

УДК 378.146

## **МЕТОДЫ ИНЖЕНЕРНОГО РАСЧЕТА И МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОТЫ ПАРАШЮТОВ**

**А.Л. Бугримов\*, А.Г. Васильченко\*\*, С.В. Леонов\*\***

*\*Московский государственный областной университет (МГОУ)*

*105005, Москва, ул. Радио, д. 10а*

*\*\*НИИ парашютостроения (Москва)*

*107497, Москва, ул. Иркутская, 2*

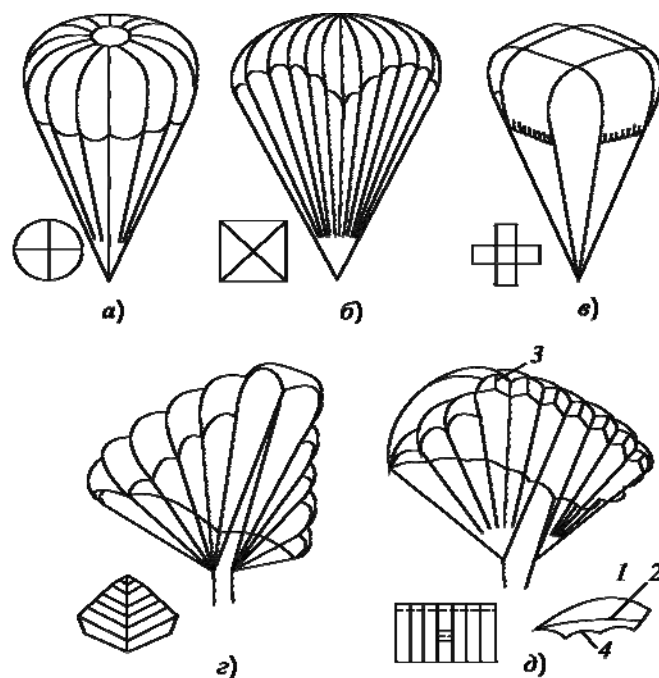
*Аннотация.* Мягкооболочечные конструкции представляют собой активно развивающийся тип технических изделий, которые находят новое широкое применение в инженерной практике. Такие изделия производятся из тканей, ламинатов, лент и шнуров, которые по прочности приблизились к металлам, но существенно легче традиционных конструкционных материалов. Необходимо создание адекватных методов расчета таких конструкций, опережающее математическое моделирование их функционирования в реальных условиях. Значительный опыт инженерного расчета и математического моделирования мягкооболочечных конструкций накоплен в парашютостроении, где такие разработки проводятся с 50-х годов прошлого века. В статье анализируется современное состояние моделирования в парашютостроении и ставится проблема создания нового поколения расчетных методов на основе уравнений Лагранжа второго рода.

*Ключевые слова:* Мягкая оболочка, мягкооболочечная инженерная конструкция, парашют, парафойл, математическое моделирование, уравнение Лагранжа второго рода.

Мягкооболочечные конструкции, изготовленные из тканей и строп, находят все большее применение в инженерной практике. В эластичных резервуарах подушечного типа хранится горючее. Тентовые и воздухоопорные конструкции стали существенной частью современной архитектуры. Суда, где двигателем являются парусные конструкции, переживают второе рождение как экологически чистый вид транспорта. Парашютные конструкции, появившиеся в XX веке, стали значительной составляющей современной армии, авиации и спорта. Практика конструирования мягкооболочечных конструкций показала необходимость опережающего математического моделирования их функционирования, что, по сути, отражает особенность современной инженерии: на смену большого количества исследовательских экспериментов пришло математическое моделирование, и лишь интегральные, практически поверочные, испытания, проводятся на реальном изделии. Отличительной особенностью мягкооболочечных конструкций, которые должны описываться математическими моделями, являются большие перемещения, существенная нелинейность и анизотропия. В ряде мягкооболочечных конструкций (парашюты) существенным является динамика аэроупругого взаимодействия инженерного объекта с потоком воздуха. Это связано с особенностями функционирования парашютов, наполнение и раскрытие которых занимает, как правило, от долей секунды до нескольких секунд, проходит в автоматическом режиме и представляет собой своеобразный удар с перегрузкой  $5\div 10$  и более единиц. Актуальным является увеличение времени наполнения и раскрытия, как с точки зрения уменьшения влияния пе-

регрузок на спасаемый груз, так и для сохранения прочности конструкционных материалов парашюта.

На рисунке приведены основные типы парашютных конструкций с куполами различных форм [1, 7]:



**Основные типы парашютов в раскрытом состоянии в потоке и их раскройная геометрия:**

- a* - осесимметричный парашют; *б* - парашют с куполом квадратной формы; *в* - крестообразный парашют; *г* - однооболочковый парашют-крыло; *д* - двухоболочковый парашют-крыло**

Цифрами обозначены составляющие элементы планирующего парашюта-крыла (парафойла) самого современного типа – двухоболочкового крыла (parafoil на английском языке): 1 – верхняя оболочка, 2 – нижняя оболочка, 3 и 4 – соответственно нервюра и концевая шайба крыла.

Традиционным для решения аэроупругих задач в парашютостроении является метод установления. Непрерывный процесс взаимодействия парашюта с потоком воздуха аппроксимируется последовательностью квазистатических форм, в каждой из которых внутренние силы в оболочке уравниваются аэродинамическими силами. Когда в процессе решения ряд последовательных квазистатических форм становится мало отличающимися одна от другой, считается, что достигнута статическая равновесная форма или положение равновесия (в дальнейшем равновесная форма описывается топологическими методами и раскраивается на тканевые детали). Наряду с вычислительными достоинствами такого подхода выявлены системные недостатки, главным из которых является отсутствие учета инерционных сил в квазистатических моделях, что необходимо при расчете динамической прочности конструкции. «Одна из центральных задач

парашютостроения – раскрытие (наполнение) – в теоретическом плане в полном объеме по-прежнему остается нерешенной» [2, 35; 3, 25]. Именно поэтому задачи раскрытия парашютов (а значит и задачи разворачивания других мягкооболочечных конструкций) до сих пор решаются и в российских, и в иностранных парашютных фирмах полуэмпирическими методами. Это показывает анализ расчетных методов, применяющихся в инженерной практике парашютостроения как в России [4, 371], так и США [5, 5-42]. Другие динамические задачи парашютостроения, в частности колебательные режимы, воздействие на мягкооболочечную конструкцию подвижного порыва и взрыва, также представляют значительные сложности в традиционной постановке.

Последовательный временной анализ расчетных методов парашютостроения, применявшихся во второй половине XX века и содержащийся в ряде отечественных монографий [6, 1, 7, 8, 4], являющихся настольными книгами конструктора парашютов, еще ждет своего исследования. Первые теоретические работы Н.А. Лобанова содержали обобщение экспериментов [6, 69], далее появились «ростки» математического моделирования, на которые возлагались большие надежды [1, 3-4]; методология математического моделирования достигла своего апогея в 80-90-е годы и связана с именами О.В. Рысева, И.В. Днепров, А.А. Вишняка и Ю.В. Мосеева [7, 8]. Аэродинамика парашюта описывалась методами крупных частиц О.М. Белоцерковского и дискретных вихрей С.М. Белоцерковского. Однако уже тогда появилось понимание ограниченности чисто теоретического подхода, основанного на методах конечных элементов, конечных разностей и крупных частиц. Наряду с методами математического моделирования продолжали существовать полуэмпирические методики Р.А. Андропова и Ф.Г. Герасимато, которые зачастую и применялись в инженерной практике, так как давали конкретные результаты. Развитие теоретического парашютостроения в конце XX – начале XXI века связано с именами В.И. Морозова и А.Т. Пономарева, которые смогли объединить методики Р.А. Андропова и Ф.Г. Герасимато для осесимметричных парашютов с достижениями математического моделирования [4, 384]. Для решения задач парашютостроения существует современный комплекс прикладных программ [9, 186].

При описании функционирования мягкой оболочки в среде важным является явление (эффект) «перемешивания» слоев жидкости, что в уравнениях Навье-Стокса представлено членами, содержащими вязкость жидкости. Использование потенциальных течений для объяснения и исследования процесса разворачивания представляется новым. При этом не возникает противоречия с парадоксом Даламбера – так в случае стационарного потенциального обтекания купола, хотя общая сила и момент реакции жидкости равны нулю, но ненулевые силы и моменты, действующие на отдельные части купола, приводят к нарушению условий равновесия, и, следовательно, появлению нестационарного течения и движениям в процессе разворачивания мягкой оболочки.

В общей постановке задача разворачивания мягкой оболочки описывается уравнениями в частных производных [10, 30; 11, 469]:

$$\frac{d}{dt} \bar{v} = \left[ \frac{\partial}{\partial \alpha^1} \left( T_{11} \sqrt{\frac{g_{22}}{g_{11}}} \frac{\partial \bar{r}}{\partial \alpha^1} + T_{12} \frac{\partial \bar{r}}{\partial \alpha^2} \right) + \frac{\partial}{\partial \alpha^2} \left( T_{21} \frac{\partial \bar{r}}{\partial \alpha^1} + T_{22} \sqrt{\frac{g_{11}}{g_{22}}} \frac{\partial \bar{r}}{\partial \alpha^2} \right) + \bar{P} \sqrt{g} - \varepsilon \bar{v} \right] / \left( \gamma_0 \sqrt{g} \right)$$

$$\frac{d}{dt} \bar{r} = \bar{v}$$

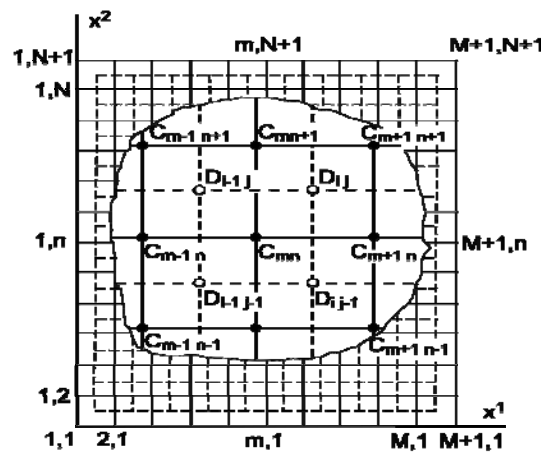
где  $\vec{r} = (x^1, x^2, x^3)$  - радиус-вектор;  $\vec{v} = \left( \frac{d}{dt}x^1, \frac{d}{dt}x^2, \frac{d}{dt}x^3 \right)$  - скорость перемещения;

$g = g_{11}g_{22} - g_{12}g_{21}$  - дискриминант метрического тензора деформированной, и

$\overset{\circ}{g} = \overset{\circ}{g}_{11}\overset{\circ}{g}_{22} - \overset{\circ}{g}_{12}\overset{\circ}{g}_{21}$  - исходной недеформированной поверхности;  $\gamma_0$  - поверхностная плотность материала;  $T_{11}, T_{12}, T_{21}, T_{22}$  - натяжения в мягкой оболочке;  $g_{11}, g_{12}, g_{21}, g_{22}$  - компоненты метрического тензора;  $\varepsilon$  - коэффициент конструкционного демпфирования;  $t$  - время.

Вектор аэродинамических сил  $\vec{P}$  определяется как 0 при  $t < 0$  и  $\Delta p \vec{n}$  при  $t \geq 0$ , где  $\vec{n}$  - нормаль к поверхности ячейки; величина перепада давления  $\Delta p$  соответствует максимальной местной аэродинамической нагрузке при раскрытии парашюта.

Вычислительная задача по методу установления решается на конечно-разностной сетке:



**Конечно-разностная сетка**

что автоматически подразумевает математическую модель мягкой оболочки с большим (тысячи и десятки тысяч) числом степеней свободы. Гораздо более эффективным представляется снижение степеней свободы (большинство которых в вычислительной практике оказываются нереализованными и паразитными) и нахождение аналитических решений. В [1, 131] описана аналитическая модель «волана» (не нашедшая достойного продолжения), из нескольких воланов составляется купол парашюта. В методе дискретных вихрей С.М. Белоцерковского используется аналитическое решение уравнения Навье-Стокса для отдельно взятого вихря; в дальнейшем это решение применяется для всех вихрей в потоке. И.К. Лифанову удалось распространить такую аналитическую методологию на физические задачи, далекие от аэродинамики [12, 405].

Известен метод аналитической гидродинамики, берущий свое начало от классических трудов механиков, при котором производится параметризация – вводится конечное число степеней свободы, после чего задача сводится к интегрированию системы обыкновенных дифференциальных уравнений Лагранжа второго рода. Технически не составляет труда описать форму купола парашюта конечным числом параметров – например первая обобщенная координата  $q_1$  – путь, пройденный вершиной купола, и вторая -  $q_2$  - пространственный угол раскрытия купола. Эффективным параметром оказы-

вается объем воздуха под куполом парашюта (вследствие несжимаемости при малых дозвуковых скоростях движения), который втекает по нижней кромке и вытекает через полюсное отверстие и пронизываемую ткань. Далее с использованием обобщенных координат записывается полная энергия системы:

$$\Pi + T_c - U = \text{const},$$

где  $U$  - силовая функция,  $\Pi$  – потенциальная энергия системы,  $T_c$  - кинетическая энергия системы, которая состоит из кинетических энергий точечного груза, собственных масс купола и строп, а также кинетической энергии жидкости  $T$ , выражаемой в виде квадратичной формы:

$$2T = \lambda_{11} q_1^2 + 2\lambda_{12} q_1 q_2 + \lambda_{22} q_2^2$$

Величины  $\lambda_{ij}$ ,  $i=1,2$ ,  $j=1,2$  называют коэффициентами присоединенных масс - моментов инерции деформируемой мягкой оболочки. Проблема определения величины присоединенных масс является одной из краевых нерешенных (и в российских, и в иностранных публикациях) задач парашютостроения. Вычисление коэффициентов присоединенных масс – моментов инерции для деформируемого тела, необходимых для вычисления кинетической энергии жидкости, как и применение процедуры уравнений Лагранжа второго рода к задаче разворачивания мягкой оболочки, представляется новым [13, 220].

Ожидается, что модель с тремя степенями свободы позволит вычислять не только пиковые усилия растяжения в стропах, но и в куполе, и тем самым проверить гипотезу критического сечения о том, что максимальные усилия в куполе должны реализовываться не при полном разворачивании мягкой оболочки, а лишь при разворачивании до критического радиуса.

В предлагаемом подходе за основу рассмотрения взято потенциальное обтекание мягкой оболочки, что объясняется быстротечностью фазы разворачивания. Другой отличительной особенностью подхода является параметризация – бесконечное число степеней свободы заменяется конечным. Так модель с двумя степенями свободы может перемещаться вертикально как жесткое целое и менять угол разворачивания купола (типа «зонтик» – мягкая оболочка). Эти две степени свободы описывают положение и форму парашюта также эффективно, как и конечно-элементная модель с практически бесконечным числом степеней свободы. В модели с тремя степенями свободы «зонтик» может дополнительно складываться посередине, что описывает процесс «перехлеста» купола стропами, либо в качестве третьей степени свободы берется объем воздуха под куполом парашюта, что позволяет перейти к рассмотрению планирующего парашюта (парафойла) самых современных форм. Для вычисления кинетической энергии жидкости предлагается расширить классические методы определения коэффициентов присоединенных масс – моментов инерций на случай деформируемого тела. Проблема определения коэффициентов присоединенных масс – моментов инерции купола, зависящих от обобщенных координат, решается численно несколькими методами: с использованием конформных отображений (только для плоских моделей), дискретных особенностей (присоединенных дискретных вихрей) и граничных элементов. В дальней-

шем на фоне потенциального обтекания формулируются модели, описывающие местный отрыв потока.

Связь напряженного и деформированного состояния текстильных конструкционных материалов парашюта описывается аналитически [14, 145]. Постановка задач по разработке нового подхода проводится в соответствии с общей методологией математических исследований и их программной реализацией [15, 5-6].

Алгоритм решения проблемы создания нового поколения методов расчета функционирования парашютов на основе уравнения Лагранжа второго рода можно представить последовательностью действий:

- Разработка основных механических моделей для исследования процесса разворачивания и комплекса прикладных программ определения коэффициентов присоединенных масс – моментов инерции купола следующими численными методами:
  - использующими методологию конформных отображений,
  - по методу дискретных особенностей,
  - по методу граничных элементов;
- Создание комплекса прикладных программ по описанию топологии мягких оболочек с последующим выходом на автоматическое построение чертежей деталей;
- Анализ результатов моделирование с последующей разработкой практических рекомендаций по расчету присоединенных масс.

Использование математических аналитических методов в сочетании с методами вычислительной математики, позволяет предполагать дальнейшее развитие теоретического парашютостроения и эффективное применение результатов в инженерной и конструкторской практике.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Белоцерковский, С.М., Нишиг М.И., Пономарев А.Т., Рысев О.В. Исследование парашютов и дельтапланов на ЭВМ /под ред. С.М. Белоцерковского. – М.: Издательство «Машиностроение», 1987. – 240 с.
2. Морозов, В.И., Пономарев А.Т., Герасимато Ф.Г., Андросенков В.А. Моделирование нагружения и формообразования осесимметричного парашюта при раскрытии // «Полет». – М.: Издательство «Машиностроение», 2007. – № 12. – С. 35-43.
3. Морозов, В.И., Пономарев А.Т., Герасимато Ф.Г., Андросенков В.А. Моделирование напряженно-деформированного состояния осесимметричного парашюта при раскрытии // «Полет». – М.: Издательство «Машиностроение», 2009. – № 7. – С. 25-31.
4. Лялин, В.В., Морозов В.И., Пономарев А.Т. Парашютные системы. Проблемы и методы их решения. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 576 с.
5. Knacke, T.W. Parachute Recovery Systems. Design Manual. – Santa Barbara: Para Publishing, 1992. – 470 p.
6. Лобанов, Н.А. Основы расчета и конструирования парашютов. – М.: Издательство «Машиностроение», 1965. – 363 с.
7. Рысев, О.В., Вишняк А.А., Чуркин В.М., Юрцев Ю.Н. Динамика связанных тел в задачах движения парашютных систем. – М.: Издательство «Машиностроение», 1992. – 288 с.

8. Рысев, О.В., Пономарев А.Т., Васильев М.И., Вишняк А.А., Днепров И.В., Мосеев Ю.В. Парашютные системы. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 1996. – 288 с.
9. Леонов, С.В., Морозов В.И., Пономарев А.Т. Моделирование формообразования и прочностных характеристик парашютов // Механика твердого тела. – 2011. – №2. – С. 183-198.
10. Гулин, Б.В., Ридель В.В. К динамике мягких анизотропных оболочек // В кн.: Нелинейные проблемы аэроупругости. – Казань, 1979. – Вып. 11. – С. 24-42
11. Васильченко, А.Г., Пономарев А.Т. Динамика панели парашюта при раскрытии // Механика композитных материалов. – Рига: Издательство «Зинатне», 1985. – № 3. – С. 468-474.
12. Лифанов, И.К. Метод сингулярных интегральных уравнений и численный эксперимент. – М.: ТОО «Янус», 1995. – 520 с.
13. Пономарев, А.П., Бакулин В.Н. Модель раскрытия парашюта с двумя степенями свободы при осесимметричном потенциальном обтекании // Вестник МАИ. – М.: Издательство МАИ, 2011. – т.18. № 2. – С. 219-222.
14. Васильченко, А.Г., Свириденко А.Н. Феноменологическая модель стропы из синтетического материала // Научный Вестник МГТУ Гражданской авиации, серия «Аэромеханика и прочность». – М., 2010. – № 151(1). – С. 143-149.
15. Бугримов, А.Л. Моделирование. Проблема выбора и реализации. – М.: Издательство МГОУ, 2008. – 74 с.

## **METHODS OF ENGINEERING CALCULATION AND MATHEMATICAL MODELLING OF WORK OF PARACHUTES**

**A.Bugrimov\*, A.Wasilchenko\*\*, S.Leonov\*\***

*\*Moscow Region State University  
10a, Radio st., Moscow, 105005, Russia*

*\*\*Scientific Research Institute of Parachute Construction (Moscow)  
2, Irkutskaya st., Moscow, 107497, Russia*

*Abstract.* Soft cover engineering constructions represent actively developing type of technical products which find new wide application in engineering practice. Such constructions are made from fabrics, laminates, tapes and cords which on durability have come nearer to metals, but essentially it is easier than traditional constructional materials. Creation of adequate methods of calculation of such designs, advancing mathematical modeling of their functioning in actual practice is necessary. Considerable experience of engineering calculation and mathematical modeling Soft cover engineering constructions is saved up in Parachute design Industry where such workings out are spent since 50th years of the last century. In article the modeling current state in Parachute design Industry is analyzed and the problem of creation of new generation settlement methods on the basis of the equations of Lagrange of the second sort is put.

*Keywords:* Soft cover, soft cover engineering construction, parachute, parafoil, mathematical modeling, equation of Lagrange of the second sort.