинамической трубе. Визуальные наблюдения позволили сделать вывод, что турбулизация потока при обтекании крыла новой конструкции заметно снижается за счет улучшенной аэродинамической формы, что обеспечивает увеличение подъемной силы и продление фазы свободного парения спортсмена без парашюта.

Верификация результатов имитационного компьютерного моделирования поведения крыла костюма wingsuit с результатами натурных экспериментов в специально разработанной установке (рис. 3), проведенная на четвертом этапе гибридного мо-

делирования, позволила определить наиболее уязвимые места исследуемого объекта, заменив часть натуральных испытаний расчет-

ными, заранее усилить проблемные зоны и сократить время на весь цикл проектирования костюма wingsuit.

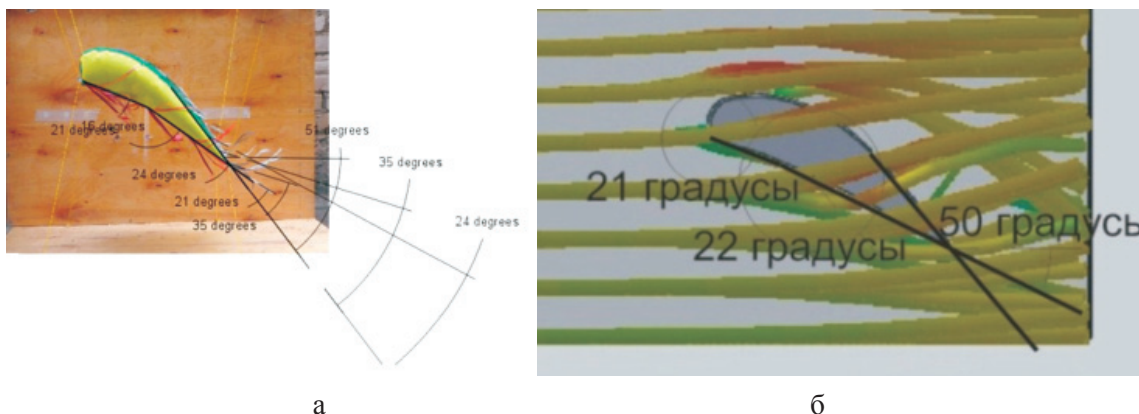


Рис. 3. Верификация результатов натурального эксперимента (а) и имитационного моделирования (б)

Результаты исследования положены в основу оптимизации конструктивных параметров крыла костюма wingsuit и нового способа проектирования чертежей конструкций, учитывающего аргументи-

рованный выбор входных формообразующих параметров крыла, позволяющего разрабатывать различные модели костюма с заданными аэродинамическими характеристиками.



Рис. 4. Модель костюма wingsuit с усовершенствованной конструкцией крыла

Техническая новизна полученных результатов подтверждена патентом РФ на полезную модель «Костюм для парашютных видов спорта» № 110609 [6]. На 41-й Международной выставке изобретений «INVENTIONS GENEVA-2013» (Швейцария) авторская разработка (рис. 4) была отмечена серебряной медалью.

Выводы

Разработанная методика гибридного моделирования системы «крыло костюма wingsuit – набегающий поток воздуха» позволит принимать решения на ранних стадиях проектирования и оптимизировать конструктивные параметры крыльев – основных несущих элементов костюма wingsuit.

Список литературы

1. Алямовский А.А. Инженерные расчеты в SolidWorks Simulations. – М.: ДМК Пресс, 2010. – 464 с.
2. Корнилович А.В., Кузьмичев В.Е. Оптимизация аэродинамических характеристик крыльев костюма wing-suit // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 1; URL: <http://www.science-education.ru/107-8215> (дата обращения: 28.01.2013).
3. Краснов Н.Ф. Аэродинамика. Ч.-1. Основы теории. Аэродинамика профиля и крыла: учеб. для втузов. – М.: Высшая школа, 1976. – 250 с.
4. Меркин Д.Р. Введение в механику гибкой нити. – М.: Наука, 1980. – 240 с.
5. Мигушов И.И. Механика текстильной нити и ткани. – М.: Легкая индустрия, 1980. – 160 с.
6. Патент РФ на полезную модель № 110609, 27.11.2011 / Оверчук И.С., Корнилович А.В., Кузьмичев В.Е. Костюм для парашютных видов спорта // Патент России № 2011131586.2011. Заявл.27.07.2011.
7. Сизый С.В. Лекции по дифференциальной геометрии. – М.: Физматлит, 2007. – 376 с.
8. Официальный сайт компании «Phoenix-fly» (Хорватия). – URL: <http://www.phoenix-fly.com/products/wingsuits/phoenix-fly-prodigy-2.html> (дата обращения 10.07.2011).
9. Quiza, Ramon, Lopez-Armas, Omar, Davim, J.Paulo. Hibrid modeling and optimization of manufacturing. Combining article intelligence and finite element method. Series: «SpringerBriefs in applied sciences and tecnology». 2012, VIII, 95p. 67illus.

References

1. Aljamovskij A.A. Engineering calculations in SolidWorks Simulations. Moscow, DMK Press, 2010, 464 p.
2. Kornilovich A.V. Kuz'michev V.E. Optimization of aerodynamic characteristics of the wing-suit. Modern problems of science and education. 2013. no. 1; available at: <http://www.science-education.ru/107-8215> (accessed 28 January 2013).

3. Krasnov N. F. Aerodynamics. Vol. 1. Fundamentals of the theory. Aerodynamics and wing profile: studies. for technical colleges. Moscow, Higher School, 1976, 250 p.

4. Merkin D.R. An introduction to the mechanics of a flexible string. Moscow, Nauka, 1980, 240 p.

5. Migushov I.I. Mechanic textile yarn and fabrics. Moscow, Light industry, 1980, 160 p.

6. Patent for utility model no. 110609, 27.11.2011 / Overchuk I.S., Kornilovich A.V., Kuz'michev V.E. Suit for parachute Sports, Russian Patent no. 2011131586.2011. Statement 27.07.2011.

7. Sizyj S.V. Lectures on differential geometry. Moscow, FIZMATLIT, 2007, 376 p.

8. «Phoenix-fly» Available at: <http://www.phoenix-fly.com/products/wingsuits/phoenix-fly-prodigy-2.html> (accessed 10 July 2011).

9. Quiza, Ramon, Lopez-Armas, Omar, Davim, J.Paulo. Hibrid modeling and optimization of manufacturing. Combining article intelligence and finite element method. Series: «SpringerBriefs in applied sciences and tecnology». 2012, VIII, 95 pp. 67 illus.

Рецензенты:

Калинин Е.Н., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой системного анализа, ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный политехнический университет», Текстильный институт (Текстильный институт ИВГПУ), г. Иваново;

Никифорова Е.Н., д.т.н., профессор по кафедре начертательной геометрии и черчения, зам. директора по учебной работе, ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный политехнический университет», Текстильный институт (Текстильный институт ИВГПУ), г. Иваново.

Работа поступила в редакцию 01.08.2013.