

РАЦИОНАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ МЕТАЛЛОКОМПОЗИТНЫХ И КОМПОЗИТНЫХ БАЛЛОНОВ НА ЗАДАННЫЙ РЕСУРС

Баллоны высокого давления (БВД) широко применяются в различных технических системах (газотопливном оборудовании транспортных средств, бытовой газовой аппаратуре, средствах спасения, системах функционирования и жизнеобеспечения всех типов авиационной и ракетно-космической техники и др.). Баллоны являются неотъемлемой частью воздушно-дыхательных аппаратов, применяемых в формированиях МЧС, военизированных горноспасательных частях, подразделениях медицинской скорой помощи и медицине катастроф.

Баллоны и емкости высокого давления являются устройствами, представляющими потенциальную опасность, причинами которой могут быть: внешние механические воздействия, усталость, нарушение технологического режима, конструкторские ошибки, изменение состояния герметизируемой среды, коррозия и старение материала баллонов, неисправности контрольно-измерительных, регулирующих и предохранительных устройств, ошибки в процессе эксплуатации [1].

Для проверки прочности после изготовления и каждые пять лет все БВД обязательно подвергают гидравлическим испытаниям при пробных давлениях $P_{пр}$, превышающих расчетное $P_{раб}$ [2]:

$$P_{пр} = k \frac{\sigma_{20}}{\sigma_t} P_{раб}, \quad (1)$$

где k – коэффициент, зависящий от материала баллона и способа его изготовления ($1,25 \leq k \leq 1,6$);

σ_{20}, σ_t – допустимые напряжения для материала баллона или его элементов при 20°C и расчетной температуре.

Основным критерием оптимальности конструкции баллона является совершенство по массе, рассчитываемое по выражению:

$$\mu = \frac{P_{разр} V}{G} \rightarrow \max, \quad (2)$$

где $P_{разр}$ – разрушающее давление баллона;

V – внутренний (полезный) объем баллона;
 G – масса баллона.

При достаточно высоком внутреннем давлении напряжения в металлическом материале стенки баллона могут стать больше допустимых при любой ее толщине. Поэтому для каждого конструкционного материала существует предельное значение давления, ограничивающее применение данного материала в сосудах высокого давления [3].

Высокая нагруженность и ответственность баллонов высокого давления, отсутствие опыта проектирования и технологии изготовления являлись, по-видимому, основной причиной того, что до 80-х годов прошлого столетия подавляющее большинство баллонов изготавливались из стали несмотря на появление и эффективное применение уже в этот период полимерных композиционных материалов: стеклопластиков, органических и углеродных, имеющих значительно большие удельные характеристики прочности и жесткости, чем у металлов.

Тем не менее, перспективный и быстро развивающийся метод намотки осесимметричных конструкций нитями и лентами из армирующих стеклянных волокон уже в 60–70-х годах, получив широкое распространение в авиационной и ракетно-космической технике, позволил создать первые баллоны высокого давления из стеклопластиков.

На рис. 1 схематически приведены наиболее важные свойства материалов, используемых в авиакосмической технике.

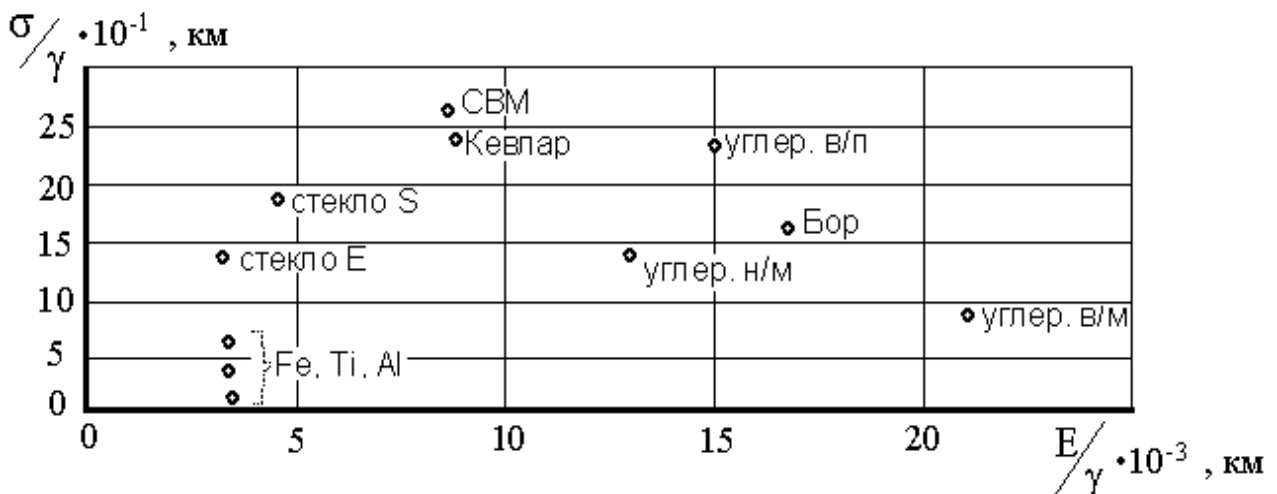


Рисунок 1 – Удельная прочность ($\frac{\sigma}{\gamma}$) и удельная жесткость ($\frac{E}{\gamma}$) различных волокнистых конструкционных материалов (в/п – высокопрочный, в/м – высокомодульный)

Свойства всех традиционных металлов лежат примерно в одной области. Свойства волокнистых конструкционных материалов (ВКМ) охватывают более широкий интервал. Это позволяет выбрать опти-

мальную комбинацию свойств для заданных условий эксплуатации.

Особенностью баллонов, работающих под давлением длительное время, является требование сохранения ими герметичности. Существующие в настоящее время армирующие материалы (АМ) и связующие обладают достаточно большой проницаемостью, кроме того, при нагружении баллона внутренним давлением (0,1...0,2 от разрушающего) происходит растрескивание связующего вдоль волокон. Поэтому для создания герметичности необходимо введение слоя из изотропного материала [4]. Этот слой может быть образован из различных материалов: резины, термопластов и металлов.

Одним из способов обеспечения герметичности является введение металлического слоя (металлокомпозитные баллоны), с одной стороны, обладающего малой проницаемостью, химической стойкостью к веществу, находящемуся внутри сосуда, с другой – позволяющего использовать металлическую оболочку (лейнер) в качестве технологической оснастки при намотке АМ. Но при эксплуатационных нагрузках за счет циклического нагружения в стенке лейнера возникают значительные деформации, приводящие к усталостному разрушению металла и потере герметичности баллона.

Чтобы полностью реализовать свойства волокон в такой конструкции, например волокон стекла, потребуется нагружать волокна до относительной деформации 0,7 %, но нет таких металлов, которые деформировались бы на такую величину и оставались при этом упругими и стойкими к усталости. Следовательно, при каждом цикле нагружения металл нагружается до некоторой пластической деформации. Далее при разгрузке слой металлической тонкостенной оболочки будет сжат. При этом не должно произойти потери устойчивости тонкого металлического слоя. Проблема может быть решена двумя способами: либо посредством использования достаточно толстой металлической оболочки [4], либо введения такого количества АМ, чтобы деформации не превышали предела устойчивости и усталости металла. Конечно, оба эти способа ведут к снижению массовой эффективности металлокомпозитных баллонов.

Следовательно, решением проблемы может быть проектирование баллонов на заданный ресурс (зависит от назначения баллона) при определенном типе АМ или выбор такого АМ, у которого деформации в рабочем диапазоне эксплуатации баллона не превышали предельных усталостных деформаций металла лейнера или применение такого материала лейнера, который не подвержен усталости при эксплуатации баллона.

В связи с этим целью данного исследования является поиск рациональной конструкции баллонов, удовлетворяющей массовому совершенству и экономической эффективности металлокомпозитных и композитных БВД, используемых в автомобилях, работающих на сжатом метане, с зарядкой не менее 15000 циклов.

1 Основы расчета конструктивных параметров композитных и металлокомпозитных баллонов

1.1 Расчет конструктивных параметров баллонов

При проектировании оболочек внутреннего давления, выполненных способом непрерывной намотки, широкое распространение нашёл метод «сеток», основы которого изложены в работе [5]. Наиболее распространённым вариантом их изготовления является спиральная намотка с кольцевым усилением цилиндрической части. Оптимальное соотношение между толщиной кольцевых (h_k) и спиральных (h_c) слоев при заданном угле армирования (φ) спиральных слоев предложено в форме

$$\frac{h_k}{h_c} = 3 \cos^2 \varphi - 1. \quad (3)$$

Напряжения в АМ спирального и кольцевого слоев при отсутствии лайнера, воспринимающего нагрузку, определяют по зависимостям:

$$\sigma_c = \frac{nPD}{4h_c \cos^2 \varphi}; \quad (4)$$

$$\sigma_k = \frac{nPD/2 - \sigma_c h_c \sin^2 \varphi}{h_k}, \quad (5)$$

где D – диаметр цилиндрической части оболочки (экватор);
 P – внутреннее давление в баллоне;
 n – коэффициент безопасности;
 h_k, h_c – значения толщины АМ в кольцевом и спиральном слоях.

Угол армирования спирального слоя определяет по выражению

$$\varphi = \arcsin \frac{d_0}{D}, \quad (6)$$

где d_0 – диаметр полюса (диаметр штуцера баллона или диаметр приставного центра на днище оболочки, где угол армирования спирального слоя равен 90° , т. е. укладка спирального слоя изменяет направление на обратное).

Учитывая, что при нагружении металлокомпозитного баллона лейнер будет воспринимать нагрузку не более чем та, что воспринята при достижении напряжений текучести в стенке лейнера, т. е. при наличии металлического лейнера, несущего часть нагрузки, в формулу (4) вместо P надо подставить значение

$$P_{\text{разр.ос}}^{\text{ам}} = P_{\text{разр}} - \frac{4\sigma_T \delta_L}{D}, \quad (7)$$

а в формулу (5) –

$$P_{\text{разр.ок}}^{\text{ам}} = P_{\text{разр}} - \frac{2\sigma_T \delta_L}{D}, \quad (8)$$

где $\frac{4\sigma_T \delta_L}{D}$ – нагрузка, воспринимаемая лейнером в осевом направлении;

$\frac{2\sigma_T \delta_L}{D}$ – нагрузка, воспринимаемая лейнером в окружном направлении;

δ_L – толщина стенки лейнера;

σ_T – предел текучести металла лейнера;

$P_{\text{разр}}$ – разрушающее давление баллона;

$P_{\text{разр.ос}}^{\text{ам}}$ – давление, воспринимаемое АМ в осевом направлении;

$P_{\text{разр.ок}}^{\text{ам}}$ – давление, воспринимаемое АМ в окружном направлении.

1.2 Определение усталостных характеристик металла лейнера

Специфика эксплуатации баллонов такова, что они за время своего ресурса работают в режиме малоциклового нагружения ($10^2 \dots 2 \cdot 10^4$). Обоснованием этого может быть следующее: баллоны для дыхательной аппаратуры пожарных должны иметь ресурс не менее 5000 заправок [6], автомобильные баллоны для газообразного топлива – 15000 заправок (стандарт США NGV-2), баллоны для летательных аппаратов – не менее 5000 заправок [7].

Удобство экспериментальной проверки несущей способности лейнера в конструкции металлокомпозитного баллона методом измерения деформаций стенки баллона потребовало испытаний образцов в деформационной постановке [8], при реализации которой плоское напряженно-деформированное состояние стенки баллона приведено к одноосному по равенству эквивалентных деформаций.

Результаты исследований и накопленный опыт ряда авторов,

обобщенные в [9], по испытанию различных металлов позволяют получить долговечность при циклическом нагружении на основе решения при однократном нагружении. Связь между амплитудой ε_a деформации и числом циклов N можно представить в виде уравнения

$$N = \left(\frac{\varepsilon_{\sigma}}{\varepsilon_a - \frac{\sigma_{-1}^0}{E}} \right)^{\frac{1}{m}}, \quad (9)$$

где ε_a – относительная деформация нулевого полуцикла;

ε_{σ} – относительное удлинение при разрыве;

m – показатель степени, зависящий от соотношения $\sigma_{0,2}/\sigma_{\sigma}$ или

выбираемый таким образом, чтобы кривая $\varepsilon = f(N)$ находилась левее экспериментальных точек;

$\sigma_{0,2} = \sigma_T$ – условный предел текучести;

σ_{-1}^0 – предел выносливости при отнулевом нагружении;

E – модуль упругости;

$\sigma_{-1}^0 = 0,28\sigma_{\sigma}$ (для металлов);

σ_{σ} – предел выносливости.

Полученные численные значения точек кривых усталости [8, 14] приведены в табл. 1 и на рис. 2.

Анализ данных табл. 1 и рис. 2 показывает, что испытанные металлы имеют достаточно широкий разброс долговечности при одинаковых относительных деформациях. Это говорит о том, что выбор металла для лайнера является немаловажным этапом при разработке конструкции баллона.

Конечно, нельзя утверждать, что предложенное в источнике [9] описание долговечности металла на основе решения при однократном нагружении универсально и приемлемо для всех металлов. Но в первом приближении на начальной стадии выбора металла этой методикой можно пользоваться.

Анализ технологических свойств и долговечностей образцов металлов показал, что алюминиевый сплав АМГ-3 и коррозионностойкая сталь 12Х18Н10Т при хорошей свариваемости и штампуемости в

наибольшей степени удовлетворяют требованиям, предъявляемым к лейнеру металлокомпозитного баллона, изготавливаемого спирально-кольцевой намоткой АМ.

Таблица 1 – Значения долговечности (N) металлов в зависимости от амплитуды относительной деформации (ε_a), вычисленные по выражению (9)

$\varepsilon_a, \%$	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0,05
Сталь 12X18H10T											
N, цикл	363	436	537	680	899	1258	1926	3441	8593	88000	∞
LgN	2,56	2,64	2,72	2,83	2,95	3,10	3,28	3,54	3,93	4,94	∞
Сталь 07X16H6											
N, цикл	125	158	206	280	408	652	1227	3270	31900	∞	∞
LgN	2,09	2,19	2,31	2,45	2,61	2,81	3,09	3,51	4,50	∞	∞
Алюминиевый сплав АМГ - 3											
N, цикл	21	26	33	43	59	90	160	403	5819	∞	∞
LgN	1,32	1,41	1,51	1,63	1,77	1,95	2,20	2,60	3,76	∞	∞
Алюминиевый сплав АМЦ-М											
N, цикл	192	231	286	364	484	682	1053	1905	4866	54822	∞
LgN	2,28	2,36	2,46	2,56	2,68	2,83	3,02	3,27	3,69	4,74	∞

Для баллонов многоразового применения в металлическом лейнере возникают усталостные трещины, нарушающие его герметичность и тем самым предопределяющие его ресурс. При этом в процессе проектирования баллонов конструктор располагает серией кривых усталости, полученных при одноосном НДС, и постулатом о том, что усталостные трещины возникают в направлении, перпендикулярном растягивающему напряжению. Таким образом, для учета влияния растягивающих деформаций в осевом ε_{oc} и кольцевом ε_k направлениях лейнера необходимо располагать одноосными деформациями растяжения, эквивалентными двухосному деформированному состоянию.

Для металлов эквивалентная деформация $\varepsilon_{экв}$ определяется выражением, полученным в работах [10,11]:

$$\varepsilon_{экв} = \sqrt{\varepsilon_{oc}^2 + \varepsilon_k^2 + 0,857 \varepsilon_{oc} \varepsilon_k} \cdot \quad (10)$$

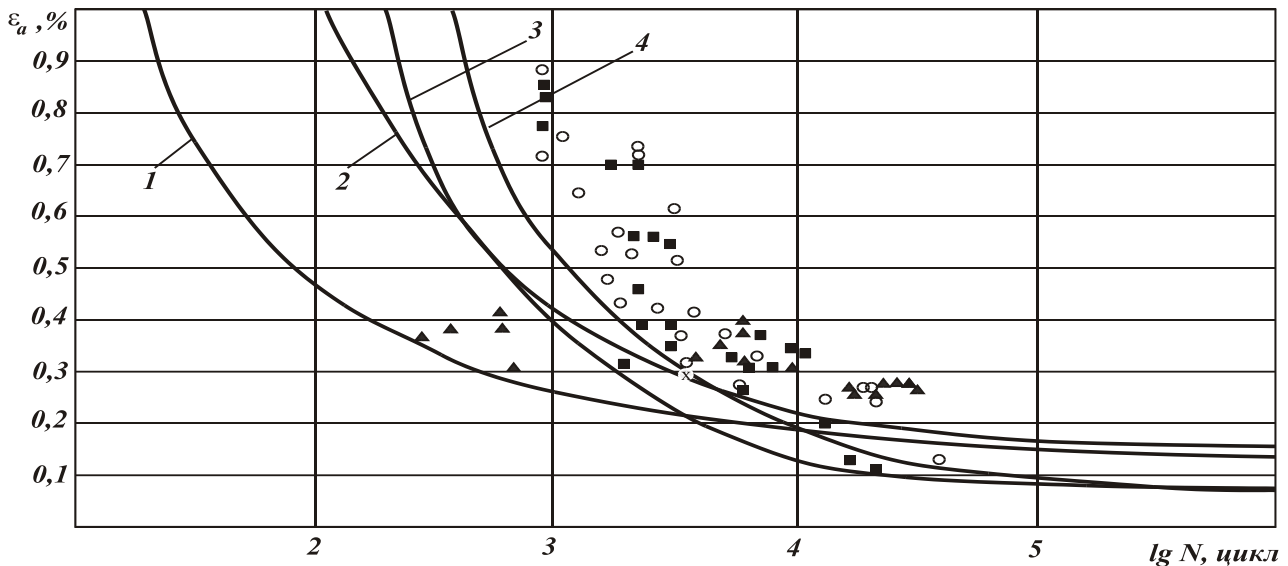


Рисунок 2 – Зависимость долговечности металлов от амплитуды относительных деформаций:

- 1 – АМг-3; 2 – 07X16H6; 3 – АМц-М; 4 – 12X18H10Т;
 о - экспериментальные значения для стали 12X18H10Т;
 □ - экспериментальные значения для алюминиевого сплава АМц-М;
 Δ - экспериментальные значения для алюминиевого сплава АМг-3;
 х - экспериментальное значение для стали 07X16H6

1.3 Определение деформаций стенки баллона

Рассматривая равновесие элемента стенки баллона, на базе стержневой модели, изготовленного намоткой спирального и кольцевого слоев армирующего материала на металлический лейнер, из очевидности, что осевую нагрузку воспринимает металл лейнера и спиральные слои, уложенные под углом $\pm\varphi_i^\circ$ к образующей, а окружную металл лейнера, кольцевые и спиральные слои, получены аналитические зависимости для определения относительных деформаций в осевом ($\varepsilon_{л}^{oc}$) и окружном ($\varepsilon_{л}^{ок}$) направлениях, причем композитные слои могут изготавливаться из различных армирующих материалов и укладываться под разными углами к образующей (многозонная намотка) [10,11]:

$$\varepsilon_{л}^{oc} = PR \left[\frac{1}{2(E_{л}h_{л} + \sum E_i^{сп} h_i^{сп} \cos\varphi_i)} - \frac{\mu}{E_{л}h_{л} + \sum E_i^k h_i^k} \right]; \quad (11)$$

$$\varepsilon_{л}^{ок} = PR \left[\frac{1}{E_{л}h_{л} + \sum E_i^k h_i^k} - \frac{\mu}{2(E_{л}h_{л} + \sum E_i^{сп} h_i^{сп} \cos^3\varphi_i)} \right]; \quad (12)$$

где P – давление в баллоне;
 R – радиус цилиндрической части;
 E_l – модуль упругости металла лейнера;
 h_l – толщина стенки металлического лейнера;
 E_i^K – модуль упругости i -го кольцевого слоя;
 h_i^K – толщина армирующего материала i -го кольцевого слоя;
 $E_i^{сп}$ – модуль упругости i -го спирального слоя;
 $h_i^{сп}$ – толщина армирующего материала i -го спирального слоя.

В зависимости от специфических требований технического задания (ТЗ), предопределяющих условия эксплуатации БВД на заданный ресурс, критерии массового совершенства и минимальной стоимости изделия могут иметь различный приоритет. Так, для изделий, применяемых в системах ЛА космического назначения, в которых стоимость эксплуатации 1 кг полетной массы несоизмеримо выше стоимости производства изделия, массовое совершенство БВД превалирует над стоимостью конструкционных материалов при равной надежности изделия.

В изделиях конверсионного назначения (транспорт, работающий на сжатом газе, воздушно-дыхательные и аппараты искусственного дыхания) критерий массового совершенства уступает критерию минимальной стоимости БВД.

Все отмеченное выше свидетельствует о рациональности независимого прогнозирования критериальных характеристик массы и стоимости БВД с последующим экспертным принятием компромиссного решения. Исходя из этого подхода, получена методика рационального проектирования металлокомпозитных БВД на заданный ресурс, заключающаяся в следующем: используя выражения (4) – (8) и задаваясь минимально технологичной толщиной стенки лейнера (из условия возможности сварки и глубокой вытяжки днищ), спроектируем баллон на статическое нагружение. Далее, используя зависимость долговечности металла, выбранного для изготовления лейнера, от амплитуды относительной деформации (выражение (9), рис. 2), согласно ТЗ на разработку баллона задаем необходимый ресурс (количество заправок баллона до рабочего давления с учетом коэффициента безопасности по усталости) и находим допускаемую относительную деформацию. Эта деформация в стенке баллона обеспечивается намоткой необходимой толщины армирующего материала в кольцевом и спиральном слоях. Варьируя параметры, входящие в выражения (11) и (12), определяем конструкцию минимальной массы, удовлетворяющую заданному ресурсу и стоимости.

2 Поиск рациональной конструкции баллона

Для принятия решения в выборе рациональной конструкции автомобильного баллона, работающего на сжатом метане, был выполнен

расчет конструкции баллона по методике, представленной выше, объемом 60 литров, диаметром 310 мм, длиной 810 мм на рабочее давление 20,4 МПа, на циклическое нагружение при давлении, превышающем рабочее на 10 % [2]. Как критерий оценки для металлокомпозитного баллона была принята эквивалентная относительная деформация, равная 0,106 %, соответствующая 15000 нагружений. Массово-ценовые характеристики баллонов определяли по выражениям, приведенным в работах [12,13].

Расчет проводился для следующих вариантов конструкций баллонов:

Вариант № 1: лайнер – сталь 12Х18Н10Т, армирующий материал – стеклонить ЕС-6.34х3Z80;

Вариант № 2: лайнер – сталь 12Х18Н10Т, армирующий материал – углеволокно УКН-5000;

Вариант № 3: лайнер – алюминиевый сплав АМг-3, армирующий материал – углеволокно УКН-5000;

Вариант № 4: лайнер – сталь 12Х18Н10Т, армирующий материал – базальтоволокно производства ООО «Технобазальт-Инвест»;

Вариант № 5: лайнер – Луполен 4261, армирующий материал – стеклонить ЕС-6.34х3Z80;

Вариант № 6: лайнер – Луполен 4261, армирующий материал – углеволокно УКН-5000;

Вариант № 7: лайнер – Луполен 4261, армирующий материал – базальтоволокно.

Ниже приведены результаты расчетов, проведенных по предложенной методике при упругопрочностных и ценовых характеристиках исходных материалов (табл. 2), а на рис. 3,4 приведены графики возможных рациональных автомобильных баллонов. В табл. 3–6 представлены полученные характеристики различных вариантов баллонов.

Таблица 2 – Характеристики материалов, используемых при проектировании металлопластиковых и композитных баллонов

Материал	Прочность σ_{θ} , МПа	Удельная масса γ , г/см ³	Линейная плотность T , текс	Модуль упругости E , ГПа	Цена C , дол./кг
Стеклонить ЕС-6.34х3Z80	1300	2,5	102	75	5,0
Углеволокно УКН-5000	2000	1,8	400	200	75,0
Базальтоволокно	1100	2,2	200	75	3,4
Сталь 12Х18Н10Т	$\sigma_{\theta}=530, \sigma_m=220$	7,92	---	210	3,0
Алюминиевый сплав АМг-3	$\sigma_{\theta}=245, \sigma_m=195$	2,8	---	0,71	3,0
Связующее ЭДТ-10	---	1,2	---	---	10
Луполен 4261	10	0,95	---	0,06	1,0

2.1 Баллоны с металлическими лейнерами

В таблицах подчеркиванием выделены значения параметров баллонов, обеспечивающих 15000 циклов нагружения.

Вариант № 1

Таблица 3 – Зависимость параметров баллонов от толщины стенки лейнера из стали 12X18H10T, армирующий материал – стеклонить ЕС-6.34x3Z80

Толщина лейнера, см	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Эквивалентная относительная деформация, %	0,223	0,196	0,175	0,158	0,144	0,132	0,122	0,114	<u>0,106</u>
Масса баллона единичной длины, г/см	1121	1197	1273	1349	1425	1501	1577	1653	<u>1728</u>
Масса материала баллона, кг	90,8	96,9	103,1	109,3	115,4	121,6	127,7	133,9	<u>139,9</u>
Цена материала баллона единичной длины, дол./см	6,293	6,521	6,749	6,977	7,205	7,433	7,661	7,889	<u>8,116</u>
Цена материала баллона, дол.	509	528	546	565	583	602	620	639	<u>657</u>
Совершенство по массе μ , км	3,96	3,71	3,49	3,29	3,12	2,96	2,82	2,68	<u>2,57</u>

Вариант № 2

Таблица 4 – Зависимость параметров баллонов от толщины стенки лейнера из стали 12X18H10T, армирующий материал – углеволокно УКН-5000

Толщина лейнера, см	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Эквивалентная относительная деформация, %	0.108	<u>0.106</u>	<u>0.106</u>	<u>0.106</u>	<u>0.106</u>	<u>0.106</u>	<u>0.106</u>	<u>0.106</u>	<u>0.106</u>
Масса баллона единичной длины, г/см	742	<u>751</u>	<u>760</u>	<u>792</u>	<u>823</u>	<u>855</u>	<u>931</u>	<u>940</u>	<u>972</u>
Масса материала баллона, кг	60,10	<u>60,83</u>	<u>61,56</u>	<u>64,15</u>	<u>66,66</u>	<u>69,25</u>	<u>75,41</u>	<u>76,14</u>	<u>78,73</u>
Цена материала баллона единичной длины, дол./см	40,07	<u>37,22</u>	<u>33,36</u>	<u>30,86</u>	<u>28,37</u>	<u>25,87</u>	<u>26,10</u>	<u>22,24</u>	<u>19,75</u>
Цена материала баллона, дол.	3245	<u>3014</u>	<u>2702</u>	<u>2499</u>	<u>2297</u>	<u>2095</u>	<u>2114</u>	<u>1801</u>	<u>1599</u>
Совершенство по массе μ , км	5,99	<u>5,92</u>	<u>5,85</u>	<u>5,61</u>	<u>5,40</u>	<u>5,19</u>	<u>4,77</u>	<u>4,73</u>	<u>4,57</u>
Массоценовой эффект $\frac{C}{\mu}$, дол./км		<u>509</u>	<u>461</u>	<u>445</u>	<u>425</u>	<u>403</u>	<u>443</u>	<u>380</u>	<u>350</u>

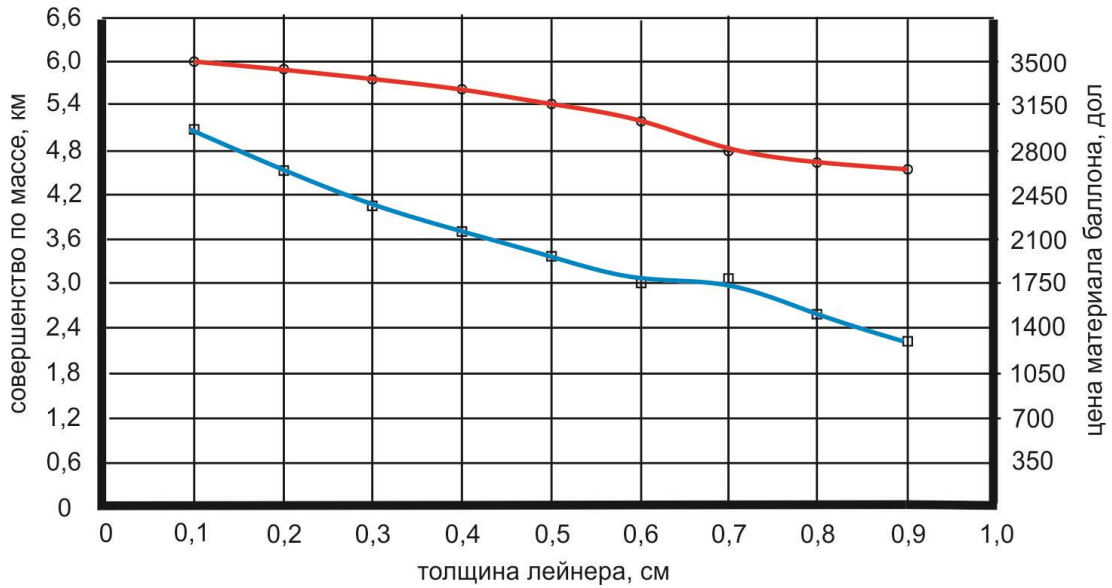


Рисунок 3 – Зависимость совершенства по массе и цены материала баллонов от толщины стенки лейнера из стали 12Х18Н10Т, армирующий материал – углеволокно УКН-5000 (верхняя кривая соответствует совершенству по массе, нижняя – цена материала)

Вариант № 3

Таблица 5 – Зависимость параметров баллонов от толщины стенки лейнера из алюминиевого сплава АМг-3, армирующий материал – углеволокно УКН-5000

Толщина лейнера, см	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Эквивалентная относительная деформация, %	0,113	0,111	0,108	<u>0,106</u>	<u>0,106</u>	<u>0,106</u>	<u>0,106</u>	<u>0,106</u>	<u>0,106</u>
Масса баллона единичной длины, г/см	693	721	748	<u>775</u>	<u>758</u>	<u>763</u>	<u>768</u>	<u>773</u>	<u>778</u>
Масса материала баллона, кг	56,13	58,40	60,59	<u>61,27</u>	<u>61,40</u>	<u>61,80</u>	<u>62,21</u>	<u>62,61</u>	<u>63,02</u>
Цена материала баллона единичной длины, дол./см	40,93	41,01	41,09	<u>41,17</u>	<u>41,25</u>	<u>37,25</u>	<u>35,97</u>	<u>34,69</u>	<u>33,41</u>
Цена материала баллона, дол.	3315	3321	3328	<u>3334</u>	<u>3341</u>	<u>3017</u>	<u>2913</u>	<u>2809</u>	<u>2706</u>
Совершенство по массе μ , км	6,41	6,16	5,94	<u>5,87</u>	<u>5,86</u>	<u>5,82</u>	<u>5,78</u>	<u>5,75</u>	<u>5,71</u>
Массово-ценовой эффект $\frac{C}{\mu}$, дол./км				<u>568</u>	<u>570</u>	<u>518</u>	<u>504</u>	<u>488</u>	<u>474</u>

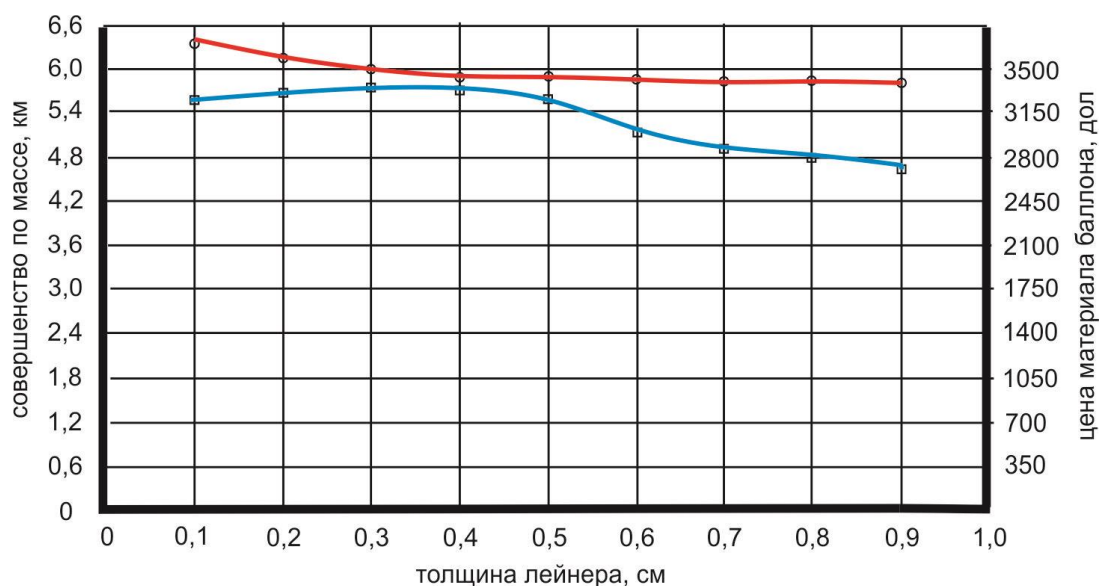


Рисунок 4 – Зависимость совершенства по массе и цены материала баллонов от толщины стенки лейнера из алюминиевого сплава АМг-3, армирующий материал – углеволокно УКН-5000 (верхняя кривая соответствует совершенству по массе, нижняя – цена материала)

Вариант № 4

Таблица 6 – Зависимость параметров баллонов от толщины стенки лейнера из стали 12Х18Н10Т, армирующий материал – базальтоволокно

Толщина лейнера, см	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Эквивалентная относительная деформация, %	0,26	0,224	0,197	0,176	0,159	0,145	133	0,123	0,114
Масса баллона единичной длины, г/см	806	882	1011	1087	1163	1239	1315	1391	1467
Масса материала баллона, кг	65,28	71,44	81,89	88,05	94,20	100,3	106,5	112,7	118,8
Цена материала баллона единичной длины, дол./см	3,816	4,044	4,271	4,499	4,727	4,955	5,183	5,411	5,639
Цена материала баллона, дол.	309,1	327,5	345,9	364,4	382,8	401,3	419,8	438,3	456,7
Совершенство по массе μ , км	5,51	5,04	4,39	4,09	3,82	3,59	3,38	3,19	3,03

2.2 Баллоны с лайнерами из луполена 4261

Варианты № 5,6,7

Расчет баллонов с лайнером из луполена выполняли при толщине стенки лайнера пять миллиметров. Толщина лайнера была выбрана из условия того, что при намотке армирующего материала лайнер находится под избыточным давлением и при этом он должен сохранять первоначальную форму. Из условия прочности на рабочее давление 20,4 МПа и при коэффициенте безопасности, равном трем, были определены параметры баллонов, представленные в табл. 7.

Таблица 7 – Параметры баллонов с лайнером из луполена

Армирующий материал Параметр	Углеволокно УКН-5000	Стеклонить ЕС-6 34х3Z80	Базальтоволокно
Толщина кольцевого слоя h_k , см	0,486	0,743	0,836
Толщина спирального слоя h_c , см	0,249	0,381	0,570
Осевая относительная деформация, %	0,22	0,39	0,278
Окружная относительная деформация, %	0,26	0,44	0,399
Эквивалентная относительная деформация, %	0,41	0,763	0,576
Масса баллона единичной длины, г/см	226,2	380,0	437,7
Масса материала баллона, кг	18,32	30,78	35,45
Цена материала баллона единичной длины, дол./см	4,99	1,98	1,84
Цена материала баллона C , дол.	404,19	160,70	149,04
Совершенство по массе μ , км	19,6	11,7	10,15
Массово-ценовой эффект $\frac{C}{\mu}$, дол./км	20,62	13,73	14,68

Примечание: из-за малых значений величины относительных деформаций стенки композитного баллона при использовании аморфного материала лайнера полиэтиленовой группы высокого давления (луполен 4261), не чувствительного к циклическим нагрузкам, баллоны выдерживают число циклов нормативного нагружения не менее 15000.

Выводы

1. Баллоны для автомобилей, работающих на сжатом метане, изготовленные намоткой стеклонити ЕС-6 34х3Z80 на стальной лайнер применять нецелесообразно, так как их совершенство по массе (2,57 км) меньше, чем аналогичных стальных (4,2 км) при высокой цене (657 дол.).

2. Баллоны, изготовленные на лейнере из стали намоткой базальтоволокна, не могут обеспечить долговечность 15000 циклов ни при каких значениях толщины лейнера.

3. Баллоны, изготовленные на лейнере из стали намоткой углеволокна УКН-5000 обладают высокой стоимостью (1599...3014 дол.) и при этом невысоким совершенством по массе (5,92...4,57 км).

4. Баллоны, изготовленные на лейнере из алюминиевого сплава АМг-3 намоткой углеволокна УКН-5000, по массовому совершенству (5,87...5,71 км) и стоимости материала (2706...3334 дол) уступают баллонам на лейнере из стали.

5. Баллоны, изготовленные на лейнере из луполена, обладают наилучшей массово-ценовой эффективностью по сравнению с металлокомпозитными. Наиболее эффективным является баллон при намотке стеклонити ЕС-6 34x3Z80 (13,73 дол/км), далее следует баллон из базальтоволокна (14,68 дол./км) и наконец, – из углеволокна УКН-500 (20,62 дол./км).

6. Методика рационального проектирования металлокомпозитных и композитных баллонов на заданный ресурс является действенным инструментом поиска рациональной конструкции баллона.

Список использованных источников

1. Безопасность жизнедеятельности: учебник для вузов / С. В. Белов, А. В. Ильницкая, А. Ф. Козьяков и др.; под общ. ред. С. В. Белова. 2-е изд., испр. и доп. – М.: Высшая школа, 1999. – 448 с.

2. Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением: утв. приказом Гос. комитета Украины по надзору за охраной труда от 13.10.94 № 104. ДиАОП. 0.00-1.07.94. – Киев: Пресса Украины, 1995. – 192 с.

3. Оболенский, Е. П. Прочность агрегатов оборудования и элементов систем жизнеобеспечения летательных аппаратов / Е. П. Оболенский, Б. И. Сахаров, Н. П. Стрекозов. – М. : Машиностроение, 1989. – 248 с.

4. Образцов, И. Ф. Оптимальное армирование оболочек вращения из композиционных материалов / И. Ф. Образцов, В. В. Васильев, В. А. Бунаков. – М.: Машиностроение, – 1977. – 144 с.

5. Васильев, В. В. Оптимальная форма оболочки вращения, изготовленной из стеклопластика методом непрерывной намотки. Прочность и устойчивость тонкостенных авиационных конструкций / В. В. Васильев, А. Н. Елпатьевский. – М.: Машиностроение, – 1971. – С. 220-227.

6. Техника пожарная. Баллоны для дыхательных аппаратов со сжатым воздухом для пожарных / Общие технические требования, Методы испытаний. НПБ 190-2000.; введ. в действие с 1.09.2000 – М. : МВД Российской Федерации

7. Баллоны для летательных аппаратов. Технические условия АПС-6601-00 ТУ. НПО «Звезда», г. Томилино, Моск. обл. 1976. – 56 с.
8. Ивановская, О. В. Экспериментальное исследование долговечности сплавов для металлокомпозитных баллонов высокого давления / О. В. Ивановская // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: темат. сб. науч. тр. Харьк. авиац. ин-та им. Н. Е. Жуковского. – Вып. 10. – Х., 1998. – С.46–49.
9. Несущая способность и расчёт деталей машин на прочность: руководство и справочное пособие / С. В. Серенсен, В. П. Когаев, Р. М. Шнейдерович; под ред. С. В. Серенсена. 3-е изд., перераб. и доп – М. : Машиностроение, 1975. – 488 с.
10. Ивановская, О. В. Расчёт деформаций на цилиндрической части металлопластикового баллона с кольцевой подмоткой / О. В. Ивановская // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Харьк. авиац. ин-та им. Н.Е. Жуковского. Х.: ХАИ. – 1997. – С. 45–48.
11. Ивановская, О. В. Расчёт деформаций стенки металлопластикового баллона со спирально-кольцевой намоткой армирующего материала / О. В. Ивановская // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Гос. аэрокосмич. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 13. – Х., 1998. – С. 57–62.
12. Ивановский, В. С. Проектирование баллонов давления из композиционных материалов : учеб. пособие по практич. занятиям / В. С. Ивановский, О. В. Ивановская. – Х.; Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т», 2016, – 60 с.
13. Ивановский, В.С. Массово-ценовая эффективность композитного баллона / В. С. Ивановский // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – Вип. 14(168), част. 1. – Луганськ, 2011 – С. 64–66.
14. Ивановский, В. С. Экспериментальное определение несущей способности металлокомпозитных баллонов / В. С. Ивановский, О. В. Ивановская // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Гос. аэрокосмич. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 12. – Х., 1998. – С. 77–80.

Поступила в редакцию 21.05.18.

*Рецензент: д-р техн. наук, проф. Я.С. Карпов,
Национальный аэрокосмический университет
им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков*