

УДК 629.78

DOI 10.18698/0536-1044-2017-3-89-95

Научно-практические основы определения конструктивно-технологических параметров унифицированных цельнометаллических шар-баллонов высокого давления

В.А. Тарасов¹, А.В. Бараев², Р.В. Боярская¹

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, 105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

² ФГУП «НПО «Техномаш», 127018, Москва, Российская Федерация, 3-й пр-д Марьиной рощи, д. 40

Scientific and Practical Principles for Determining Structural and Technological Parameters of Standardized All-Metal High Pressure Spherical Tanks

VA. Tarasov¹, A.V. Barayev², R.V. Boyarskaya¹

¹ BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1

² Federal State Unitary Enterprise Scientific and Production Association Tekhnomash, 127018, Moscow, Russian Federation, 3rd Maryinoy Roshchi proyezd, Bldg. 40



e-mail: tarasov_va@mail.ru, baraev@inbox.ru, brv152@mail.ru



Проведен статистический анализ серийно выпускаемых в России шар-баллонов высокого давления (ШБВД), позволивший выявить корреляционные зависимости между запасенной энергией сжатых газов и конструктивными параметрами ШБВД. Установлено, что отклонения значений исследуемых параметров от линий тренда обусловлены особенностями эксплуатации ШБВД. Обоснован алгоритм расчета конструктивных параметров ШБВД по значению запасенной энергии сжатых газов. Предложен модельный ряд параметров унифицированных ШБВД. Показано, что применение технологий сварки, повышающих прочность получаемых соединений, существенно уменьшает массу ШБВД, а совершенствование метода штамповки полушфер снижает затраты на механическую обработку элементов их конструкции.

Ключевые слова: унификация шар-баллонов, сжатые газы, конструктивно-технологические параметры, запасенная энергия.



The statistical analysis of high pressure spherical tanks (HPST), series-produced in Russia, reveals correlations between the stored energy of the compressed gases and the design parameters of the tanks. It is established that deviations from the trend line values in the studied parameters are due to the operating conditions of the HPSTs. The algorithm of calculations of the design parameters for HPSTs based on the stored energy value is justified. A model range of parameters for standardized HPSTs is proposed. It is shown that the use of welding technologies that increase the strength of the joints results in a significant decrease of the HPST weight, and improved stamping methods reduce the cost associated with machining of the elements of the hemispheres.

Keywords: standardization of high pressure spherical tanks, compressed gases, structural and technological parameters, stored energy.

Унификация шар-баллонов высокого давления (ШБВД), предназначенных для хранения сжатых и сжиженных газов, является важным направлением сокращения затрат на их производство в ракетно-космическом машиностроении [1–7]. Для реализации этого пути предпринимались научно-методические изыскания [8–11] в целях обоснования параметров изделий, однозначно характеризующих их функциональность и допускающих построение параметрического ряда изделий. Концепция системного анализа конструкции ШБВД и возможные подходы к проблеме их унификации рассматривались в работах [12–14], а также обсуждались на Всероссийской научно-практической конференции, прошедшей в г. Королеве Московской области в 2012 г. В качестве параметров унификации ШБВД специалисты завода экспериментального машиностроения АО РКК «Энергия» имени С.П. Королева предложили использовать геометрические параметры (объем, диаметр), а сотрудники ФГУП «НПО «Техномаш» — методику поиска унифицированного решения сразу по двум параметрам — объему и рабочему давлению.

При развитии этих идей в статье [15] установлено, что в качестве параметра унификации удобно использовать запасенную в ШБВД энергию (далее — запасенная энергия) сжатых и сжиженных газов. Также был обоснован параметрический ряд значений энергии унифицированных ШБВД, создающий основу для существенного сокращения их номенклатуры.

Завершающим этапом процесса унификации должна стать методика выбора конструктивно-технологических параметров ШБВД (рабочего давления и объема) по значению запасаемой энергии газов, которая позволила бы достичь

рациональных значений массы и обеспечить надежность изделий. Важным также является выбор толщины стенки с учетом метода сварки и ослабления конструкции в зоне получаемых швов. На этой стадии должны быть учтены прогрессивные тенденции развития техники и технологий, а также конструктивно-технологические решения, которые уже длительное время позволяют осуществлять серийное производство ШБВД.

Цель работы — разработка методического обеспечения для определения конструктивно-технологических параметров унифицированных ШБВД.

Формальные методы оптимизации конструктивных параметров ШБВД сложно применить на практике, поскольку для этого требуется научно обоснованная целевая функция, учитывающая снижение прочности конструкции в области сварных швов. Однако опыт проектирования и технологической отработки позволяет учесть все особенности эксплуатации ШБВД и снизить до минимального значения их массу. Можно считать, что все конструктивно-технологические параметры серийно выпускаемых шар-баллонов близки к оптимальным. Тогда после статистической обработки данных такого производства можно построить зависимость между значениями конструктивно-технологических параметров и запасенной энергии, которая ранее была установлена в работе [8] для унифицированных ШБВД.

Представленные на рис. 1 результаты проверки данного подхода для шар-баллонов, выполненных из сплавов титана и алюминия, свидетельствуют о существовании зависимостей между запасенной энергией, рабочим

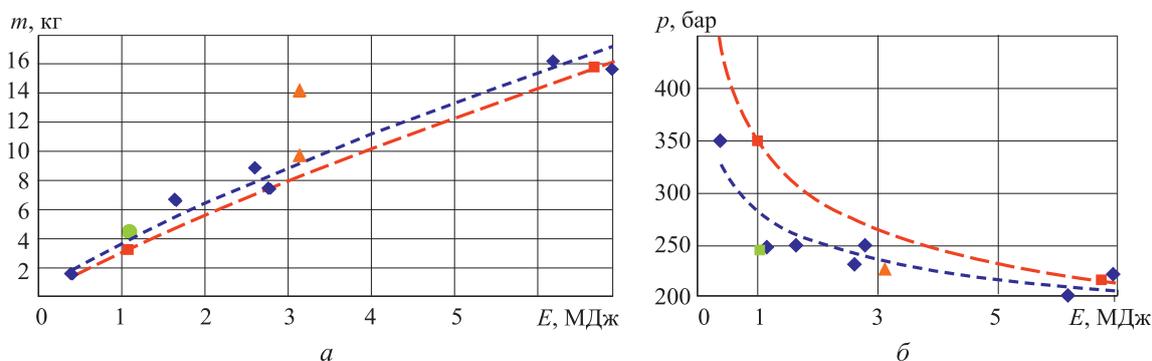


Рис. 1. Зависимости массы m (а) и рабочего давления p (б) от запасенной энергии E для ШБВД, выпускаемых различными производителями:
 ◆ — Энергия; ■ — ЦСКБ; ▲ — ЮМЗ; ■ — Красмаш

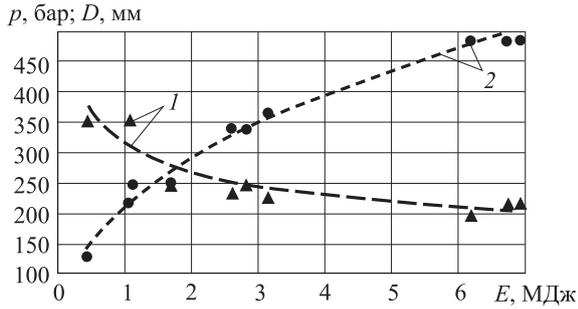


Рис. 2. Корреляционная зависимость рабочего давления p (1) и диаметра D (2) ШБВД от запасенной энергии E : точки — статистические данные; кривые — аппроксимация

давлением и массой ШБВД. Кроме того, можно выявить влияние условий эксплуатации на выбор конструктивно-технологических параметров таких разработчиков и производителей цельнометаллических ШБВД, как АО РКК «Энергия» имени С.П. Королева (Энергия), АО «ЦСКБ «Прогресс» (ЦСКБ), ГКНПЦ имени М.В. Хруничева в кооперации с Южным машиностроительным заводом (ЮМЗ), ОАО «ГРЦ им. академика В.П. Макеева» в сотрудничестве с АО «Красмаш» (Красмаш). На рис. 1 также показаны линии тренда для Энергии (синяя) и ЦСКБ (красная).

Статистический анализ позволил выявить единые зависимости для всей совокупности цельнометаллических ШБВД, по которым можно найти рациональные значения их рабочего давления p и диаметра D (рис. 2). Для определения массы ШБВД m построена единая зависимость в координатах «объем стенки корпуса V^* — запасенная энергия E » (рис. 3), где $V^* = 1000 m / \rho$, m^3 (ρ — плотность материала корпуса ШБВД).

Конструкция корпуса ШБВД характеризуется распределением толщин стенки. В зонах, удаленных от сварного шва, толщина имеет

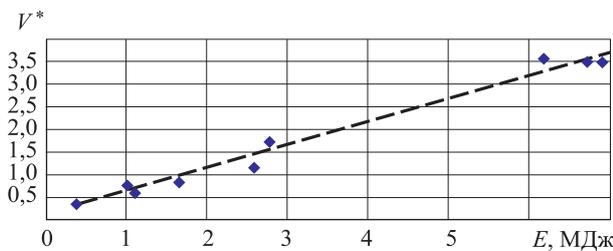


Рис. 3. Зависимость объема стенки корпуса V^* ШБВД от запасенной энергии E : точки — статистические данные; кривая — аппроксимация

наименьшее значение и соответствует условию работы конструкции в области упругости

$$\delta_{\text{наим}} = \frac{K_Z p R}{\sigma_T},$$

где K_Z — коэффициент запаса прочности, значение которого составляет не менее 1,5; R — радиус корпуса ШБВД; σ_T — предел текучести материала.

Однако использовать параметр $\delta_{\text{наим}}$ при статистическом анализе толщин серийно выпускаемых ШБВД неудобно. На значение предела текучести материала влияют режимы обработки давлением и термообработки материала, что может увеличить поле рассеяния вокруг регрессионных зависимостей. Кроме того, в зонах сварных швов создаются утолщения для усиления конструкции.

В связи с этим в работе принята гипотеза, что толщина стенки в области швов пропорциональна ее минимальному значению δ_h , названному характеристической толщиной, при которой еще сохраняется прочность конструкции:

$$\delta_h = \frac{K_Z p R}{\sigma_B} < \delta_{\text{наим}}, \quad (1)$$

где σ_B — временное сопротивление.

Результаты совместной обработки рабочих параметров серийно выпускаемых ШБВД и характеристической толщины δ_h , рассчитанной по формуле (1), приведены на рис. 4, где $\delta^* = \delta / \delta_h$ (δ — толщина стенки в области сварных швов ШБВД). Из рис. 4 следует, что между характеристической величиной и толщинами стенки в области экваториального и полярного сварных швов существуют жесткие корреляционные связи.

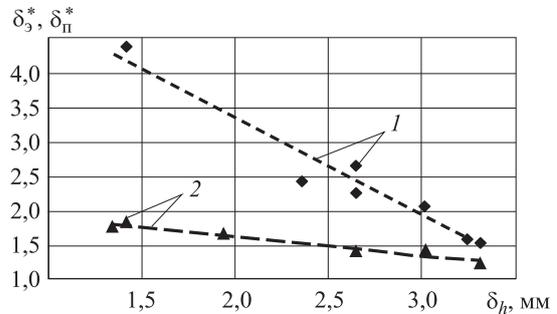


Рис. 4. Регрессионная зависимость относительной толщины в области экваториального δ_3^* (1) и полярного δ_n^* (2) швов от характеристической толщины δ_h корпуса ШБВД: точки — статистические данные; кривые — аппроксимация

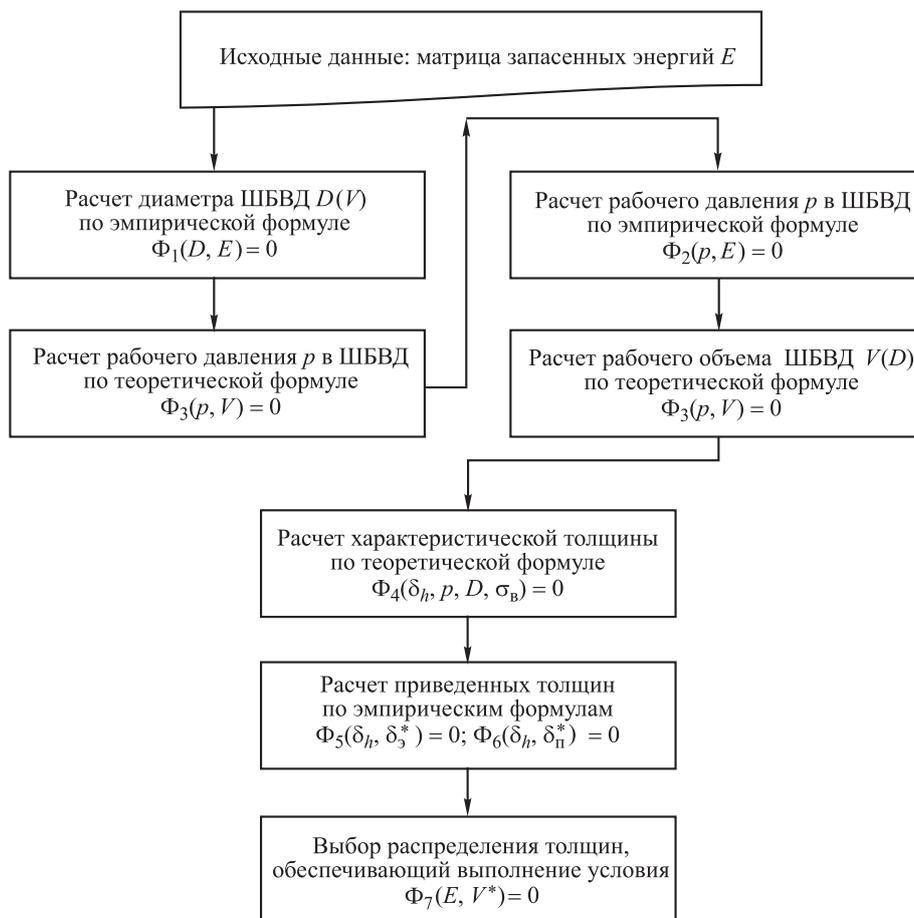


Рис. 5. Алгоритм выбора конструктивно-технологических параметров ШБВД по значению запасенной энергии

Аппроксимация статистических данных позволяет предложить схему (алгоритм) расчета (рис. 5) конструктивно-технологических параметров ШБВД по значению запасенной энергии, в основе которой лежат известные теоретические зависимости и эмпирические формулы, полученные на основе статистических данных:

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= D - 215,34E^{0,44} = 0 & (R^2 = 0,975); \\ \Phi_2 &= p - 309,1E^{-0,214} = 0 & (R^2 = 0,842); \\ \Phi_3 &= p_0 V \bar{p} \ln \bar{p} - E = 0 & (R^2 = 1); \\ \Phi_4 &= \delta_h \sigma_v - K_Z p D / 2 = 0 & (R^2 = 1); \\ \Phi_5 &= \delta_3^* + 1,44\delta_h - 6,23 = 0 & (R^2 = 0,95); \\ \Phi_6 &= \delta_n^* + 0,275\delta_h - 2,18 = 0 & (R^2 = 0,96); \\ \Phi_7 &= V^* - 0,5104E - 0,1151 = 0 & (R^2 = 0,982), \end{aligned}$$

где p_0 — атмосферное давление; V — рабочий объем; $\bar{p} = p/p_0$.

В представленной схеме расчета значение рабочего давления принято округлять так, что-

бы последняя значащая цифра была нулем или пятью.

Значения конструктивно-технологических параметров унифицированных ШБВД, полученные с помощью предложенного алгоритма, приведены в таблице и на рис. 6.

Значения конструктивно-технологических параметров унифицированных ШБВД

Энергия, МДж	Давление, бар	Объем, л	Толщина стенки, мм
1,25	310	7,03	6,03/2,59
2,30	265	15,50	6,32/2,81
4,05	225	33,20	6,52/2,99
6,65	200	62,80	6,68/3,20
10,00	175	110,60	6,74/3,32

Примечание. В числителе дроби указаны значения для экваториального шва, а в знаменателе — для полярного.

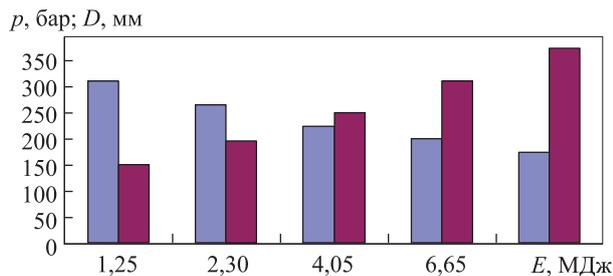


Рис. 6. Зависимость рабочих давлений p (■) и диаметров D (■) унифицированных ШБВД от запасенной энергии E

Выводы

1. Статистический анализ серийно производимых ШБВД позволил предложить методику

выбора конструктивных параметров унифицированных изделий, основанную на установленных корреляционных зависимостях между запасенной энергией сжатых газов и конструктивными параметрами ШБВД.

2. Обоснован алгоритм расчета конструктивных параметров ШБВД по запасенной энергии сжатых газов и предложен модельный ряд параметров унифицированных шар-баллонов.

3. Показано, что применение технологий сварки, повышающих прочность получаемых соединений, существенно уменьшает массу конструкции ШБВД, а совершенствование метода штамповки полусфер снижает затраты на механическую обработку элементов конструкции ШБВД.

Литература

- [1] Медведев А.А. Унификация как средство обеспечения низкой удельной стоимости и повышения надежности выведения полезной нагрузки ракетами-носителями. В кн. *Актуальные проблемы российской космонавтики: Труды XXXIII Академических чтений по космонавтике*, Москва, Комиссия РАН по разработке научного наследия пионеров освоения космического пространства, 2009, с. 252–253.
- [2] Тарасов В.А., Кашуба Л.А. *Теоретические основы технологии ракетостроения*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 351 с.
- [3] Указ Президента Российской Федерации В.В. Путина № 874 «О системе управления ракетно-космической отраслью» от 02 декабря 2013 г. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/37828> (дата обращения 25 октября 2016).
- [4] Васильев В.Н. *Организация производства в условиях рынка*. Москва, Машиностроение, 1993. 368 с.
- [5] ГОСТ 23945.0–80. *Унификация изделий. Основные положения*. Москва, Изд-во стандартов, 1991. 8 с.
- [6] Антонов Г.А. *Основы стандартизации и управления качеством продукции*. Санкт-Петербург, Изд-во СПбУЭФ, 2011. 684 с.
- [7] Чумадин А.С., Ершов В.И., Барвинок В.А. *Основы технологии производства летательных аппаратов (в конспектах лекций)*. Москва, Наука и технологии, 2005. 912 с.
- [8] Касаев К.С., ред. *Новые наукоемкие технологии в технике: Энциклопедия. Т. 12: Технологическое обеспечение сложных технических систем. Ч. 1*. Москва, ЗАО НИИ ЭНЦИТЕХ, 1998. 396 с.
- [9] Клименко Ю., Лысый С., Медушевский Л. Международная стандартизация коммерческой ракетно-космической техники. *Электроника: наука, технология, бизнес*, 2001, № 5, с. 74.
- [10] Островерх А.И., Сычев В.Н., Цырков А.В. Реинжиниринг системы организационно-технологического сопровождения процессов производства ракетно-космической техники. *Технология машиностроения*, 2006, № 8, с. 88–91.
- [11] Ponticel P. Manufacturing technology combo a first for aerospace. *SAE International*, 2010. URL: <http://articles.sae.org/7376/> (дата обращения 24 ноября 2014).
- [12] Шенаев М.О. *Разработка методики и средств организации технической подготовки серийного производства пневмогидравлических систем изделий авиационной техники*. Дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2009. 146 с.
- [13] *Aeronautics and space within the Air Liquide Group*. (2009) URL: <http://www.airliquide.com/file/otherelementcontent/pj/dp%20juin%2009%20ven55801.pdf> (дата обращения 2 ноября 2014).

- [14] Benedic F., Leard J.-P., Lefloch C. *Helium High Pressure Tanks at EADS Space Transportation New Technology with Thermoplastic Liner*, 2005. URL: <http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?Location=U2&doc=GetTRDoc.pdf&AD=ADA445482> (дата обращения 1 октября 2016).
- [15] Тарасов В.А., Бараев А.В., Филимонов А.С., Боярская Р.В. Конструкторско-технологические основы унификации параметров цельнометаллических баллонов высокого давления в ракетно-космическом машиностроении. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2014, № 5 (98), с. 70–84.

References

- [1] Medvedev A.A. Unifikatsiia kak sredstvo obespecheniia nizkoi udel'noi stoimosti i povysheniia nadezhnosti vyvedeniia poleznoi nagruzki raketami-nositeliami [Unification, as a means of ensuring a low unit cost and improve the reliability of removing the payload launch vehicles]. *V kn. Aktual'nye problemy rossiiskoi kosmonavtiki: Trudy 33 Akademicheskikh chtenii po kosmonavtike* [In the book Actual problems of Russian Astronautics: Proceedings of the XXXII Academic readings on cosmonautics]. Moscow, Komissii RAN po razrabotke nauchnogo nasledii pionerov osvoeniia kosmicheskogo prostranstva publ., 2009, pp. 252–253.
- [2] Tarasov V.A., Kashuba L.A. *Teoreticheskie osnovy tekhnologii raketostroeniia* [Theoretical foundations of rocket technology]. Moscow, Bauman Press, 2006. 351 p.
- [3] *Ukaz Prezidenta Rossiiskoi Federatsii V.V. Putina № 874 «O sisteme upravleniia raketno-kosmicheskoi otrasliu» ot 02 dekabria 2013 g.* [The decree of the President of the Russian Federation V.V. Putin No. 874 «On the system of management of rocket-space industry» dated 02 December 2013]. Available at: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/37828> (accessed 25 October 2016).
- [4] Vasil'ev V.N. *Organizatsiia proizvodstva v usloviakh rynka* [Organization of production in the market]. Moscow, Mashinostroenie publ., 1993. 368 p.
- [5] *GOST 23945.0–80. Unifikatsiia izdelii. Osnovnye polozeniia* [State Standard 23945.0–80. Unifying products. Fundamentals]. Moscow, Standartinform publ., 1991. 8 p.
- [6] Antonov G.A. *Osnovy standartizatsii i upravleniia kachestvom produktsii* [Fundamentals of standardization and quality control]. Sankt-Petersburg, St. Petersburg State University of Economics publ., 2011. 684 p.
- [7] Chumadin A.S., Ershov V.I., Barvinok V.A. *Osnovy tekhnologii proizvodstva letatel'nykh apparatov (v konspektakh lektsii)* [The basic technology of production of aircraft (lecture notes)]. Moscow, Nauka i tekhnologii publ., 2005. 912 p.
- [8] *Novye naukoemkie tekhnologii v tekhnike: Entsiklopediia. T. 12. Tekhnologicheskoe obespechenie slozhnykh tekhnicheskikh sistem. Chast' 1* [New high technologies in engineering; Encyclopedia. Vol. 12. Technological support of complex technical systems. Pt. 1]. Ed. Kasaev K.S. Moscow, ZAO NII ENTsITEK publ., 1998. 396 p.
- [9] Klimenko Iu., Lysyi S., Medushevskii L. *Mezhdunarodnaia standartizatsiia kommercheskoi raketno-kosmicheskoi tekhniki* [International Standardization of Commercial Cosmic Missile Systems]. *Elektronika: nauka, tekhnologiia, biznes* [Electronics: Science, Technology, Business]. 2001, no. 5, p. 74.
- [10] Ostroverkh A.I., Sychev V.N., Tsyrkov A.V. *Reinzhiniring sistemy organizatsionno-tekhnologicheskogo soprovozhdeniia protsessov proizvodstva raketno-kosmicheskoi tekhniki* [Reengineering of organizational and technological support of production processes rocket and space technology]. *Tekhnologiia mashinostroeniia* [Engineering Technology]. 2006, no. 8, pp. 88–91.
- [11] Ponticel P. Manufacturing technology combo a first for aerospace. *SAE International*, 2010. Available at: <http://articles.sae.org/7376/> (accessed 24 November 2014).
- [12] Shenaev M.O. *Razrabotka metodiki i sredstv organizatsii tekhnicheskoi podgotovki seriinogo proizvodstva pnevmogidravlicheskikh sistem izdelii aviatsionnoi tekhniki*. Diss. kand. tekhn. nauk [Development of methods and means of the organization of technical training for full-scale production of pneumatic hydraulic systems for aeronautical engineering products. Cand. tech. sci. diss.]. Moscow, 2009. 146 p.

- [13] *Aeronautics and space within the Air Liquide Group* (2009). Available at: <http://www.airliquide.com/file/otherelementcontent/pj/dp%20juin%2009%20ven55801.pdf> (accessed 2 November 2014).
- [14] Benedic F., Leard J.-P., Lefloch C. *Helium High Pressure Tanks at EADS Space Transportation New Technology with Thermoplastic Liner*, 2005. URL: <http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?Location=U2&doc=GetTRDoc.pdf&AD=ADA445482> (accessed 01 October 2016).
- [15] Tarasov V.A., Baraev A.V., Filimonov A.S., Boiarskaia R.V. *Konstruktorsko-tehnologicheskie osnovy unifikatsii parametrov tsel'nometallicheskih ballonov vysokogo davleniia v raketno-kosmicheskom mashinostroenii* [Design-Engineering Principles of Standardization of Characteristics of Solid-Metal High-Pressure Tanks in Rocket and Space Machine Building]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie* [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Ser. Mechanical Engineering]. 2014, no. 5(98), pp. 70–84.

Статья поступила в редакцию 02.11.2016

Информация об авторах

ТАРАСОВ Владимир Алексеевич (Москва) — доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: tarasov_va@mail.ru).

БАРАЕВ Алексей Викторович (Москва) — заместитель генерального директора ФГУП «НПО «Техномаш» (127018, Москва, Российская Федерация, 3-й пр-д Марьиной Роши, д. 40, e-mail: baraev@inbox.ru).

БОЯРСКАЯ Раиса Владимировна (Москва) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: brv152@mail.ru).

Information about the authors

TARASOV Vladimir Alekseevich (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Technology of Rocket-Space Engineering Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: tarasov_va@mail.ru).

BARAEV Aleksey Viktorovich (Moscow) — Deputy General Director. Federal State Unitary Enterprise Scientific and Production Association Tekhnomash (127018, Moscow, Russian Federation, 3rd Maryinoy Roshchi proyezd, Bldg. 40, e-mail: baraev@inbox.ru).

BOYARSKAYA Raisa Vladimirovna (Moscow) — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Technologies of Mechanical Engineering. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: brv152@mail.ru).