



ЮЖНОЕ
конструкторское бюро

Методология определения несущей способности комбинированного композиционного баллона высокого давления

Дьяченко Т.П., Клименко Д.В., Скочко А.Т.

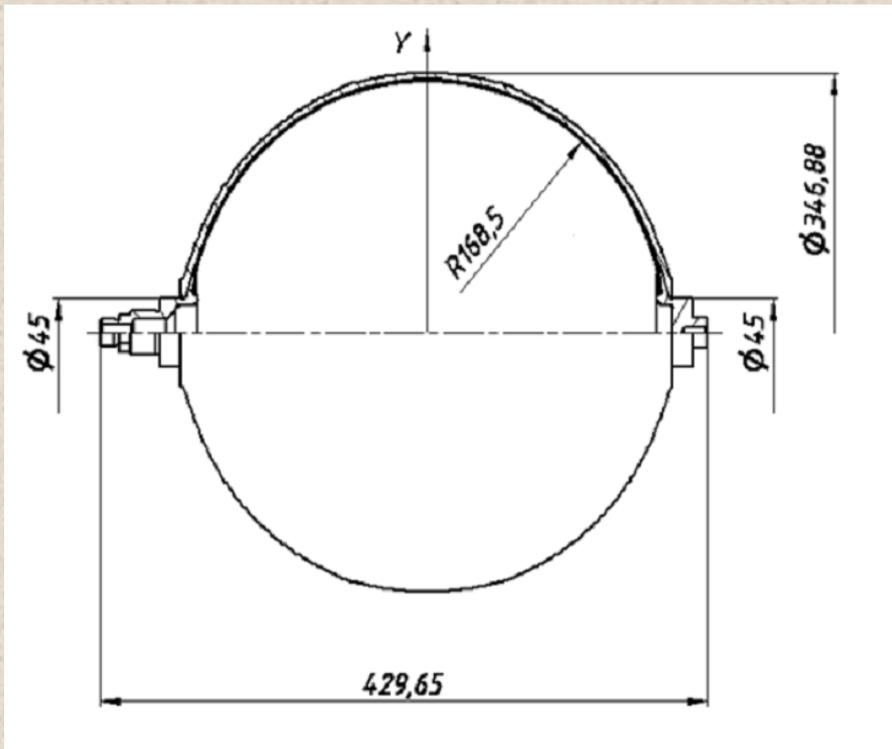


Исходные данные



- | | |
|--|------------------------|
| 1. Внутренним объемом, дм ³ | 20 |
| 2. Рабочее давление при температуре +40°C, кгс/см ² | 225±5 |
| 3. Температурный диапазон эксплуатации баллона под рабочим давлением на стартовой позиции, при относительной влажности окружающей среды до 98%, °C | от минус 40 до плюс 50 |
| 4. Температура конструкции баллона при заполнении рабочим телом до давления 230 кгс/см ² , °C | не более плюс 85 |
| 5. Масса баллона должна быть не более, кг | 5 |
| 6. Разрушающее давление, не менее, кгс/см ² | 460 |

Исходные данные



Общий вид

Баллон представляет собой тонкостенную двухслойную сферическую оболочку. Внутренняя стальная оболочка – лайнер обеспечивает герметичность баллона и является технологической оправкой для многослойной намотки армирующих слоев внешней несущей оболочки из углепластика, пропитанной связующим.

Материал внутренней оболочки – нержавеющая сталь 12X18H10T. Толщина внутренней оболочки $0,8 \div 1,2$ мм.

Материал наконечников – сталь 07X16H6-Ш. Материал внешней несущей оболочки - углепластик на основе углеволокна Tenax®-E IMS65 E23 24K со связующим на основе смолы Araldite LY 1135-1/Aradur 917/Accelerator 960-1 HUNTSMAN. Толщина внешней оболочки переменная $4,118 \div 5,16$ мм.

В качестве основного элемента армирующего слоя несущей оболочки принята ортотропная полоска, наделенная жесткостями при растяжении в двух направлениях и сдвиге.

Армирующий композиционный материал, действующее внутреннее давление, воспринимает как волокнами, так и связующим.

Основные положения

Для определения несущей способности баллона использовались соотношения безмоментной теории оболочек вращения, нагруженных осесимметричным внутренним давлением.

Соотношения, связывающие меридиональные и кольцевые усилия в баллоне с напряжениями, действующими в изотропном, герметизирующем слое и в каждом слое несущей оболочки имеют вид (1).

$$N_{\alpha} = h_{min} \cdot \sigma_T + \sum_{i=1}^n h_i (\sigma_{1i} \cdot \cos^2 \varphi_i + \sigma_{2i} \cdot \sin^2 \varphi_i - \tau_{12i} \cdot \sin 2\varphi_i)$$

(1)

$$N_{\beta} = h_{min} \cdot \sigma_T + \sum_{i=1}^n h_i (\sigma_{1i} \cdot \sin^2 \varphi_i + \sigma_{2i} \cdot \cos^2 \varphi_i - \tau_{12i} \cdot \sin 2\varphi_i)$$

где N_{α}, N_{β} – безмоментные меридиональные и кольцевые усилия в баллоне;

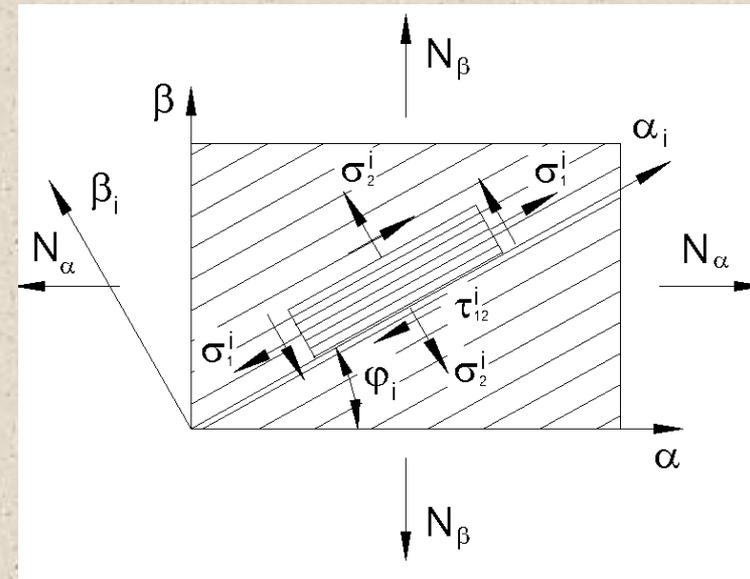
h_{min} – минимальная толщина герметизирующей оболочки;

h_i – толщина двойного спирального i -го слоя;

σ_T – предел текучести материала герметизирующей оболочки;

$\sigma_{1i}, \sigma_{2i}, \tau_{12i}$ – напряжения в ленте композиционного материала, уложенной под углом $\pm \varphi_i$ к меридиану.

В материале, армированном в одном направлении, напряжения σ_{1i} воспринимаются волокнами, в σ_{2i} и τ_{12i} – связующим.



Усилия в оболочке и напряженное состояние в армированном слое



Основные положения

Полагая, что при действии расчетного (разрушающего) давления баллона напряжения σ_{1i} во всех лентах постоянны и равны пределу прочности материала σ_p при растяжении в направлении вдоль армирования, и пренебрегая напряжениями в связующем $\sigma_{2i} = \tau_{12i}$, получим из соотношений (1), зависимости для определения предельной несущей способности углепластиковой оболочки в меридиональном $N_{\alpha,пр}$ и кольцевом $N_{\beta,пр}$ направлениях:

$$N_{\alpha,пр} = \sigma_T \cdot h_{min} + \sigma_p \sum_{i=1}^n h_i \cdot \cos^2 \varphi_i$$

$$N_{\beta,пр} = \sigma_T \cdot h_{min} + \sigma_p \sum_{i=1}^n h_i \cdot \sin^2 \varphi_i \quad (2)$$

Полагая, что напряжения во всех слоях постоянны и равны пределу прочности при растяжении вдоль волокон и пренебрегая напряжениями в связующем, получаем зависимости для определения предельной несущей способности в меридиональном и кольцевом направлениях баллона, нагруженного разрушающим давлением.

Складывая выражения (2) получим:

$$N_{\alpha,пр} + N_{\beta,пр} = 2\sigma_T \cdot h_{min} + \sigma_p \cdot h$$

или

$$P^P \cdot R = 2\sigma_T \cdot h_{min} + \sigma_p \cdot h$$

откуда получаем требуемую минимальную толщину h армированного материала для заданного расчетного (разрушающего) давления P^P сферического баллона:

$$h = \frac{P^P \cdot R - 2\sigma_T \cdot h_{min}}{\sigma_p} \quad (3),$$

где R – внутренний радиус лайнера,

$\sigma_p = 212$ кгс/мм² – предел прочности углепластика при растяжении в направлении армирования.

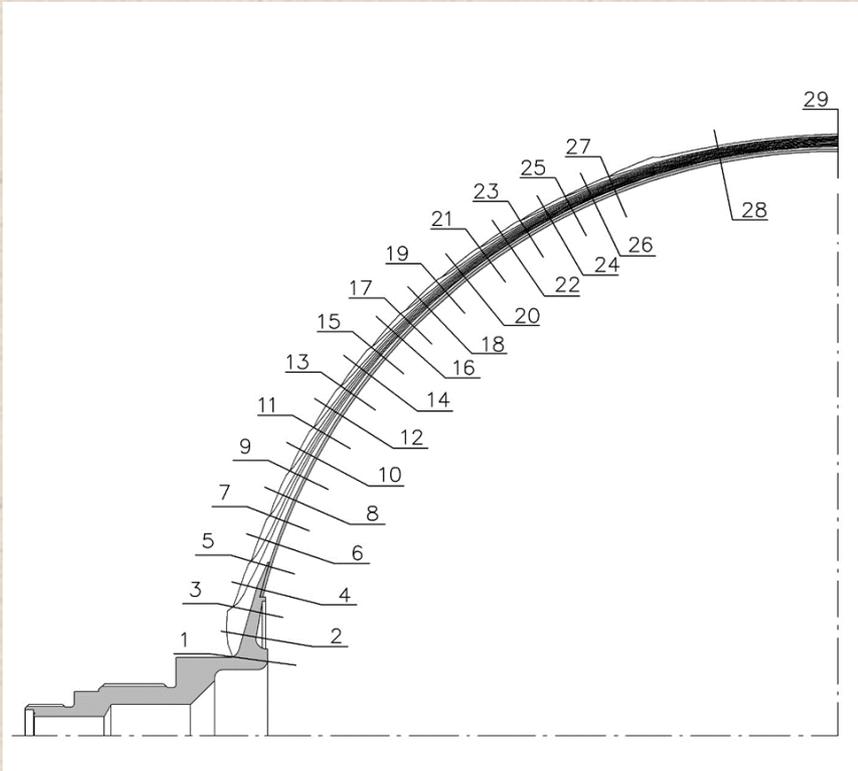
Условие прочности несущей оболочки баллона имеет вид:

$$N_{\alpha,пр} \geq N_{\alpha} = \frac{P^P \cdot R}{2}; \quad N_{\beta,пр} \geq N_{\beta} = \frac{P^P \cdot R}{2}$$

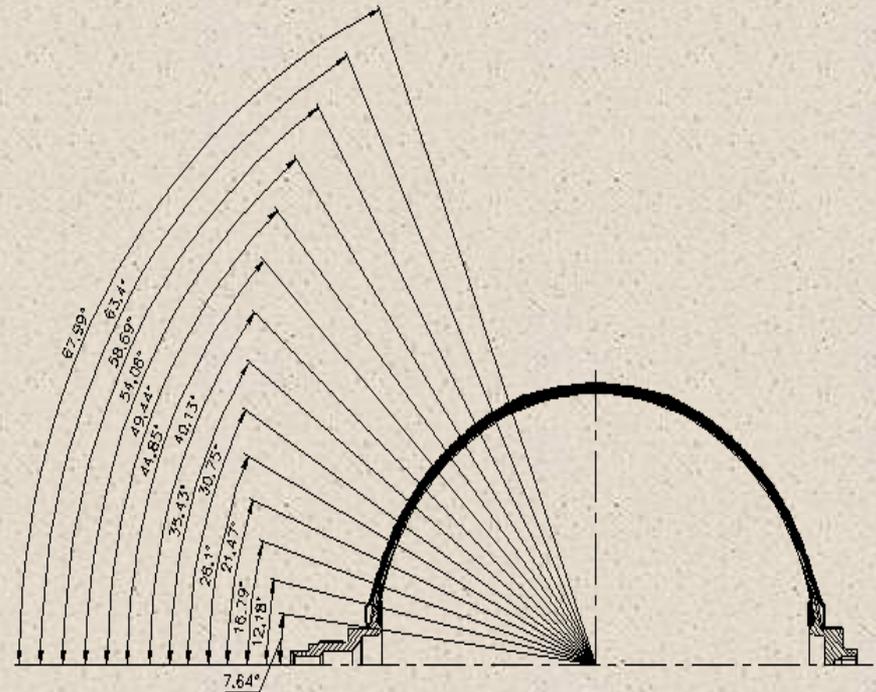
Коэффициенты запаса прочности:

$$\eta_{\alpha} = \frac{N_{\alpha,пр}}{N_{\alpha}}; \quad \eta_{\beta} = \frac{N_{\beta,пр}}{N_{\beta}}$$

Основные результаты

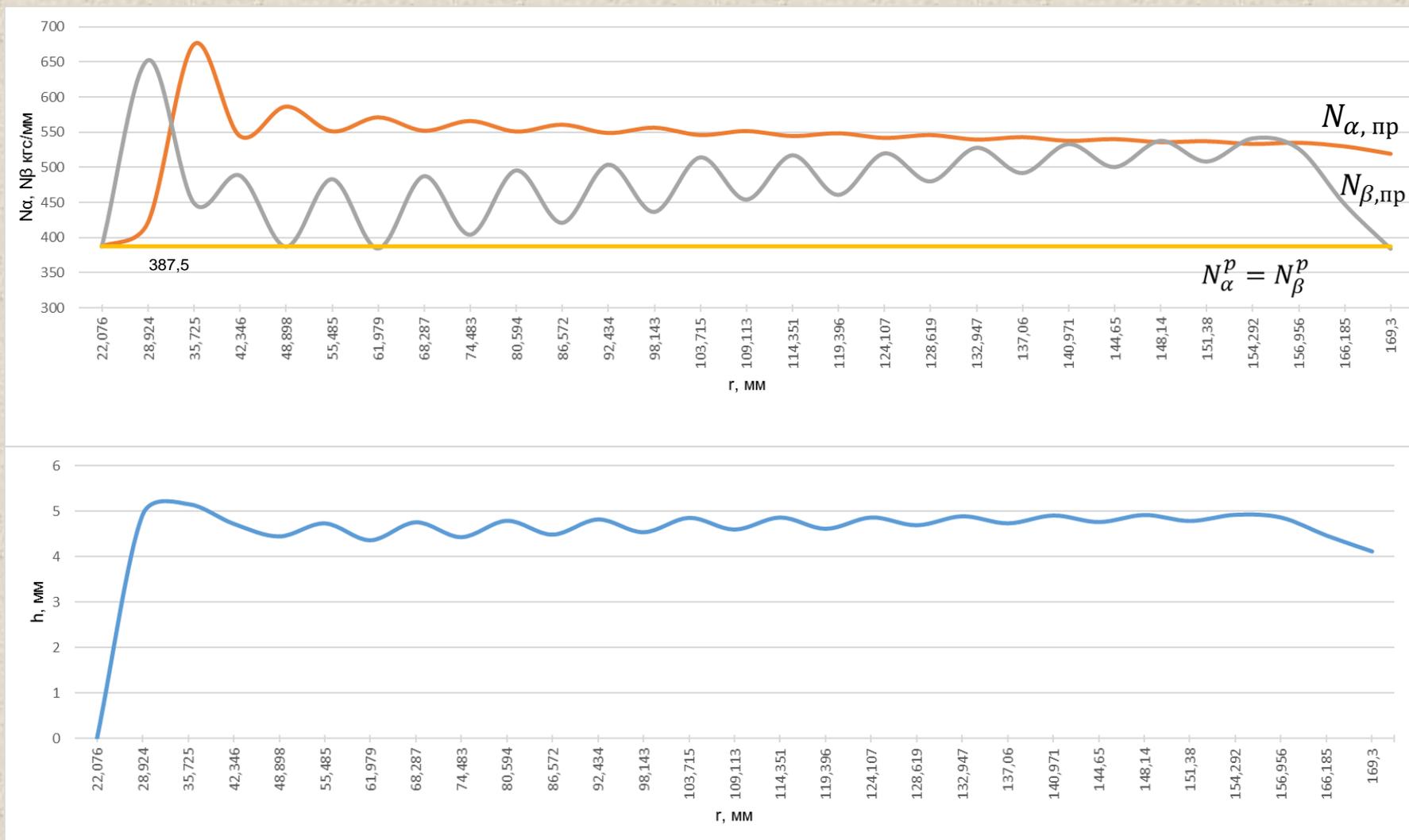


Расчетные сечения несущей оболочки



Начало намотки зон

Основные результаты



Выводы

Для рассмотренных геометрических параметров баллона и используемых физико-механических характеристик материалов, параметров армирования, значений эксплуатационного, испытательного и разрушающего давлений определены :

- минимальная толщина несущей, армирующей оболочки из углепластика;
- предельные меридиональные и кольцевые усилия несущей оболочки;
- коэффициенты запасов прочности.

Предложенный подход определения несущей способности подтвержден проведенной наземной экспериментальной отработкой конструкции.

Результаты проведенной экспериментальной отработки конструкции баллона показали хорошую сходимость с расчетными данными по предлагаемому методическому подходу.

Литература

1. Образцов И.Ф., Васильев В.В., Бунаков В.А., Оптимальное армирование оболочек вращения из композиционных материалов, М., «Машиностроение», 1977г.
2. ГП «КБ «Южное», Программа «Циклон-4М». Наземный комплекс. Двигательный блок. Баллон. Расчет на прочность РД870 94.4012.0430.0100.00.0 Р14, Дн-ск, 2018г.
3. ГП «КБ «Южное», Космическая техника. Ракетное вооружение. Научно-технический сборник. Быковченко Г.И., Колос А.М., Лаврешов В.В., Малый Л.П., Скочко А.Т., Фарятьева Н.П. Экспериментальные исследования несущей способности шаробаллона высокого давления, Дн-ск, 2012г.