

В. И. Демичев^а, А. Ю. Сергеев^{а,б}, Т. А. Мотова^а, Л. А. Демченко^а,
К. В. Михайловский^а*

^аАО “Композит”, Королев, Московская обл., Россия

^бФедеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семенова РАН,
Москва, Россия

ПОЛИМЕР-КОМПОЗИТНЫЕ ЕМКОСТИ С ВЫСОКИМ МАССОВЫМ СОВЕРШЕНСТВОМ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ И ТРАНСПОРТИРОВКИ ГАЗОВ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

V. I. Demichev, A. Yu. Sergeev, T. A. Motova, L. A. Demchenko, and K. V. Mikhailovskii*

POLYMER-COMPOSITE VESSELS WITH A HIGH MASS PERFECTION FOR THE STORAGE AND TRANSPORTATION OF A HIGH-PRESSURE GAS

Keywords: polymer-composite vessel, liner, strength, deformability, carbon-fiber-reinforced polymer, methane

Results of a design analysis, and calculations of technological aspects of manufacturing light polymer-composite high-pressure vessels with a sealing polymer liner, supported by a strength shell based on a CFRP of Russian production, are presented. The physical and mechanical properties of the sealing liner and reinforcing shells were investigated. The materials used for the polymer composite vessel were analyzed and selected. In order to ensure the strength of the reinforcing shell, design calculations were carried out, and a method for producing a polymer-composite vessel with a high mass perfection index is proposed.

Ключевые слова: емкость полимер-композитная, лайнер, прочность, деформативность, углепластик, метан

Представлены результаты проектного анализа, расчетов и технологических аспектов изготовления легких полимер-композитных баллонов высокого давления с герметизирующим полимерным лайнером, подкрепленных силовой оболочкой на основе угле-

*Автор, с которым следует вести переписку: sergeevandrey89@gmail.com
Corresponding author: sergeevandrey89@gmail.com

пластиков российского производства. Проанализированы проблемы создания полимер-композитных баллонов. Исследованы физико-механические свойства герметизирующего лайнера и армирующей оболочки. Проанализированы и выбраны материалы для получения полимер-композитной емкости. Проведены проектные расчеты для обеспечения прочности армирующей оболочки. Предложен способ получения полимер-композитного баллона с высоким показателем массового совершенства.

Введение

В настоящее время в рамках реализации программы развития энергетики Российской Федерации актуализировались вопросы добычи, транспортировки и переработки природного газа и водорода. При использовании этих видов топлива вместо продуктов переработки нефти выброс токсичных веществ в окружающую среду снижается. В качестве альтернативного топлива для автомобилей можно использовать не только сжиженный углеводородный газ (СУГ) пропан-бутан, но и экологически чистый природный газ — метан. Кроме того, расход метана как моторного топлива в двигателе внутреннего сгорания оказывается экономичнее бензина в отличие от пропан-бутана. Существует два способа хранения природного газа на транспортном средстве: в газообразном состоянии при высоком давлении и в сжиженном состоянии при низкой температуре. Так как при атмосферном давлении плотность метана в тысячу раз ниже плотности бензина ($0,7 \text{ кг/м}^3$ метана и 700 кг/м^3 бензина), то на транспортном средстве метан хранится в специальных газовых баллонах в сжатом (компримированном) виде под давлением 20—25 МПа.

Водород удобно хранить в жидком состоянии, но это требует создания хранилищ, обладающих суперизоляцией, и специально оборудованных заправочных станций. Поэтому в настоящее время наиболее востребованным является способ хранения водорода под давлением 20 МПа и выше, не имеющий перечисленных недостатков. Сосуды высокого давления являются важным элементом автомобиля, работающего на газомоторном топливе, и заслуживают отдельного рассмотрения.

В истории развития баллонов для хранения и транспортировки газов принята их классификация на основе применяемых материалов и конструкций. Классификация включает пять основных типов конструкций: цельнометаллические (тип I), металлокомпозитные (два подтипа) (тип II и тип III), полимер-композитные (тип IV) и безлейнерные композитные баллоны (тип V).

Для характеристики массового совершенства емкостей используют показатель, измеряемый в километрах и вычисляемый в соответствии с выражением [1]

$$\mu = \frac{PV}{M},$$

где P — разрушающее давление, кгс/см²; V — объем ёмкости, см³; M — масса ёмкости, кг.

На предприятии АО “Композит” разработана и внедрена технология серийного производства металлокомпозитных баллонов (МКБ) (тип III), конструкция которых состоит из тонкого металлического лайнера, заключённого по всей поверхности в армирующую оболочку из композитного материала по типу “кокон”.

На сегодняшний день существуют различные технологии изготовления тонкостенных металлических лайнеров: раскатка, порошковая металлургия, сварка компонентов, полученных методом пластического деформирования листовых заготовок и т.д. Все эти технологии сложны и дорогостоящи, кроме того, масса металлического лайнера существенно сказывается на массе баллона в целом, поэтому такие ёмкости характеризуются относительно низким показателем массового совершенства μ (12—16 км).

Полимер-композитные баллоны, содержащие лайнер из термопластичного материала, являются альтернативным техническим решением на сегодняшний день. Лайнеры такого типа изготавливаются из модифицированного полиэтилена, кристаллизуемого полиэтилентерефталата и других полимеров методом раздувания заготовки в пресс-форме или ротационным формованием. Полимер-композитные ёмкости, содержащие лайнер из полиэтилена, имеют довольно высокие предельные деформации и стойкость к циклическим нагрузкам, что делает его наиболее перспективным материалом для разработки такого типа баллонов. Использование полимерного лайнера позволяет получать ёмкости с показателем массового совершенства $\mu = 20$ —25 км.

Цель настоящей работы — разработка способа изготовления полимер-композитного баллона с показателем массового совершенства μ не менее 20 км.

1. Постановка задачи

Полимер-композитный баллон предназначен для приема, хранения и расхода сжатого газа. Баллон состоит из внешней силовой оболочки, изготовленной с использованием полимерных композитных материалов, воспринимающих основную нагрузку от действия сжатого газа, и герметичной внутренней оболочки (лейнера) из эластичного полимера. В днищах по оси цилиндра имеются полюсные отверстия: на переднем — со специальным штуцером, на заднем — металлический фланец.

Задний фланец служит в качестве технологической заглушки и закрывает заднее полюсное отверстие в днище силовой оболочки. Передний фланец служит для крепления запорной арматуры заправочно-расходного узла (рис. 1). Технические характеристики полимер-композитного баллона следующие: общая длина (с учетом штуцера) $L = 1680 \pm 20$ мм, длина цилиндрической части $l = 1413$ мм, диаметр цилиндрической части $d = 310 \pm 10$ мм, вместимость $V = 100 \pm 0,15$ л.

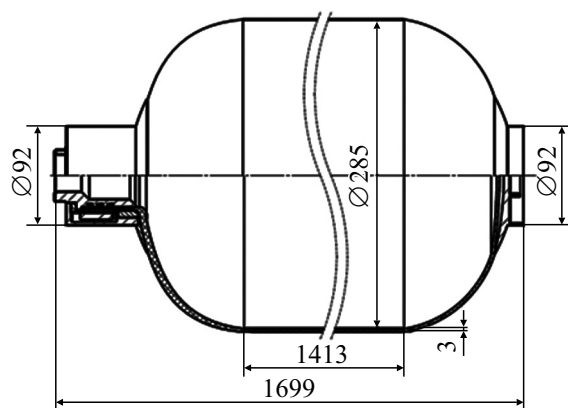


Рис. 1. Схема полимерного лайнера с запорной арматурой.

Композитную оболочку изготавливают спирально-кольцевым методом непрерывной намотки на лайнер пакетов композитной ленты.

Полимерный лайнер в конструкции выполняет одновременно роль конструктивного внутреннего герметизирующего элемента и оправки для намотки изделия и изготавливается отдельно методом ротационного формования в специальной форме. Использование лайнеров из термопластов требует специальных конструкций узлов, обеспечивающих герметизацию горловин лайнеров и металлических фланцев. Несмотря на наличие многочисленных конструктивных решений, проблема надёжного соединения термопластичного лайнера с металлическим фланцем остается актуальной. Она осложняется тем, что полиэтилен имеет высокий коэффициент температурного расширения и высокие пластические деформации, что в конечном счете в процессе эксплуатации приводит к разгерметизации соединений.

В предлагаемой конструкции (рис. 2) заправочно-расходного узла горловина лайнера по своим внутренней и наружной поверхностям

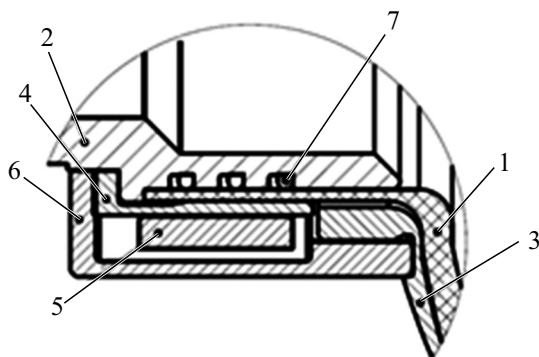


Рис. 2. Конструкция заправочно-расходного узла: 1 — полимерный лайнер; 2 — втулка-ниппель; 3 — фланец; 4 — разрезная втулка; 5 — кольцо; 6 — крышка; 7 — уплотняющие манжеты.

герметично обжата с внутренней стороны ниппелем с уплотнением (2), с наружной — двумя металлическими элементами заправочно-расходного узла, необходимого для эксплуатации баллона, — втулками: разрезной (4) и стяжной (5).

При использовании полимерного лайнера внутри баллона возникает проблема совместимости его деформирования с корпусом из композитного материала, возникающая вследствие различия их физико-механических характеристик. Эта проблема имеет свои особенности и требует дополнительных проработок и экспериментальных исследований.

Давление разрушения или разгерметизации баллона должно быть не менее 480 кгс/см².

2. Исследование и выбор материалов конструкции

2.1. Герметизирующая оболочка. *2.1.1. Анализ литературы по исследованию материалов для получения полимерного лайнера (герметизирующей оболочки).* В данной работе перед авторами стояла задача выбора материала лайнера для получения полимер-композитных баллонов исходя из анализа существующего опыта их применения.

В работе [2] рассмотрена технология изготовления емкости типа IV, рассчитанной на давление 70 МПа и содержащей металлические штуцеры, полиэтиленовый лайнер, обеспечивающий герметичность по газам, и композитный слой, обеспечивающий прочность структуры. Методом конечных элементов исследовано напряженно-деформированное состояние емкости и процесс потери устойчивости лайнера при сжатии. Авторы [3] исследовали прочность и долговечность полимер-композитных баллонов методом конечных элементов. Разработке полимер-композитной емкости типа IV посвящены работы [4—8], в которых проанализированы технологические параметры при получении пластиковых лайнеров методом ротационного формования. Сформулированы требования к термопластам для ротационного формования, приведены оптимальные режимы формования изделий: продолжительность нагрева в зависимости от размера частиц материала, скорость вращения формы и характер охлаждения для линейного полиэтилена низкой плотности. В качестве материала для лайнера использовали полиэтилен низкой плотности марки UR-644 и UR-754.

Анализ возможных причин трещинообразования полимерных материалов, применяемых для изготовления лайнеров композитных баллонов, представлен в работе [9]. Авторы справедливо отмечают, что при отсутствии адгезионной связи между лайнером и оболочкой возможна ситуация, когда предельные деформации в лайнере окажутся выше допустимых. Это совместно с действием химически агрессивных сред приведет к преждевременному растрескиванию лайнера. Авторы также указывают на возможность возникновения трещины в результате ползучести и усадки материала в зоне горловины баллона, где имеется неравномерное поле внутренних напряжений, возникающих при переработке материала

в преформу. При механическом разрушении с временной выдержкой наблюдались несквозные трещины в материале. По результатам исследований авторы сделали вывод о непригодности полиэтилентерефталата для получения лейнера в высоконагруженных баллонах (тип IV).

В научной публикации [10] приведены результаты испытаний образцов, вырезанных из пластикового лейнера, полученного методом ротационного формования полиэтилена высокой плотности. В экспериментах предел прочности при растяжении и модуль упругости снижались с повышением температуры.

Результаты исследования полиуретана и полиамида как перспективных материалов для получения лейнеров для полимер-композитных баллонов давления под водород представлены в [11]. Авторы работы [12] исследовали полимер-композитный баллон (тип IV) с лейнером из полиамида 6. Оценены кристалличность материала, физико-механические свойства. Проведены испытания на циклическую прочность баллонов. В [13] рассмотрена потеря устойчивости пластикового лейнера в составе емкости высокого давления для хранения водорода. Авторы справедливо отмечают, что в процессе хранения водорода происходит диффузия молекул газа в материал лейнера. При скорости сброса давления, превышающей скорость обратной диффузии молекул газа, при сбрасывании давления возникают напряжения в материале, которые могут стать причиной преждевременного разрушения емкости.

По результатам проведенного анализа научной литературы можно отметить, что в качестве перспективного материала лейнера для емкостей типа IV наиболее часто используется полиэтилен высокой и низкой плотности и полиамид.

В качестве основного материала лейнера для изготовления рассматриваемого баллона в настоящей работе выбран полиэтилен низкой плотности.

2.1.2. Физико-механические свойства полимерного лейнера. На предприятии “ЭкоПромСпб” были изготовлены опытные образцы лейнера из полиэтилена низкой плотности. Образцы в виде лопаток получали путем вырубki в направлении оси симметрии лейнера с использованием специального ножа. Образцы испытывали в соответствии с ГОСТ 11262—2017 при комнатной температуре. Скорость деформации в экспериментах $d\varepsilon / dt = 0,22 \text{ мин}^{-1}$. Диаграмма напряжение—деформация для участка деформации до 8% представлена на рис. 3. Результаты испытаний девяти образцов (предел прочности при растяжении σ_1^+) следующие: 1 — 17,32 МПа, 2 — 16,17, 3 — 16,20, 4 — 15,94, 5 — 17,18, 6 — 16,23, 7 — 16,54, 8 — 14,54, 9 — 15,71 МПа; среднее значение — 16,20 МПа. Результаты испытаний образцов согласуются с приведенными в работе [14].

Плотность полиэтилена определяли методом гидростатического взвешивания: $\rho = 0,93 \text{ г/см}^3$.

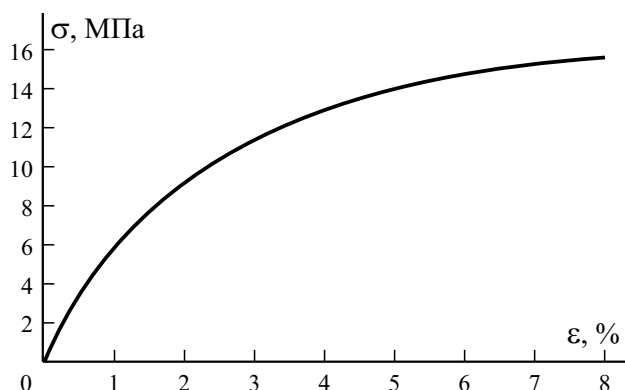


Рис. 3. Типичная диаграмма напряжение—деформация σ — ϵ для образцов, вырезанных из полимерного лайнера. Скорость деформации $d\epsilon / dt = 0,22 \text{ мин}^{-1}$.

2.2. Материалы силовой оболочки баллона. В изготовленной силовой оболочке, нагруженной внутренним давлением, доминирующим видом нагружения в каждом сечении будет двухосное растяжение [14]. В связи с этим при выборе материала важную роль играет предел прочности при растяжении вдоль волокон σ_1^+ к удельному весу материала. В силу того что конструкция баллона предусматривает наличие внутреннего полимерного лайнера, при анализе материалов в качестве базовой характеристики учитывается удельный модуль упругости рассматриваемого материала.

2.2.1. Выбор армирующего материала. Среди полимерных композитных материалов, наиболее используемых в баллонах, практическое применение нашли стекло-, органо- и углепластики.

Удельная прочность стеклопластиков на основе стеклянных волокон 90—120 км. С учетом потерь при циклическом и длительном нагружении она равна 30—45 км. Для рассматриваемого типа конструкции баллона стеклопластики практически неприемлемы из-за низкого модуля упругости — $E = 5000\text{—}7000 \text{ кгс/мм}^2$.

Удельная прочность органопластиков на основе арамидных волокон — до 250 км. С учетом эксплуатационных нагрузок удельная прочность данного материала — до 140 км; и он может быть рассмотрен в качестве армирующего материала для разрабатываемой конструкции, однако его удельный модуль упругости тоже низок — до 9000 кгс/мм^2 .

Удельная прочность углепластиков на основе высокопрочных углеродных волокон — до 280 км. С учетом потерь при циклическом и длительном нагружении она составляет до 225 км, а модуль упругости — до $30\,000 \text{ кгс/мм}^2$.

Таким образом, в качестве основного материала для рассматриваемой конструкции предполагается использование углепластика.

В настоящее время среди выпускаемых отечественной промышленностью углеродных наполнителей наилучшим сочетанием высокой

прочности и модуля упругости обладают волокна UMATEX Group (АО «Химпром инженеринг»).

Основные характеристики волокна [15]: прочность при растяжении $\sigma_1^+ = 4,9$ (490) ГПа (кгс/мм²), модуль упругости $E_1 = 260$ (26 000) ГПа (кгс/мм²), плотность $\rho = 1,78$ г/см³.

2.2.2. *Выбор связующего материала.* Для высоконагруженных силовых элементов изделий применяются, как правило, связующие на основе эпоксидных смол. Традиционно используемые до настоящего времени связующие при достаточно высокой степени реализации прочности в композитных материалах не всегда в полной мере удовлетворяют требованиям к ряду изделий по теплостойкости.

В качестве связующего для данной конструкции выбрано эпоксидное связующее марки ЭДУ ТУ ВЗ-753-92, представляющее собой продукт совмещения эпоксидно-диановой смолы ЭД-22 или ЭД-20 ГОСТ 10587—84 с алифатической смолой ДЭГ-1 ТУ 2225-027-002-03306—97 и ускорителя Алкофен МА (УП-606/2) с температурой полимеризации 80 °С.

Углепластики на основе этого связующего характеризуются более высокой теплостойкостью (сохранение прочности при 110 °С — 82—92% от исходной).

Характеристики однонаправленных углепластиков на основе углеродных волокон УМТ49-12К-ЕР (линейная плотность 760 текс, диаметр волокна 6,9 мкм) и эпоксидного связующего ЭДУ (содержание связующего 40 %) следующие: разрушающее напряжение при растяжении в направлении армирования 270—290 кгс/мм², модуль упругости при растяжении в направлении армирования 17 500—18 000 кгс/мм², $\rho = 1,53$ г/см³

Характеристики композитного материала существенно зависят от технологии его изготовления. Поэтому образцы для определения его характеристик должны быть изготовлены по той же технологии, что и изделие.

В силу того что корпуса баллонов давления изготавливают методом намотки, целесообразно определять прочность волокна и ее реализацию в изделии по результатам испытаний микропластиков и кольцевых образцов. Испытания микропластиков (пять образцов) проводили в соответ-

Табл. 1

Результаты испытаний микропластика

Показатель	Образец					Среднее значение
	1	2	3	4	5	
Линейная плотность, текс	750					-
Плотность волокна, г/см ³	1,78					-
Разрывная нагрузка при растяжении, кН	1,875	1,847	1,833	1,866	1,879	1,860
Разрушающее напряжение при растяжении, ГПа	4,45	4,39	4,25	4,43	4,46	4,40

Табл. 2

Результаты испытаний образцов в виде колец

Образец	Толщина	Ширина	Площадь поперечного сечения, мм ²	Разрывная нагрузка, кН	Прочность, ГПа	Модуль упругости, Е, ГПа
1	1,07	10,95	11,72	44,40	1,89	181,0
2	1,07	10,89	11,65	43,16	1,85	182,0
3	1,01	10,92	11,03	44,28	2,01	193,0
4	1,07	10,96	11,73	41,60	1,77	170,0
5	1,17	10,92	12,78	40,14	1,57	166,0
6	1,11	10,91	12,11	39,56	1,63	195,0
7	1,12	10,95	12,26	41,46	1,69	173,0
8	1,14	10,92	12,45	43,97	1,77	160,0
Среднее значение	1,10	10,93	11,97	42,32	1,77	177,5

ствии с ГОСТ 6943.10—2015 и ASTM D 4018-99, испытания колец — в соответствии с ГОСТ 25.603—82. Результаты испытаний представлены в табл. 1, 2.

3. Проектирование и расчёт силовой оболочки полимер-композитного баллона

Исходные данные:

- эксплуатационное давление (рабочее) $P_{\text{work}} = 200 \text{ кг/см}^2$,
- коэффициент безопасности (требуемый запас прочности) $f = 2,4$,
- длина цилиндрической части $L = 1413 \text{ мм}$,
- радиус цилиндрической части $a = 142,5 \text{ мм}$,
- радиус полюсного отверстия $r_0 = 46 \text{ мм}$.

Физико-механические характеристики силовой оболочки:

- разрушающее напряжение при растяжении в направлении армирования в кольцевых слоях $\sigma_r = 1,77 \text{ ГПа}$ (177 кгс/мм^2),
- разрушающее напряжение при растяжении в направлении армирования в спиральных слоях $\sigma_h = 1,46 \text{ ГПа}$ (146 кгс/мм^2),
- модуль упругости материала при растяжении в направлении армирования $E_1 = 177,5 \text{ ГПа}$,
- линейная плотность жгута $T = 750 \cdot 10^{-6} \text{ г/мм}$,
- объемная плотность волокна $\gamma = 1,78 \cdot 10^{-3} \text{ г/мм}^3$,
- плотность углепластика $\rho = 1,53 \cdot 10^{-3} \text{ г/мм}^3$,
- массовое содержание связующего $\varphi_m = 0,4$.

Основные параметры баллона давления, определяемые в проектировании, — контуры днищ силовой оболочки, углы армирования и количество армирующего материала.

В случае комбинированного баллона форма днищ углепластиковой оболочки определяется формой днищ полимерного лейнера, являющегося составной частью баллона и используемого в качестве оправки для намотки углепластиковой оболочки.

Для указанных исходных данных намотка производится по линиям с геодезическим отклонением. Угол укладки армирующего материала на экваторе днища находим из условия геодезического расположения нити (жгута) армирующего материала по поверхности днища

$$\varphi_0 = \arcsin \bar{r}_0 \approx 19^\circ,$$

где \bar{r}_0 — относительный радиус полюсного отверстия баллона, определяемый по формуле

$$\bar{r}_0 = \frac{r_0}{a} = \frac{46}{142,5} \approx 0,32.$$

Намотка силовой оболочки производится углеродной жгутовой лентой (ширина ленты 18 мм).

3.1. Расчет прочности и жесткости силовой оболочки корпуса. Толщину монослоя намоточного углепластика δ (мм) (кольцевого слоя и элементарного спирального слоя у экватора днища) находим по формуле

$$\delta = \frac{nT}{B\rho(1-\varphi_m)},$$

где n — количество жгутов в ленте, шт.; T — линейная плотность жгута, текс; B — ширина ленты, мм; ρ — плотность сухого жгута, г/см³.

Проектные толщины силовой оболочки рассчитываем по формулам, приведённым в [14]:

— общая толщина спиральных слоев на экваторе днища равна

$$h_h = \frac{fP_{\text{work}}a}{2\sigma_h \cdot \cos^2\varphi},$$

где f — коэффициент безопасности (требуемый запас прочности); φ — угол укладки армирующего материала на экваторе днища.

— общая толщина кольцевых слоев на цилиндрической части оболочки равна

$$h_r = h_h (3\cos^2\varphi - 1).$$

Результаты расчета следующие: $n = 6$ шт., $T = 760$ текс, $B = 18$ мм, $\rho = 1,53$ г/см³, $\delta_h = \delta_h = 0,27$ мм, $h_h = 3,28$ мм, $h_r = 5,5$ мм.

3.2. Проверочный расчет напряжений для выбранных фактических толщин. При проведении расчетов принято, что в сосуде при действии

внутреннего давления реализуется безмоментное напряженно-деформируемое состояние. Напряжения в ленте при расчетном давлении:

— напряжение в спиральном слое в произвольной точке меридиана дна определяем как

$$\sigma_h = \frac{fP_{\text{work}}a}{2h_h \cdot \cos^2\varphi},$$

— напряжения в кольцевых слоях материала на цилиндрической части оболочки — как

$$\sigma_r = \frac{fP_{\text{work}}a - \sigma_h h_h \cdot \sin^2\varphi}{h_r}.$$

Результаты расчета следующие: $\sigma_h = 116$ кгс/мм², $\sigma_r = 117$ кгс/мм², запас прочности в спиральных слоях $\eta_h = 1,26$, $\eta_r = 1,50$.

3.3. Жесткостные характеристики и деформативность баллона. В рамках жесткостного расчета определяем деформации и перемещения цилиндрической части баллона, деформативность которой существенно превосходит деформативность дна. Сначала вычисляем жесткость углепластиковой цилиндрической части по формулам

$$B_{11} = Eh_h \cdot \cos^4\varphi,$$

$$B_{12} = Eh_h \cdot \cos^2\varphi \sin^2\varphi,$$

$$B_{22} = Eh_h \cdot \sin^4\varphi + Eh_r.$$

Осевая и окружная относительные деформации цилиндрической части ε_0 и ε_r определяем как

$$\varepsilon_0 = fP_{\text{work}}a \frac{0,5B_{22} - B_{12}}{B_{11}B_{22} - B_{12}^2},$$

$$\varepsilon_r = fP_{\text{work}}a \frac{B_{11} - 0,5B_{12}}{B_{11}B_{22} - B_{12}^2}.$$

Максимальные радиальные перемещения баллона W и осевое удлинение U его цилиндрической части длиной L определяем по формулам

$$W = \varepsilon_r a,$$

$$U = \varepsilon_0 L.$$

Результаты расчета следующие: $P_{\text{calc}} = 4,8$ МПа, $\varepsilon_0 = \varepsilon_r = 0,0066$, радиальное перемещение точек цилиндрической части 0,94 мм, осевое удлинение цилиндрической части 9,3 мм.

Общий вес баллона с углепластиковым усилением и заправочно-расходным узлом 23 кг, коэффициент массового совершенства конструкции $\mu = 21$ км.

4. Технология производства полимер-композитного баллона с высоким массовым совершенством

Для изготовления силовой оболочки баллона выбран способ “мокрой” намотки по схеме спирально-кольцевой намотки на 5-координатном одношпиндельном станке РПН-Н-600, оборудованном системой ЧПУ. Технологический режим формования оболочек методом “мокрой” намотки определяют параметрами, обуславливающими качество производимых изделий. К ним относятся технологическое натяжение ленточного полуфабриката при намотке, контактное давление формования (контактное давление на наматываемую поверхность), температура ленточного полуфабриката.

Технологическое натяжение предназначено для создания натяжения в гибкой винтовой системе формируемой оболочки с целью придания ей конструктивной жесткости и прочности. Значение натяжения для углепластиков лежит в диапазоне $q_t = (0,02—0,07) \cdot q_{fr}$ (q_{fr} — разрушающая нагрузка на ленту). В нашем случае натяжение наполнителя равно 2,5 кгс/нить.

Контактное формование предназначено для создания натяга в технологической системе оболочка—оправка. Контактное давление обеспечивает уплотнение наматываемой структуры, заданную ей плотность, отжим избытка связующего и не должно быть ниже 0,049 МПа.

Оптимальная температура формования зависит от рецептуры применяемого связующего, его технологического состояния и скорости намотки. В экспериментах температура переработки связующего была равной 35 ± 5 °С, скорость подачи ленточного полуфабриката 24 м/мин, время отверждения связующего ЭДУ и композитных материалов на его основе

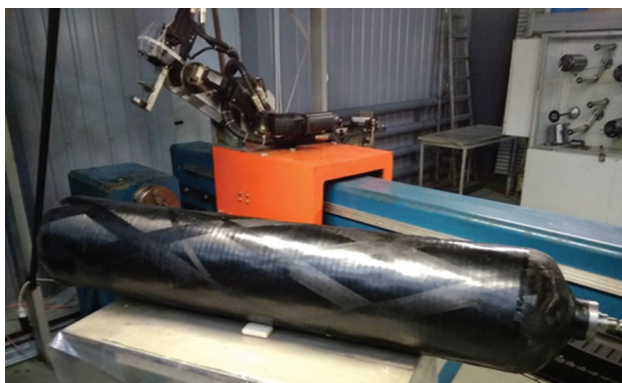


Рис. 4. Полимер-композитный баллон (тип IV).

(при толщине стенки до 5 мм) при 80 °С составляло 8—10 ч. Полученный образец баллона высокого давления представлен на рис. 4.

Заключение

В результате проведенных исследований произведен выбор материалов для получения полимер-композитных баллонов (тип IV) для хранения и транспортировки сжатого газа — метана. В качестве армирующего материала выбрано углеродное волокно UMT49-12K-EP, в качестве связующего — эпоксидное связующее марки ЭДУ. Предложена конструкция герметичного заправочно-расходного узла. Произведен расчет толщины спиральных и кольцевых слоев. Установлено, что предельные деформации оболочки не превышают предельные деформации полимерного лайнера, что гарантирует высокую стойкость к знакопеременным нагрузкам. Коэффициент массового совершенства баллона объемом 100 л для хранения метана под давлением 200 кгс/см² равен 21 км.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Турусов Р. А., Сергеев А. Ю., Мемарианфард Х. Проблемы герметичности намоточного композита при формировании емкости с высоким массовым совершенством // Сб. тез. III Междунар. конф. “Деформирование и разрушение композитных материалов и конструкций”. Москва, 23—25 октября, 2018.
2. Zhang Q., Hu Hui, Jia X. et al. Design of a 70 MPa type IV hydrogen storage vessel using accurate modeling techniques for dome thickness prediction // Compos. Struct. — 2020. — Vol. 236. — P. 111915.
3. Ma K., et al. Effects of crack position on fatigue life of large seamless storage vessels made of 4130X for hydrogen refueling station. // Int. J. Hydrogen Energy. — 2019. — Vol. 44. — P. 22559—22568.
4. Igumenov M. S., Lavrov N. A. Adhesion of linear low-density polyethylene and oligomers // Polymer Sci. Ser. D. — 2017. — Vol. 10, No. 1. — P. 55—58.
5. Lavrov N. A., Igumenov M. S. A technique for production of high-pressure vessel from polymer composite materials // Polymer Science. Ser. D. — 2018. — Vol. 11, No. 1. — P. 113—116.
6. Igumenov M. S., Lavrov N. A. Features of the rotational moulding of thermoplastics // Journal: International Polymer Science and Technology. — 2017. — Vol. 44, No. 10. — P. 39—45.
7. Лавров Н. А., Игуменов М. С. Сосуд высокого давления из полимерных композитных материалов // Пласт. массы. — 2018. — № 5—6. — С. 45—47.
8. Лавров Н. А., Игуменов М. С. Технология производства сосудов высокого давления из полимерных композитных материалов // Все материалы. Энциклопедический справочник. — 2017. — №7. — С.19—23.
9. Калинин А. Н., Лебедев И. К., Мороз Н. Г. Эксплуатационные особенности конструкций композитных баллонов с полимерным лайнером // Аграр. науч. журн.- 2018. — № 12. — С. 58—62.

10. *Mahl M., Jelic C., Baier H.* Thermo-mechanical behavior of polyethylene under mechanical loads at cryogenic and elevated temperatures // *Int. J. Pressure Vessels and Piping*. — 2017. — Vol.150. — P. 11—18.

11. *Dao D. Q., Luche J., Bustanante-Valencia L.* Polyamide 6 and polyurethane used as liner for hydrogen composite cylinder: an estimation of fire behaviors // *Fire Technol.* — 2016. — Vol. 52. — P. 397— 420.

12. *Wang D., Liao B., Hua Z., Gu C.* Experimental analysis on residual performance of used 70 MPa type IV composite pressure vessels // *J. Failure Analysis Prevention*. — Vol.19(7) DOI: 10.1007/s11668-019-00581-6

13. *Yersak T. A., Baker D. R., Yanagisawa Y. et al.* Predictive model for depressurization - induced blistering of type IV tank liners for hydrogen storage // *Int. J. Hydrogen Energy*. — 2017. — Vol. 42. — P. 28910—28917.

14. *Образцов И. Ф., Васильев В. В., Бунаков В. А.* Оптимальное армирование оболочек вращения из композитных материалов. — М.: Машиностроение, 1977. — 144 с.

15. URL: [TDS_Umatex UMT49-12K-EP_ru.pdf](#)

Поступила в редакцию 21.04.2021

Окончательный вариант поступил 09.07.2021

Received Apr. 21, 2021 (July 9, 2021)
