

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПО МАССЕ ВОЗДУШНЫХ АККУМУЛЯТОРОВ ДАВЛЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ФОРМ

На подавляющем большинстве крылатых ракет источником энергии системы управления является сжатый воздух, хранящийся в воздушных аккумуляторах давления (ВАД). Очень часто требования компоновки заставляют конструктора изменять размеры или переходить к другой геометрической форме ВАДа, сохраняя при этом потребную массу хранящегося в нём воздуха (при изменении размеров это возможно лишь за счёт изменения давления воздуха). Конструктору в этом случае важно знать, как изменится масса ВАДа. Ответа на этот вопрос в доступной литературе авторам найти не удалось.

Задачей данного исследования являлось установление сравнительных массовых характеристик ВАДов различных геометрических форм при условии постоянства массы хранящегося в них сжатого воздуха. Исследования проводились для сферического, цилиндрического и торового ВАДов при нормальных условиях, изготовленных из стали 30ХГСА ($\sigma_{\text{пц}} = 850$ МПа - предел пропорциональности материала; $\rho = 7,85$ г/см³ - плотность материала) и титанового сплава ВТ-14 ($\sigma_{\text{пц}} = 1030$ МПа, $\rho = 4,5$ г/см³).

Объем сферического баллона (рис.1)

$$V = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot R_c^3. \quad (1)$$

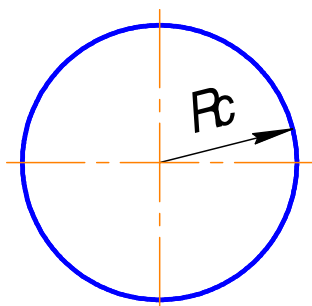


Рисунок 1 – Сферический
ВАД

С другой стороны, из уравнения Менделеева - Клапейрона объем воздуха, находящегося в баллоне, будет равен:

$$V = \frac{m \cdot R \cdot T}{P}, \quad (2)$$

где m - масса воздуха в баллоне, кг;
 P - давление воздуха в баллоне, Па;
 T - температура воздуха в баллоне, К;
 R - газовая постоянная: для воздуха $R = 287,05$ Дж/(кг·град).

Приравняв правые части выражений (1) и (2), получим

$$R_c = \left(\frac{3mRT}{4\pi P} \right)^{1/3}. \quad (3)$$

Масса конструкции баллона, имеющего постоянную толщину стенки,

$$M = S\delta\rho, \quad (4)$$

где S - площадь боковой поверхности баллона, для сферы

$$S_c = 4\pi R_c^2; \quad (5)$$

δ - толщина стенки, рассчитанная из условия обеспечения необходимой прочности, для сферического баллона

$$\delta_c = \frac{PR_c}{2\sigma_{пл}} \cdot \frac{f \cdot K_{шт}}{K_{св}}, \quad (6)$$

где f - коэффициент безопасности, для сосудов высокого давления $f = 2 \dots 3$;

$K_{шт}$ - коэффициент, учитывающий уменьшение толщины стенки баллона при штамповке, $K_{шт} = 1,12$;

$K_{св}$ - коэффициент, учитывающий уменьшение прочности за счет сварного шва, $K_{св} = 0,95$;

Подставив (6) и (5) в (4), получим

$$M_c = \frac{3}{2} \cdot \frac{mRT}{\sigma_{пл}} \cdot \frac{f \cdot K_{шт}}{K_{св}} \cdot \rho. \quad (7)$$

Из выражения (7) следует, что масса конструкции сферического ВАДа при постоянной массе хранящегося в нём воздуха не зависит от давления в баллоне.

Найдем отношение массы баллона к массе воздуха, находящегося в нём:

$$\frac{M_c}{m} = \frac{3RT}{2\sigma_{св}} \cdot \frac{f \cdot K_{шт}}{K_{св}} \cdot \rho = const. \quad (8)$$

Для баллона, изготовленного из стали 30ХГСА, $M_c/m \approx 4,12$, для баллона, изготовленного из сплава ВТ-14, $M_c/m \approx 1,95$

Рассмотрим теперь цилиндрический ВАД (рис. 2).

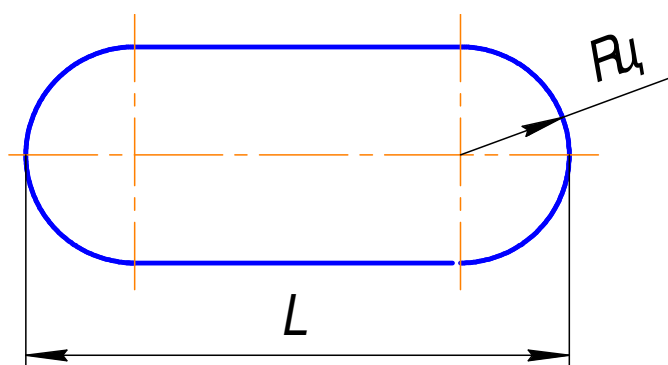


Рисунок 2 – Цилиндрический ВАД

Объем цилиндрического баллона

$$V_{\text{ц}} = \pi R_{\text{ц}}^3 \left(\frac{L}{R_{\text{ц}}} - \frac{2}{3} \right). \quad (9)$$

Приравняв правые части выражений (2) и (9), получим

$$R_{\text{ц}} = \left(\frac{3mRT}{\pi P(3L_{\text{ц}} - 2R_{\text{ц}})} \right)^{1/3}. \quad (10)$$

Площадь боковой поверхности цилиндрического баллона

$$S_{\text{ц}} = 2\pi R_{\text{ц}} L. \quad (11)$$

Толщина стенки цилиндрического ВАДа определяется по формуле

$$\delta_{\text{ц}} = \frac{R_{\text{ц}} P}{\sigma_{\text{пц}}} \cdot \frac{f \cdot K_{\text{штм}}}{K_{\text{св}}}. \quad (12)$$

Подставив (11) и (12) в (4), найдём массу конструкции цилиндрического ВАДа

$$M_{\text{ц}} = \frac{6mRT\rho}{\sigma_{\text{пц}} \left(3 - \frac{1}{\lambda_{\text{ц}}} \right)} \cdot \frac{f \cdot K_{\text{штм}}}{K_{\text{св}}}, \quad (13)$$

где $\lambda_{\text{ц}} = L/(2R_{\text{ц}})$ – удлиннение цилиндра.

Как видим, масса конструкции цилиндрического баллона при постоянной массе хранящегося в нём воздуха не зависит от давления воздуха в баллоне, а зависит от удлиннения баллона $\lambda_{\text{ц}}$.

Найдём отношение массы конструкции цилиндрического баллона к массе воздуха, находящегося в нём (формула (14), рис. 3)

$$\frac{M_{\text{ц}}}{m} = \frac{6RT\rho}{\sigma_{\text{пц}} \left(3 - \frac{1}{\lambda_{\text{ц}}} \right)} \cdot \frac{f \cdot K_{\text{штм}}}{K_{\text{св}}}. \quad (14)$$

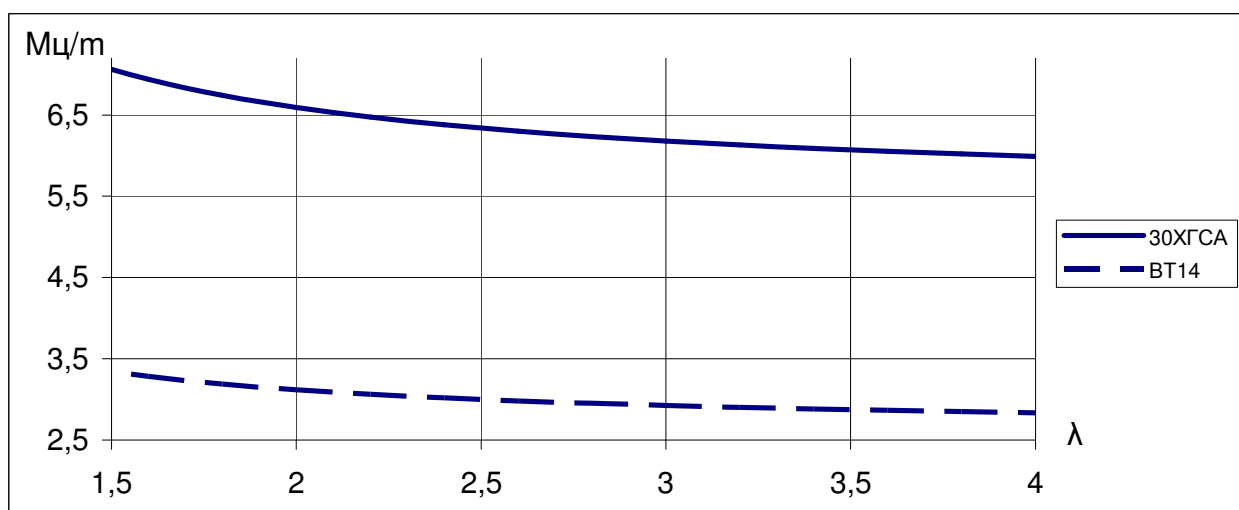


Рисунок 3 – График зависимости $M_{\text{ц}}/m = f(\lambda_{\text{ц}})$

Из графика следует, что при увеличении $\lambda_{ц}$ отношение масс уменьшается, т.е. уменьшается масса конструкции цилиндрического ВАДа.

При изменении $\lambda_{ц}$ от 1,5 до ∞ отношение $M_{ц}/m$ изменяется: для стального баллона – от 7 до 5,5, для титанового – от 3,36 до 2,6.

Из (7) и (13) найдем отношение массы конструкции цилиндрического баллона к массе конструкции сферического ВАДа:

$$\frac{M_{ц}}{M_{с}} = \frac{6mRT\rho \cdot 2\sigma_{пц}}{\sigma_{пц}(3 - \frac{1}{\lambda_{ц}})3mRT\rho} = \frac{4}{3 - \frac{1}{\lambda_{ц}}}. \quad (15)$$

Как видим, при изменении $\lambda_{ц}$ от 1,5 до ∞ отношение $M_{ц}/M_{с}$ изменяется от 1,7 до 1,3.

График зависимости отношения массы цилиндрического баллона к массе сферического баллона представлен на рис. 4

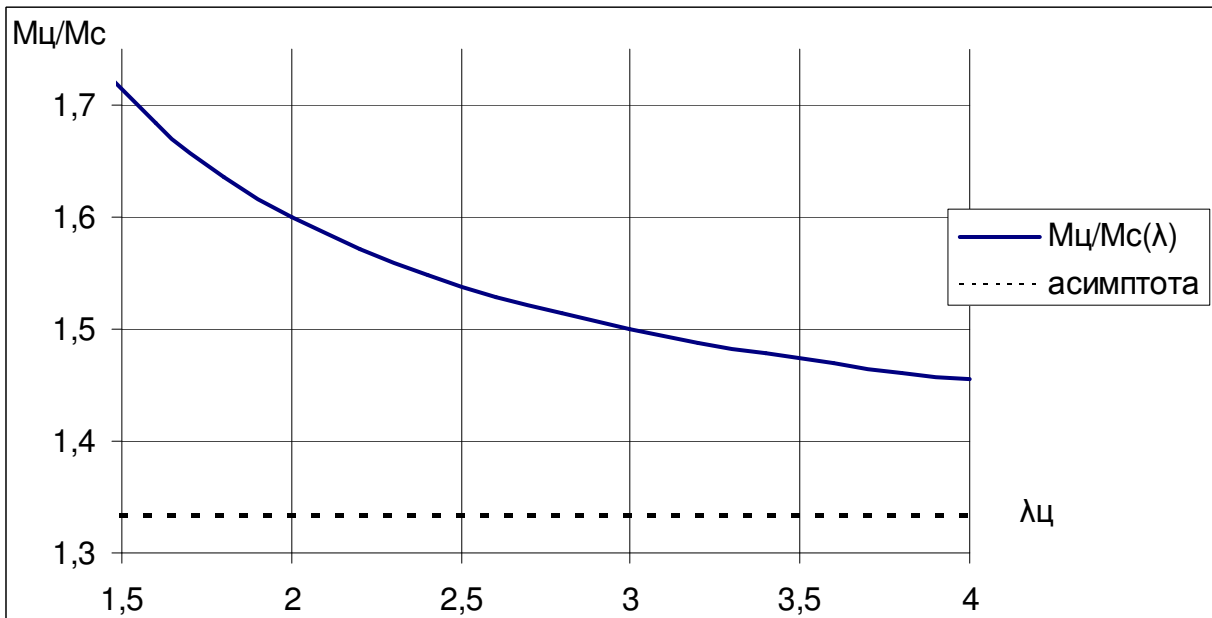


Рисунок 4 – График зависимости $M_{ц}/M_{с} = f(\lambda_{ц})$

Объем торового ВАДа (рис.5) определяется по формуле

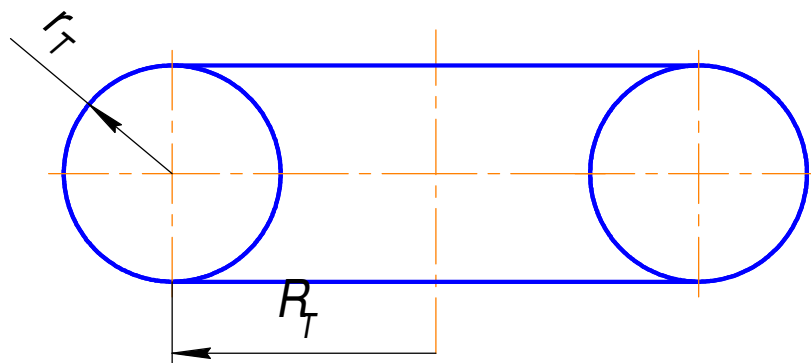


Рисунок 5 – Торový ВАД

$$V = 2\pi^2 R_T r^2. \quad (16)$$

Приравняв правые части выражений (2) и (16), получим

$$R_T = \frac{mRT}{2P\pi^2 r_T^2}. \quad (17)$$

Площадь боковой поверхности тора

$$S_T = 4\pi^2 R_T r_T. \quad (18)$$

Толщина стенки торового баллона определяется по формуле

$$\delta_T = \frac{P \cdot r_T}{\sigma_{пц}} \cdot \frac{f \cdot K_{ум}}{K_{св}}. \quad (19)$$

Найдем массу тора, подставив (18) и (19) в (4):

$$M_T = \frac{2mRT\rho}{\sigma_{пц}} \cdot \frac{f \cdot K_{ум}}{K_{св}}. \quad (20)$$

Из формулы (20) следует, что масса торового баллона не зависит от давления хранящегося в нём воздуха.

Найдем отношение массы конструкции торового баллона к массе хранящегося в нем воздуха:

$$\frac{M_T}{m} = \frac{2RT\rho}{\sigma_{пц}} \cdot \frac{f \cdot K_{ум}}{K_{св}}. \quad (21)$$

Для баллона, изготовленного из стали 30ХГСА, $M_T/m \approx 5,5$, для баллона, изготовленного из титанового сплава ВТ-14, $M_T/m \approx 2,6$.

Из формул (7) и (20) видно, что отношение массы торового ВАДа к массе сферического баллона есть величина постоянная, равная 1,33.

Найдем отношение массы торового баллона к массе цилиндрического баллона (формула (23), рис. 6)

$$\frac{M_T}{M_{ц}} = \frac{1}{3} \cdot \left(3 - \frac{1}{\lambda_{ц}} \right). \quad (22)$$

Масса торового баллона меньше массы цилиндрического баллона. Отношение $M_T/M_{ц}$ при увеличении $\lambda_{ц}$ от 1,5 до бесконечности изменяется от 0,8 до 1.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

а) масса конструкции ВАДа при условии постоянной массы хранящегося в нем воздуха не зависит от давления в баллоне, что позволяет конструктору при решении проблем компоновки без ущерба для массы летательного аппарата изменять размеры ВАДа путем изменения давления в нем;

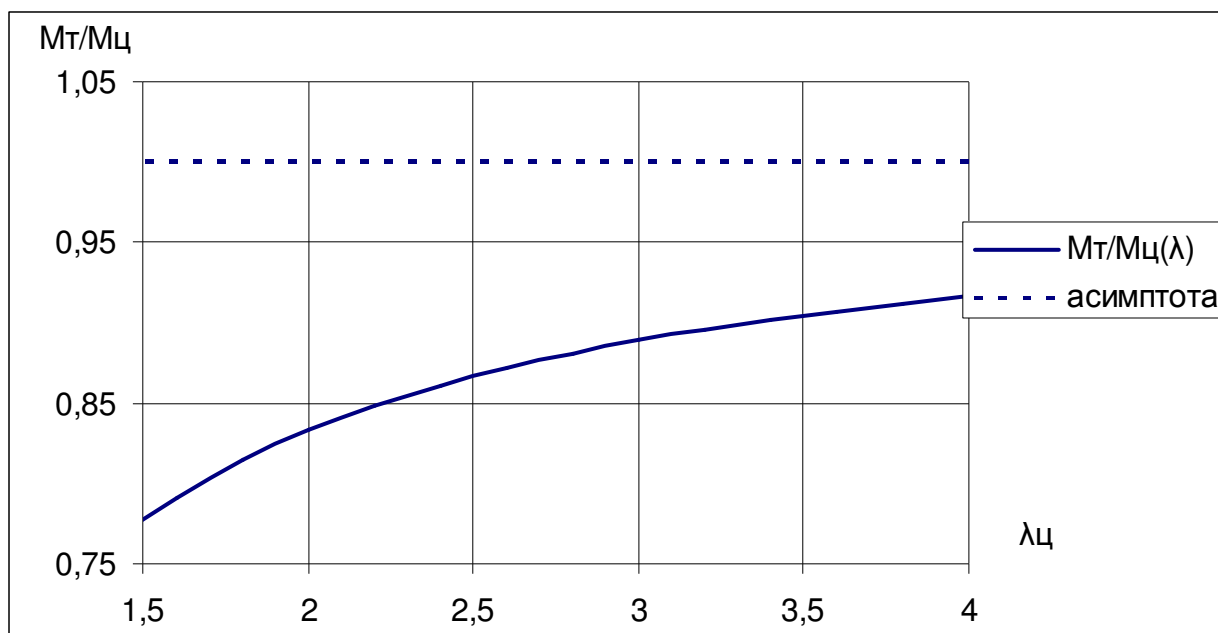


Рисунок 6 – График зависимости $M_T/M_c = f(\lambda_c)$

б) отношение массы конструкции ВАДа к массе хранящегося в нем воздуха имеет следующую величину:

- для сферического ВАДа, изготовленного из стали, – 4,12, для баллона, изготовленного из титанового сплава, – 1,95;
- для цилиндрического баллона при изменении его удлинения от 1,5 до бесконечности оно изменяется: для стального ВАДа – от 7 до 5,5, для баллона, изготовленного из титанового сплава, – от 3,36 до 2,6;
- для торового баллона, изготовленного из стали, – 5,5, для баллона, изготовленного из титанового сплава, – 2,6;

в) анализируя отношение масс конструкций рассматриваемых баллонов к массе конструкции сферического ВАДа, можно констатировать следующее:

- цилиндрический ВАД в среднем на 50% тяжелее сферического;
- торовый баллон тяжелее сферического на 33%;

г) масса конструкции торового ВАДа в среднем на 10% меньше массы конструкции цилиндрического баллона.

Поступила в редакцию 10.07.09.

*Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Н. Кобрин,
Национальный аэрокосмический университет
им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", г. Харьков*