

УДК 629.7.002

## **Алгоритм построения 3D-модели трехслойной оболочки вращения с конусообразными ячейками заполнителя и изменяемой формой образующей**

**Зотов А.А.\*, Колпаков А.М.\*\*, Волков А.Н.\*\*\***

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия*

*\*e-mail: [aa-zotov@inbox.ru](mailto:aa-zotov@inbox.ru)*

*\*\*e-mail: [a.kolpakov@mai.ru](mailto:a.kolpakov@mai.ru)*

*\*\*\*e-mail: [rosezento@gmail.com](mailto:rosezento@gmail.com)*

### **Аннотация**

Разработан алгоритм построения и технология изготовления трехслойных оболочек вращения с конусообразными ячейками заполнителя и изменяемой формой образующей с помощью 3D-печати. Предлагаемая структура заполнителя позволяет успешно решать задачу удаления конденсата, а также тепло- и звукоизоляции. По сравнению с ферменными заполнителями подобной структуры замкнутые усеченные конические ячейки обеспечивают большую жесткость при практически равном весе. Традиционные технологические приемы соединения заполнителя с несущими слоями в виде склеивания или точечной сварки имеют невысокую надежность, сложно контролировать качество соединений и имеют невысокую прочность при продольном сдвиге. Применение 3D-печати позволяет выполнять единую трехслойную структуру в одну операцию, существенно улучшая

характеристики соединений заполнителя с обшивкой, сохраняя регулярную структуру конических ячеек.

**Ключевые слова:** трехслойная оболочка вращения, произвольная форма образующей, структура и форма заполнителя, 3D-печать, аддитивные технологии, демонстрационные модели.

## Введение

В конструкции летательных аппаратов широко используются многослойные панели с различными заполнителями. Наиболее распространены сотовые, гофровые и вспениваемые заполнители. В последнее время появились перспективные складчатые, а также ферменные структуры. Опыт эксплуатации и отработки объектов с применением трехслойных пакетов показал их высокую эффективность благодаря тому, что при малом весе они обладают высокой удельной прочностью и жесткостью. К их недостаткам следует отнести [1,2,3]: низкую ударную прочность, сложность с удалением конденсата, невысокую прочность на сдвиг, трудоемкость изготовления. Новые технологии изготовления данных структур из высокопрочных армированных композиционных материалов (стекло, углепластики) [3,4] и широкие возможности по оптимизации их геометрических параметров позволяют добиться более высоких прочностных характеристик заполнителя на поперечное сжатие, продольный сдвиг и изгиб. Тем не менее, проблемы удаления конденсата, снижения трудоемкости изготовления, обеспечения надежности соединения заполнителя с

несущими слоями, а также сложности выполнения конструкций с изменяемой геометрической конфигурацией заставляют искать новые решения.

В настоящей работе показаны возможности применения трехслойных конструкций с наполнителем в виде повторяющихся в шахматном порядке конусообразных ячеек, изготовленных с использованием 3D печати, которые, на наш взгляд, в значительной мере позволяют избежать перечисленных выше недостатков (Рис.1).

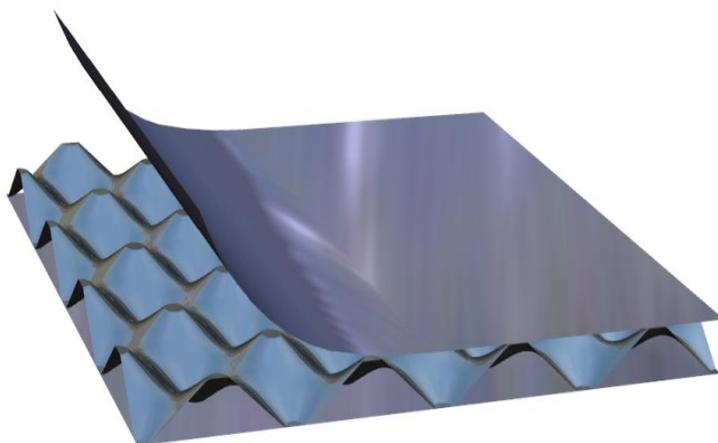


Рис.1. Трехслойная конструкция с конусообразными ячейками наполнителя.

Ниже предлагается алгоритм решения задачи выбора рациональных размеров и формы конических ячеек при изменяемой форме образующей оболочки вращения.

### **1. Расчет геометрических параметров расчетной модели трехслойной оболочки вращения с изменяемой образующей.**

Рассмотрим сначала *цилиндрическую оболочку* с одинаковым шагом расположения конических ячеек наполнителя в продольном и окружном направлении на внешней поверхности. Количество ячеек по круговому сечению равно  $n$ . Меньшее основание всех конических ячеек имеет одинаковый диаметр  $b$ ,  $D$  – внешний диаметр оболочки,  $h$  – толщина пакета (Рис. 2).

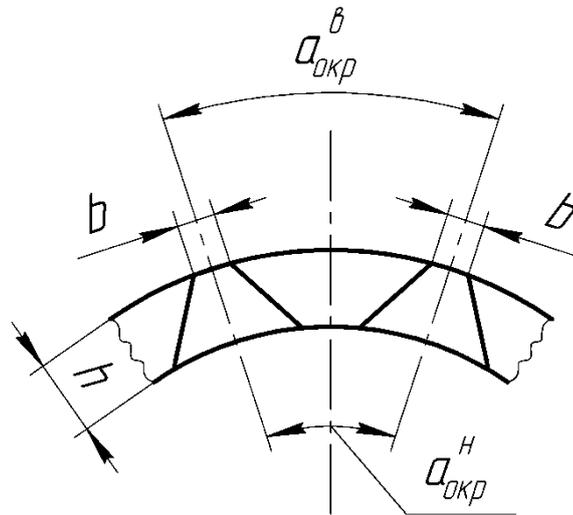


Рис. 2. Геометрическая форма заполнителя.

Шаг конических ячеек в обоих направлениях на внешней поверхности оболочки будет равен

$$a_{окр} = a_{пр} = \frac{\pi D}{n}; \quad (1.1)$$

Шаг ячеек в продольном направлении на внутренней поверхности останется прежним, а в окружном направлении уменьшится

$$a_{окр} = \frac{\pi(D-2h)}{n} \quad (1.2)$$

и, следовательно, основание конусов на внутренней поверхности оболочки становится эллиптическим. Соотношение осей эллипса зависит от толщины пакета  $h$ .

Рассмотрим теперь *конический* отсек оболочки при условии, что шаг ячеек по внешней поверхности в продольном направлении  $a_{пр}$  останется равным и таким же по величине, что и в цилиндрической оболочке, а длина контура сечения по правому краю уменьшится на величину двух шагов ячеек (Рис. 3). При этом число ячеек в окружном направлении на правой границе остается прежним и, следовательно, шаг ячеек в окружном направлении становится равным.

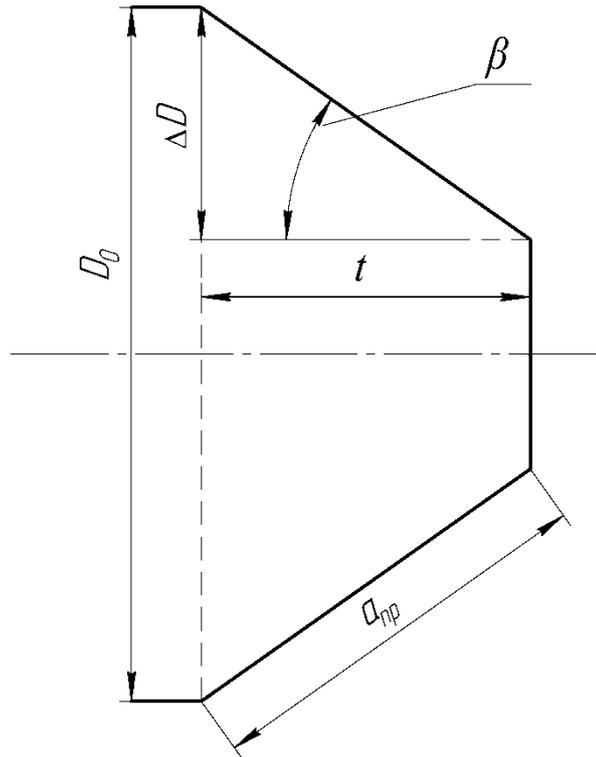


Рис. 3. Конический отсек.

$$a_{\text{окр}} = \frac{\pi D - 2 \frac{\pi D}{n}}{n} = \frac{\pi D}{n} \left( 1 - \frac{2}{n} \right); \quad (1.3)$$

Диаметр правого сечения конического отсека уменьшится на величину  $2\Delta D$ :

$$(\pi D_{\text{лев}} - \pi D_{\text{пр}}) = 2\pi\Delta D = 2a_{\text{пр}};$$

$$\therefore \Delta D = \frac{a_{\text{пр}}}{\pi} \quad (1.4)$$

Синус угла наклона конического участка  $\beta$  будет равен

$$\sin\beta = \frac{\Delta D}{a_{\text{пр}}}; \quad (1.5)$$

Подставляя (1.4) в (1.5), получаем значение  $\sin\beta$  в случае равного шага ячеек в коническом и предыдущем цилиндрическом отсеках в продольном направлении.

$$\sin\beta = \frac{1}{\pi} = 0.3185; \quad (1.6)$$

соответственно  $\beta = 18^{\circ}35'$ .

Ширина данного конусного отсека  $t$  равна

$$t = a_{np} \cos \beta$$

Если в следующем коническом отсеке уменьшить длину контура сечения на правом краю на четыре шага ячеек в продольном направлении, то

$$a_{окр} = \frac{\pi D - 4 \frac{\pi D}{n}}{n} = \frac{\pi D}{n} \left(1 - \frac{4}{n}\right);$$

и, соответственно, синус угла наклона этого конического участка  $\beta$  будет равен

$$\sin \beta = \frac{\Delta D}{a_{np}};$$

где  $(\pi D_{лев} - \pi D_{np}) = 2\pi \Delta D = 4a_{np}$ ;

$$\therefore \Delta D = \frac{2a_{np}}{\pi}; \quad (1.7)$$

$$\sin \beta = \frac{2}{\pi}; (\beta = 39^{\circ}32')$$

Продолжая этот процесс на следующем коническом участке, уменьшив длину правого контура на шесть шагов ячеек в продольном направлении, получим

$$\sin \beta = \frac{3}{\pi}; (\beta = 72^{\circ}49') \quad (1.8)$$

Очевидно, что последующее уменьшение угла конусности  $\beta$  не имеет смысла, поскольку

$$\sin \beta = \frac{4}{\pi} > 1$$

и, соответственно,  $\beta > 90^{\circ}$ .

## 2. Примеры построения расчетной модели.

В качестве примера рассмотрим модель цилиндрической оболочки с днищем, близким к сферическому (Рис.4).

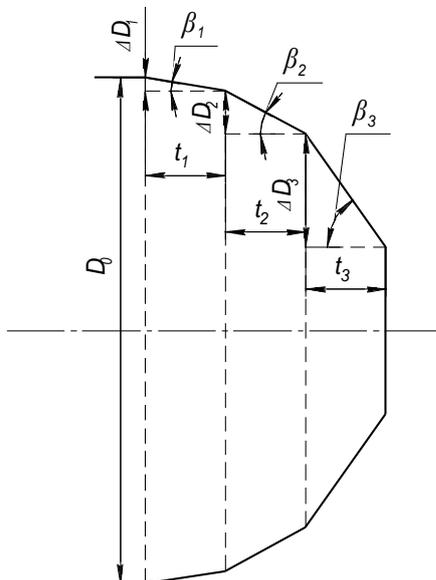


Рис. 4. Схема модели оболочки вращения с изменяемой формой образующей.

Пусть на цилиндрических отсеках число ячеек  $n=16$ . Внешний диаметр цилиндрической части оболочки  $D_0 = 170 \text{ мм}$ . Соответственно, номинальный радиус сферического днища  $R_{сф} = 85 \text{ мм}$ .

Тогда, согласно (1.1) шаг ячеек в обоих направлениях цилиндрического отсека

$$a_{окр} = a_{пр} = \frac{\pi D}{n} = \frac{3.14 D}{16} = 0.19625 D_0 = 33.3625 \text{ мм};$$

Результаты расчета структурных параметров модели на последующих конических участках с углами конусности, соответствующими (1.5)-(1.7) приведены в Таблице 2.1. Форма полученного днища приведена на Рис.5, она близка к полусфере и может быть скорректирована до требуемой гладкости обводов при изменении числа конических участков с учетом приемлемого соотношения шагов ячеек в продольном и окружном направлении на различных конических участках.

Таблица 2.1 Структурные параметры модели

№№	$\beta$ Угол конусности [град <sup>0</sup> ]	$a_{пр}$ Шаг в продольном направлении [мм]	$\Delta D$ Приращение диаметра [мм]	$t$ Ширина отсека [мм]
0	0	33.3625	0	0
1	18 <sup>0</sup> 35'	33.3625	10.626	31.628
2	39 <sup>0</sup> 32'	33.3625	21.252	21.252
3	72 <sup>0</sup> 49'	33.3625	31.875	9.842

Полнота полученной квазисферической части оболочки зависит от начального числа ячеек заполнителя  $n_0$ , как показано в Таблице 2.1 и на Рис.4, на котором каждый участок сферообразной части оболочки содержит только одну ячейку заполнителя в продольном направлении  $a_{пр} = a_{окр}$ . Для получения законченной сферической части при большом числе ячеек заполнителя в кольцевом направлении на каждом шаге следует располагать несколько ячеек в продольном направлении с одинаковым углом конусности  $\beta$ . Например, при числе ячеек в сечении цилиндрической части оболочки  $n_0=36$ , количество ячеек в осевом направлении в каждой конической части с одинаковым углом  $\beta$  следует умножить на три. При этом длина образующей приближается к величине радиуса сферы и сглаживание ломаной образующей можно проводить до необходимого приближения к сферической форме.

Разумеется, коническая форма ячеек в области стыка цилиндрической и конической частей, а также конических частей с различными углами  $\beta$ , будет незначительно искажаться, однако их характеристики прочности и устойчивости остаются практически неизменными.

### 3. Алгоритм и технология 3D- печати полученной модели.

На основе представленного алгоритма, с помощью аддитивных технологий, был изготовлен демонстрационный образец цилиндрической оболочки с квазисферическим днищем (Рис. 5) [5]. Данный образец был изготовлен по FDM-технологии из полилактида (PLA), одного из наиболее востребованных термопластичных сополимеров в производстве сложных формованных изделий, требующих высокой точности изготовления. При промышленном производстве подобных изделий возможно применение различных конструкционных материалов.



Рис.5. Фрагмент демонстрационной оболочки с изменяемой формой образующей.



Рис. 6. Демонстрационный образец цилиндрической оболочки.

В программе подготовки к построению модель была разбита на 1093 сечений(слоев) (Рис.7). Модель распечатана с шагом слоя 0.1мм и 0% внутренним заполнением материала, объём детали создан только за счёт периметров. Цикл изготовления модели составил 15 часов и 24 минуты. Поддержки были спроектированы самостоятельно без автоматического построения поддержек.

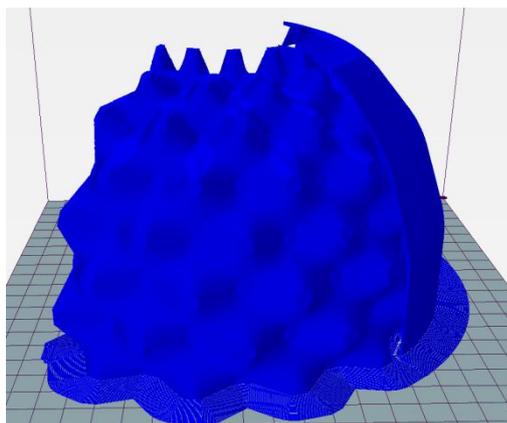


Рис.7 . Образец в программе подготовки к печати.

### **Заключение**

Предлагаемая структура заполнителя позволяет успешно решать задачу удаления конденсата, а также тепло- и звукоизоляции. По сравнению с ферменными заполнителями подобной структуры замкнутые усеченные конические ячейки обеспечивают большую жесткость при практически равном весе. Традиционные технологические приемы соединения заполнителя с несущими слоями в виде склеивания или точечной сварки имеют невысокую надежность, сложно контролировать качество соединений и имеют невысокую прочность при продольном сдвиге. Изготовление конструкций с предлагаемой конфигурацией заполнителя с помощью 3-D печати позволяет выполнять единую трехслойную структуру в одну операцию, существенно улучшая характеристики соединений заполнителя с обшивкой. Наконец, предлагаемый тип заполнителя позволяет, например, в ходе одной технологической операции изготавливать трехслойную оболочку вращения с изменяемой формой образующей, сохраняя регулярную структуру конических ячеек. Примером таких оболочек могут служить камеры сгорания ЖРД или термостабильные цилиндрические баллоны высокого давления со сферическими или эллипсоидальными днищами.

На Рис. 5 и Рис. 6 представлены примеры моделей, выполненных с помощью предлагаемого алгоритма.

### Библиографический список

1. Ендогур А.И., Вайнберг М.В., Иерусалимский К.М. Сотовые конструкции. - М.: Машиностроение, 1986. - 198 с.
2. Ендогур А.И., Кравцов В.А., Солошенко В.Н. Принципы рационального проектирования авиационных конструкций с применением композиционных материалов // Труды МАИ. 2014. № 72. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=47572>
3. Гуань Ш., Дудченко А.А., Ендогур А.И. Проектирование оптимальных трехслойных конструкций цилиндрической формы // Труды МАИ. 2004. № 15. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=34246>
4. Халиулин В.И., Двоеглазов И.В., Батраков В.В. О разработке технологических схем изготовления складчатых конструкций из ПКМ с повышенной прочностью структурных элементов // Всероссийская конференция «Авиакосмические технологии и оборудование». Сборник докладов. (Казань, 8 - 10 августа 2003). – Казань: КАИ, 2003.– С. 64 - 72.
5. Астапов В.Ю., Хорошко Л.Л., Дудков К.В. Оценка применения аддитивных технологий для создания аэродинамических моделей космических головных частей // Труды МАИ. 2018. № 101. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=96683>
6. Зотов А.А., Бабайцев А.В. Проектирование и расчет прессованных профилей неоднородного состава // Технология металлов. 2016. № 11. С. 24 - 33.

7. Зотов А.А., Бабайцев А.В., Волков А.Н. Определение НДС многослойного ламината с использованием ступенчатой аппроксимации // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. № 2(12). С. 175 – 185.
8. Двоеглазов И.В., Халиулин В.И. К вопросу проведения экспериментальных исследований прочности складчатых заполнителей типа z-гофра на поперечное сжатие // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2012. № 5-2(36). С. 275 – 281.
9. Абдуллин И.Н. Рациональное проектирование трехслойных конструкций со стержневым заполнителем. Дисс. ... д.т.н. – Казань: - КАИ, 2016. - 125 с.
10. Халиулин В.И., Батраков В.В., Шабалов А.В. Способ изготовления из композитов складчатого заполнителя для многослойных панелей. Патент РФ № 2381084. 2009, 27.10.2009.
11. Панин В.Ф. Конструкции с сотовым заполнителем. - М.: Машиностроение, 1982. – 152 с.
12. Александров А.Я. Трехслойные пластинки и оболочки. Прочность, устойчивость, колебания. - М.: Машиностроение, 1968. – 464 с.
13. Гайнутдинов В.Г. Соркин Э.М. Проектирование тонкостенной конструкции максимальной жесткости с учетом потери устойчивости панелей // Известия вузов. Авиационная техника. 2004. № 1. С. 3 – 5.
14. Иванов А.А. Новое поколение сотовых заполнителей для авиационно-космической техники - М: Энергоатомиздат, 2000. – 436 с.

15. Паймушин В.Н. Усредненные упругие и прочностные характеристики сотового заполнителя и теоретико-экспериментальный метод их определения // Механика композитных материалов. 2012. Т. 48. № 5. С. 745 – 764.
16. Heimbs S., Middendorf P., Kilchert S., Johnson A.F., Maier M. Numerical simulation of advanced folded core materials for structural sandwich applications // Composites Science and Technology, 2007, available at: [http://www.heimbs-online.de/Heimbs\\_2007\\_Numerical\\_Simulation\\_of\\_Folded\\_Core.pdf](http://www.heimbs-online.de/Heimbs_2007_Numerical_Simulation_of_Folded_Core.pdf)
17. Mudra C. Alternative sandwich core structures. Efficient investigation of application potential by using finite element modeling // SAMPE Europe international conference, Paris, 2003, pp. 444 - 448.
18. Heimbs S. Sandwich structures with folded core: mechanical modeling and impact simulation // SAMPE Europe international conference, Paris, 2009, pp. 153 – 161.
19. Franco F., Cunefare K.A., Ruzzene M. Structural-acoustic Optimization of Sandwich Panels // Journal of Vibration and Acoustics, 2007, vol. 129, pp. 330 – 340.
20. Haydn N.G. Wadleya, Norman A. Fleck, Anthony G. Evans. Fabrication and structural performance of periodic cellular metal sandwich structures // Composites Science and Technology, 2003, no.63, pp. 2331 - 2343.
21. Joo J. -H., Kang K. -J. Modified metallic octet truss cellular cores for sandwich structures fabricated by an expanded metal forming process // Journal of Sandwich Structures and Materials, 2010, vol. 12, pp. 327 – 349.