

Авиационная и ракетно-космическая техника

УДК 621.642.17

Конструктивно-технологические особенности создания металлокомпозитных баллонов для транспортных средств, работающих на водороде

К.Н. Лебедев, Н.Г. Мороз, И.К. Лебедев

ООО «САФИТ»

Design technological features of creating the metal-composite cylinders for the hydrogen powered vehicles

K.N. Lebedev, N.G. Moroz, I.K. Lebedev

LLC SAFIT

Приведены преимущества водорода перед другими видами топлива при его использовании в качестве рабочего тела двигателей и энергетических установок. Рассмотрены варианты применения водорода в электроприводных системах с водородными топливными элементами, в двигателях внутреннего сгорания, ракетах и гиперзвуковых летательных аппаратах. В этих двигателях предусмотрено наличие накопителей — либо металлгидридных, либо баллонов давления со сжатым или криосжатым водородом. Изложены результаты создания сверхлегких металлокомпозитных баллонов высокого давления для газообразного сжатого до 35...70 МПа, криосжатого и сжиженного водорода. Приведены результаты разработок уникальных конструктивных и технологических решений по созданию сверхлегких металлокомпозитных баллонов высокого давления с тонкостенной сварной металлической герметизирующей оболочкой и силовой оболочкой из высокопрочного углепластика. Разработано уникальное технологическое оборудование для производства и испытаний таких металлокомпозитных баллонов высокого давления, включающее в себя роботизированный комплекс для высокоточного позиционирования и микроплазменной сварки из тонколистовых (0,3...1,0 мм) заготовок (Ti, Al, нержавеющая сталь). При проектировании наряду со статическим применен ресурсный подход к определению оптимальных параметров конструкции баллона. Приведены результаты сравнения параметров композитных баллонов отечественных и зарубежных производителей, а также результаты проектирования и разработки металлокомпозитных баллонов для хранения, использования и транспортирования водородного топлива в сжатом до 70 МПа, сжиженном и криосжатом видах. Показан пример применения разработок для беспилотных летательных аппаратов.

EDN: NSSCVJ, <https://elibrary/nsscvj>

Ключевые слова: баллоны высокого давления, сжатый водород, стальной лейнер

The paper presents advantages in introducing hydrogen as a fuel and working fluid in the engines and power plants. It considers options for using hydrogen in the electric drive systems with hydrogen fuel cells, internal combustion engines, rockets and hypersonic aircraft. These engines are equipped with either metal hydride accumulators or pressure cylinders with the compressed or cryogenically compressed hydrogen. The paper provides results of creating the ultra-light metal-composite high-pressure cylinders for the gaseous hydrogen compressed to 35...70 MPa, cryogenically compressed and liquefied hydrogen. Results are presented of developing the unique design technological solutions in creation of the ultra-light metal-composite high-pressure cylinders with a thin-walled welded metal sealing shell and power shell made of the high-strength carbon fiber. Unique technological equipment is developed for production and testing of such high-pressure metal-composite cylinders. It includes a robotic system for high precision positioning and micro-plasma welding from the thin-sheet (0.3...1.0 mm) blanks (Ti, Al, stainless steel). The resource approach was applied in design to determine the cylinder optimal parameters along with the static approach. The paper presents results of comparing parameters of the composite cylinders from domestic and foreign manufacturers, as well as results of designing and developing the metal-composite cylinders for storage, use and transportation of the hydrogen fuel in the compressed up to 70 MPa, liquefied and cryogenically compressed forms. An example of using the developments in an unmanned aerial vehicle is provided.

EDN: NSSCVJ, <https://elibrary/nsscvi>

Keywords: high-pressure cylinders, compressed hydrogen, steel liner

В последние годы во всем мире резко возрос интерес к созданию транспортных средств с использованием водородного топлива.

Водород — газ с самой низкой молярной массой, большим хладоресурсом и высоким коэффициентом диффузии, т. е. хорошо смешивается с любыми другими газами. Это самый распространенный элемент на Земле [1]. Водород — уникальное горючее (или рабочее тело) для двигателя любого транспортного средства [2]. По сравнению с другими видами топлива водород имеет следующие преимущества:

- самая высокая теплота сгорания; один килограмм бензина выделяет 45 МДж теплоты, а сжигание такого же количества водорода — 120 МДж;
- широкие пределы воспламенения; можно воспламенить как очень бедную топливно-воздушную смесь, так и очень богатую; предел воспламенения смеси водорода с воздухом составляет 0,2...10,0 ед., в то время как у бензиново-воздушной смеси коэффициент избытка воздуха — 0,7...1,2;
- самая высокая скорость сгорания; этот параметр очень важен с точки зрения достижения необходимых характеристик двигателя, в частности эффективной работы в цикле; в одном и том же двигателе скорость сгорания водорода будет примерно в 3 раза выше, чем у бензиново-воздушной смеси.

В транспортных системах планируется использовать водород для питания: электропри-

водов с водородными топливными элементами; двигателей внутреннего сгорания (ДВС) в качестве единственного горючего и в сочетании с бензином, дизельным топливом или метаном; ракетных двигателей с криогенными водородными и кислородными баками.

В электроприводных транспортных средствах [3] источниками электроэнергии предлагается сделать водородные топливные элементы, где водород и кислород вступают в анодно-катодную реакцию с участием катализатора, в результате которой освобождающиеся электроны притягиваются к аноду

Водородный ДВС — по сути, усовершенствованная версия бензинового ДВС с похожей системой подачи и впрыска топлива и искровым зажиганием. Только в данном случае водородный ДВС питается чистым водородом или в сочетании с бензином, дизельным топливом или метаном, выделяя в качестве побочного продукта воду и водяной пар.

Криогенные компоненты (кислород, водород, метан) позволяют получать самые высокие значения удельного импульса среди доступных химических ракетных топлив [4], и они являются экологичными. Однако водород имеет низкую плотность, что требует создания крупных топливных баков.

Для увеличения плотности горючего и уменьшения потерь на испарение в современной ракетной технике предполагается использовать охлажденный до температуры минус 259,14 °C

зашугованный водород, т. е. находящийся в состоянии, где одновременно присутствуют две фазы — жидкая и твердая в виде крупнодисперсной взвеси. Низкая температура, при которой должны находиться криогенные компоненты, требует особого выбора материалов и конструкции топливных баков и двигателей.

В настоящее время активно осваиваются гиперзвуковые летательные аппараты [5]. Для достижения гиперзвуковых скоростей требуется топливо с высокой теплотворной способностью, низкой молекулярной массой продуктов сгорания и большим хладоресурсом.

Этим требованиям отвечает водород, способный поглощать в 30 раз больше теплоты, чем керосин. При нагревании от минус 253 до 900 °С (температура на входе в ДВС) один килограмм водорода может поглотить более 4000 ккал. Омывая изнутри обшивку летательного аппарата перед поступлением в камеру сгорания, жидкий водород поглощает всю теплоту, выделяемую при разгоне летательного аппарата до скорости, в 10–12 раз превосходящей скорость звука в воздухе.

Использование таких двигателей предусматривает наличие накопителей — либо металлгидридных (МГН), либо баллонов давления со сжатым или криосжатым водородом. МГН представляет собой конструкцию из сплава двух разнородных металлов (например, железа и титана или никеля и магния), которая способна в определенных условиях задерживать водород (хранить молекулы газа внутри своей кристаллической решетки) и выделять его при нагреве, например, с помощью отработавших газов. Однако МГН используются редко ввиду недостаточной отработки и дороговизны (так как содержат драгоценные и редкоземельные металлы). Кроме того, они большие по массе и габаритным размерам.

В настоящее время для компримированного газа некоторые отечественные [6] и зарубежные фирмы [7] разрабатывают по квалификации ООН [8] баллон четвертого типа с полимерным лейнером, который показывает и высокую весовую эффективность изделия, и технологичность его производства. Однако у этого баллона есть существенные недостатки из-за использования полимеров в качестве лейнера. Общим недостатком полимерных материалов является их деструкция в контакте с газами и жидкостями, связанная с явлением диффузии среды в полимер.

Суть явления состоит в том, что, проникая в материал за счет диффузии и молярного переноса по дефектам структуры полимера, среда способствует повышению подвижности структурных элементов, выступая в качестве смазки, что способствует разрыву связей в макромолекулах полимера, разрыхлению и охрупчиванию его структуры, появлению локальных трещин. Описанный процесс обычно называют коррозионным растрескиванием полимеров, и он один из самых распространенных типов разрушения полимеров, определяющих области их использования.

Кроме того, при циклическом нагружении происходит разрушение полимеров в силу так называемого кессонного эффекта. Среда при повышенном давлении диффундирует в структуру полимера, а после снятия нагрузки давление продиффундировавшей внутрь полимера среды разрывает полимер. Еще одной проблемой применения баллонов четвертого типа для водорода является более высокая, чем у металлического лейнера, газопроницаемость полимерного.

Цель работы — создание сверхлегких металлокомпозитных баллонов высокого давления (МКБ ВД), стойких к хранению водорода в сжатом и криогенном состояниях, предназначенных к использованию в транспортных средствах, работающих на водороде.

Рассмотрим результаты создания МКБ ВД для газообразного сжатого до 35...70 МПа, криосжатого и сжиженного водорода.

Специалистами ООО «Сафит» на основе современных методов проектирования [9–11] разработаны уникальные конструктивные и технологические решения по созданию сверхлегких МКБ ВД с тонкостенной сварной металлической герметизирующей оболочкой и силовой оболочкой из высокопрочного углепластика. Сконструировано уникальное технологическое оборудование для производства и испытаний МКБ ВД, включающее в себя роботизированный комплекс для высокоточного позиционирования и микроплазменной сварки тонколистовых (0,3...1,0 мм) заготовок (Ti, Al, нержавеющая сталь).

Такой баллон, строго говоря, выпадает из существующей классификации баллонов [8]. По сущности восприятия нагрузки его следовало бы отнести к четвертому типу, так как лейнер воспринимает, как правило, менее 5 % нагрузки. Но четвертый тип включает в себя только

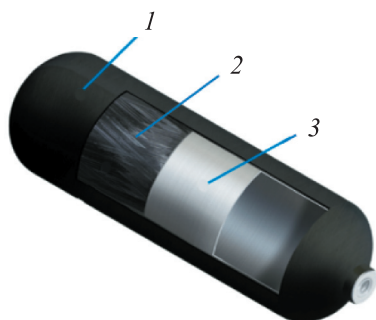


Рис. 1. Внешний вид баллона ООО «Сафит»

неметаллические материалы лайнера. То, что лайнер стальной, служит формальным основанием для его отнесения к типу КПП-3, так как по третьему типу металлические корпуса должны выдерживать нагрузку вместе с армирующими элементами. В рассматриваемой конструкции нагрузку несет композитная силовая оболочка, являющаяся основным корпусом баллона. Это требует корректировки нормативной документации на уровне правил ООН.

Внешний вид баллона ООО «Сафит» показан на рис. 1. Здесь композитный слой 1 — армирующий слой из углеродного волокна, способный выдерживать самые высокие (без ограничений) рабочие давления и гарантирующий высокую эффективность. Защитный слой 2 — верхний слой из стекловолокна, обеспечивающий надежную защиту армирующего углеродного слоя от внешних механических воздействий. Стальной лайнер 3, выполненный тонкостенным (0,5...1,0 мм) из коррозионно-стойкой стали, имеет низкую массу обеспечивает высо-

кую надежность, безопасность и наименьшую газопроницаемость.

Применение коррозионно-стойких сталей в качестве лайнера идеально подходит для сжатого и криосжатого водорода. Согласно справочнику нефтехимика [12], водородное охрупчивание отсутствует при использовании легированных сталей с содержанием хрома не меньше 12 %, например 12X18H10T (AISI 321), даже при температуре 600° С и давлении до 80 МПа.

Разработана технология ресурсного проектирования, в соответствии с которой оптимальные параметры конструкции баллона определяет не только прочность при однократных статических нагрузках, но и ресурс эксплуатации, что подтверждено экспериментальными исследованиями [13, 14].

Для прогнозирования циклической долговечности композиционного баллона предлагается подход по деформациям на базе формулы Коффина — Менсона [13]. Он включает в себя следующие этапы:

- предварительный расчет напряженно-деформированного состояния баллона и определение диапазонов изменения основных параметров материала лайнера при циклическом нагружении;
- экспериментальное определение характеристик материала в выявленных ранее диапазонах;
- построение аппроксимирующей зависимости числа циклов до разрушения от размаха деформаций и коэффициента асимметрии, и ее использование в уточненных расчетах циклической долговечности;

Таблица 1

Расчетные параметры композитных баллонов отечественных и зарубежных производителей

Производитель	Тип композита	Объем, л	Масса, кг	Гравиметрическая емкость	
				кВт·ч/кг	%
ООО «Сафит»	III	42	19,0	1,8	5,3
		100	41,4	1,9	5,8
		200	80,8	2,0	6,0
Fauricia	IV	320	142,4	1,7	5,2
Luxfer	III	42	26,6	1,3	3,8
		94	50,6	1,5	4,5
		202	99,9	1,6	4,9
		318	145,7	1,8	5,3
ООО «НПФ «Реал-Шторм (40 МПа)	III	50	47,5	1,0	3,0
		100	84,8	1,1	3,3
		185	157,3	1,1	3,3

Таблица 2

Результаты проектирования баллонов компримированного водорода для автотранспорта

Диаметр лейнера, мм	Объем баллона, л	Рабочее давление, МПа	Масса бал- лона, кг	Масса водо- рода, г	Отношение массы водорода к массе баллона, %	Масса углепла- стика, кг	Заданный ресурс — число циклов
265	50	52	27,9	1710,8	5,96	14,7	5500
265	48	70	30,1	1938,2	5,13	22,0	5300
265	50	52	31,1	1663,8	5,35	17,0	7500
265	47	70	41,00	1897,8	4,63	24,3	7500
361	82	52	46,0	2805,7	6,00	26,1	5500
361	77	70	62,1	3109,2	5,0	38,0	5100
361	65	52	37,5	2224,0	5,93	21,4	5500
361	60	70	50,0	2422,7	4,85	30,2	5100

- построение аппроксимирующей зависимости числа циклов до разрушения от размаха деформаций с учетом температурной зависимости;
- построение аппроксимирующей зависимости числа циклов до разрушения от размаха деформаций с учетом коррозионной зависимости.

Результаты сравнения расчетных параметров композитных баллонов отечественных и зарубежных производителей указаны в табл. 1. Расчеты весовой эффективности проведены для давления 35 МПа. Весовая эффективность баллонов ООО «Сафит» находится на уровне лучших мировых аналогов и даже превосходит их, в то время как другие российские производители значительно уступают мировому уровню.

Результаты проектирования баллонов компримированного водорода для автотранспорта приведены в табл. 2.

Согласно данным табл. 2, при повышении рабочего давления с 52 до 70 МПа масса водорода увеличивается на 11 %. Однако необходимо учитывать, что при этом уменьшается гравиметрическая емкость и более чем на 30 % возрастает масса углепластика, которая является основным параметром, определяющим цену материалов баллона [15].

Внешний вид водородного баллона ООО «Сафит» объемом 6,8 л, установленного на беспилотный летательный аппарат (БПЛА) разработки Московского физико-технического института, показан на рис. 2.

Если водород сжать до давления 20 МПа, то в одном литре будет всего 16 г вещества. Это значит, чтобы иметь достаточный запас топлива на борту автомобиля, надо возить с собой баллоны очень большого объема (фактически придется возить только их).

Есть другой вариант — криогенные технологии. После сжижения в одном литре объема вместится 70 г вещества. Однако водород в жидком виде существует в очень узком диапазоне температуры — от минус 252,87 до 259,14 °С, что близко к температуре абсолютного нуля. Чтобы сохранять водород при такой температуре, необходима высокотехнологичная криогенная емкость с уникальной тепловой изоляцией. Схемы криогенных баллонов с вакуумной теплоизолирующей полостью и испарительной системой приведены на рис. 3, а и б.

На рис. 3, а схематично показана емкость, в которой между наружной оболочкой 5 и внутренней колбой 3 имеется полость, обеспечивающая вакуумную изоляцию находящегося внутри колбы жидкого водорода. Но даже у этих дорогих высокотехнологичных устройств нет идеальной тепловой изоляции.

Специалисты фирмы BMW — пионеры в об-



Рис. 2. Внешний вид водородного баллона ООО «Сафит» объемом 6,8 л, установленного на БПЛА

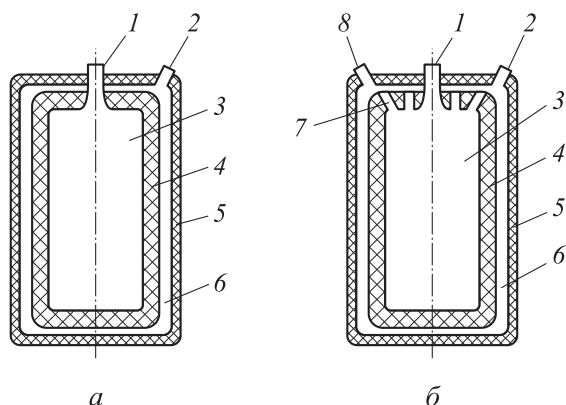


Рис. 3. Схемы криогенных баллонов с вакуумной теплоизолирующей полостью (а) и испарительной системой (б):

1 — горловина; 2 — вакуумный штуцер; 3 — внутренняя колба; 4 — теплоизоляция; 5 — наружная оболочка; 6 — полость вакуумирования; 7 — форсунки; 8 — расходный штуцер

ласти криогенных технологий для автомобильного транспорта — признают невозможность долгого хранения водорода в жидкой фазе, так как каждый день 1...2 % теряются из-за испарения и последующей утечки. В итоге автомобиль, заправленный жидким водородом, быстро останется с пустым баком, что подтверждают, например, владельцы водородных гибридов Toyota Mirai.

На рис. 3, б криосжатый водород через форсунки 7 испаряется в полость вакуумирования 6 и расходуется в газообразном состоянии. По этой схеме в ООО «Сафит» разработан водородный баллон (рис. 4), опытный образец которого прошел предварительные испытания, после чего на нем совместно с БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова проведены испытания по определению тепловой изоляции конструкции.

На первом этапе испытаний исследована теплопроводность конструкции без заполнения водородом. Полученный коэффициент теплопроводности $\lambda = (0,0645 \pm 0,0043)$ Вт/(м·К) сопоставим с таковым хороших теплоизоляторов, что свидетельствует об относительно эффек-



Рис. 4. Внешний вид опытного образца водородного баллона

тивных теплоизоляционных свойств многослойной стенки бака. Запланированы дальнейшие исследования. Ожидается улучшение теплоизоляционных свойств после отработки образца с системой вакуумирования.

Выводы

1. Приведены результаты разработки МКБ ВД для хранения, использования и транспортирования водородного топлива в сжатом до 70 МПа, сжиженном и криосжатом видах.
2. Представлены результаты испытаний высокотехнологичной криогенной емкости с уникальной вакуумной тепловой изоляцией.
3. Показана высокая эффективность тонкостенного стального лейнера и углепластиковой силовой оболочки в конструкции МКБ ВД.
4. Предложены новые варианты конструктивно-технологического исполнения МКБ ВД для сжатого и сжиженного водорода.

Литература

- [1] Почанин Ю.С. *Водородное топливо. Производство, хранение, использование*. Самиздат, 2022. 319 с.
- [2] Zbigniew S. A comprehensive overview of hydrogen-fueled internal combustion engines: achievements and future challenges. *Energy*, 2021, vol. 14, no. 20, art. 6504, doi: <https://doi.org/10.3390/en14206504>
- [3] Александров И.К., Раков В.А., Щербакова А.А. Перспективы развития транспортных средств с электроприводом. *Транспорт на альтернативном топливе*, 2011, № 4, с. 66–69.

- [4] Brown W.J., Beeson H., Pedley M. et al. *Safety standard for hydrogen and hydrogen systems*. NSS 1740.16. NASA, 2005. 389 p.
- [5] Цыгикало Н. Гиперзвуковая крылатая ракета и ее скачки. *Коммерсантъ*, 2020. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/4501975> (дата обращения: 15.03.2025).
- [6] Демичев В.И., Сергеев А.Ю., Мотова Т.А. и др. Полимер-композитные емкости с высоким массовым совершенством для хранения и транспортировки газов под давлением. *Механика композитных материалов*, 2021, т. 57, № 6, с. 1115–1128, doi: <https://doi.org/10.22364/mkm.57.6.06>
- [7] 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, no. 48, pp. 28910–28917, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.10.024>
- [8] Правила ООН № 134. *Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения механических транспортных средств и их элементов оборудования в отношении связанных с обеспечением безопасности эксплуатационных характеристик транспортных средств, работающих на водороде*. ООН, 2015. 79 с.
- [9] Васильев В.В., Мороз Н.Г. *Композиционные баллоны давления*. Москва, Машиностроение, 2015. 373 с.
- [10] Асюшкин А.В., Викуленков В.П., Лебедев К.Н. и др. Создание высокоэффективного металлокомпозитного баллона высокого давления. *Вестник НПО имени С.А. Лавочкина*, 2015, № 1, с. 19–27.
- [11] Комков М.А., Тарасов В.А. *Технология намотки композитных конструкций ракет и средств поражения*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 432 с.
- [12] Огородников С.К., ред. *Справочник нефтехимика*. Т. 2. Ленинград, Химия, 1978. 592 с.
- [13] Лебедев К.Н., Лебедев И.К., Мороз Н.Г. Экспериментальные исследования ресурсных характеристик металлокомпозитных баллонов. *Научный Вестник МГТУ ГА*, 2015, № 212-2, с. 137–142.
- [14] Lebedev K.N., Moroz N.G., Slitkov M.N. Cyclic strength of metal-composite high-pressure cylinders for storing xenon as part of a spacecraft in the case of orbital flight. *AIP Conf. Proc.*, 2022, vol. 2503, art. 020010, doi: <https://doi.org/10.1063/5.0107719>
- [15] Тарасов В.А., Бараев А.В., Комков М.А. Унификация шар-баллонов высокого давления РКТ комбинированной конструкции с композитной оболочкой и металлическим лейнером. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2015, № 1, с. 31–41, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2015-1-31-41>

References

- [1] Pochanin Yu.S. *Vodorodnoe toplivo. Proizvodstvo, khranenie, ispolzovanie* [Hydrogen fuel. Production, storage, use]. Samizdat Publ., 2022. 319 p. (In Russ.).
- [2] Zbigniew S. A comprehensive overview of hydrogen-fueled internal combustion engines: achievements and future challenges. *Energy*, 2021, vol. 14, no. 20, art. 6504, doi: <https://doi.org/10.3390/en14206504>
- [3] Aleksandrov I.K., Rakov V.A., Shcherbakova A.A. Prospects of development of vehicles with the electric drive. *Transport na alternativnom toplive* [Alternative Fuel Transport], 2011, № 4, s. 66–69. (In Russ.).
- [4] Brown W.J., Beeson H., Pedley M. et al. *Safety standard for hydrogen and hydrogen systems*. NSS 1740.16. NASA, 2005. 389 p.
- [5] Tsygikalo N. The hypersonic cruise missile and its surges. *Kommersant*, 2020. URL: <https://www.kommersant.ru/doc/4501975> (accessed: 15.03.2025). (In Russ.).
- [6] Demichev V.I., Sergeev A.Yu., Motova T.A. et al. Polymer-composite vessels with a high mass perfection for the storage and transportation of a high-pressure gas. *Mekhanika kompozitnykh materialov* [Mechanics of Composite Materials], 2021, vol. 57, no. 6, pp. 1115–1128, doi: <https://doi.org/10.22364/mkm.57.6.06> (in Russ.).
- [7] 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, no. 48, pp. 28910–28917, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.10.024>

- [8] *Regulation No 134 of the Economic Commission for Europe of the United Nations (UN/ECE) — Uniform provisions concerning the approval of motor vehicles and their components with regard to the safety-related performance of hydrogen-fuelled vehicles (HFCV)*. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2019/795/oj> (accessed: 15.03.2025).
- [9] Vasilyev V.V., Moroz N.G. *Kompozitsionnye ballony davleniya* [Composite pressure vessels]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2015. 373 p. (In Russ.).
- [10] Asyushkin A.V., Vikulenkov V.P., Lebedev K.N. et al. Development of high effective metal-base composite high-pressure vessel. *Vestnik NPO imeni S.A. Lavochkina*, 2015, no. 1, pp. 19–27. (In Russ.).
- [11] Komkov M.A., Tarasov V.A. *Tekhnologiya namotki kompozitnykh konstruktivnykh raket i sredstv porazheniya* [Technology of winding composite structures of missiles and means of destruction]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2011. 432 p. (In Russ.).
- [12] Ogorodnikov S.K., ed. *Spravochnik neftekhimika*. T. 2 [Petrochemist's handbook. Vol. 2]. Leningrad, Khimiya Publ., 1978. 592 p. (In Russ.).
- [13] Lebedev K.N., Lebedev I.K., Moroz N.G. Experimental studies of life characteristics of metal-composite cylinders. *Nauchnyy Vestnik MGTU GA* [Civil Aviation High Technologies], 2015, no. 212-2, pp. 137–142. (In Russ.).
- [14] Lebedev K.N., Moroz N.G., Slitkov M.N. Cyclic strength of metal-composite high-pressure cylinders for storing xenon as part of a spacecraft in the case of orbital flight. *AIP Conf. Proc.*, 2022, vol. 2503, art. 020010, doi: <https://doi.org/10.1063/5.0107719>
- [15] Tarasov V.A., Baraev A.V., Komkov M.A. Standardization of spherical high-pressure vessels comprising composite shells and metallic liners. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2015, no. 1, pp. 31–41, doi: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2015-1-31-41> (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 25.03.2025

Информация об авторах

ЛЕБЕДЕВ Константин Нитович — доктор технических наук, профессор, генеральный директор. ООО «САФИТ» (141351, Российская Федерация, Московская область, Сергиев Посад, д. Жучки, д. 2Д, e-mail: k_lebedev@safit.su).

МОРОЗ Николай Григорьевич — кандидат технических наук, главный конструктор. ООО «САФИТ» (141351, Сергиев Посад, Московская область, Российская Федерация, д. Жучки, д. 2Д, e-mail: safit@safit.su).

ЛЕБЕДЕВ Игорь Константинович — кандидат технических наук, директор. ООО «САФИТ» (141351, Сергиев Посад, Московская область, Российская Федерация, д. Жучки, д. 2Д, e-mail: safit@safit.su).

Information about the authors

LEBEDEV Konstantin Nitovich — Doctor of Science (Eng.), Professor, General Director. SAFIT LLC (141351, Sergiev Posad, Moscow region, Russian Federation, Zhuchki Village, Bldg. 2D, e-mail: k_lebedev@safit.su).

MOROZ Nikolay Grigoryevich — Candidate of Science (Eng.), Chief Designer. SAFIT LLC (141351, Sergiev Posad, Moscow region, Russian Federation, Zhuchki Village, Bldg. 2D, e-mail: safit@safit.su).

LEBEDEV Igor Konstantinovich — Candidate of Science (Eng.), Director. SAFIT LLC (141351, Sergiev Posad, Moscow region, Russian Federation, Zhuchki Village, Bldg. 2D, e-mail: safit@safit.su).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Лебедев К.Н., Мороз Н.Г., Лебедев И.К. Конструктивно-технологические особенности создания металлокомпозитных баллонов для транспортных средств, работающих на водороде. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 6, с. 112–119.

Please cite this article in English as:

Lebedev K.N., Moroz N.G., Lebedev I.K. Design technological features of creating the metal-composite cylinders for the hydrogen powered vehicles. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2025, no. 6, pp. 112–119.