

# ТЕХНОЛОГИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

УДК 629.78

## КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ УНИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ЦЕЛЬНОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ БАЛЛОНОВ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ В РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОМ МАШИНОСТРОЕНИИ

В.А. Тарасов<sup>1</sup>, А.В. Бараев<sup>2</sup>, А.С. Филимонов<sup>1</sup>, Р.В. Боярская<sup>1</sup>

<sup>1</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация  
e-mail: tarasov@sm.bmstu.ru

<sup>2</sup>ФГУП “НПО “Техномаш”, Москва, Российская Федерация

*На базе анализа литературных источников установлено, что баллоны высокого давления являются уникальными объектами, допускающими решение актуальной проблемы ракетно-космического машиностроения — унификации компонентов ракетно-космической техники. В качестве объекта статистического анализа предложено использовать запасенную сжатым газом внутреннюю энергию, которая определяет эффективность работы баллонов высокого давления в составе ракетно-космической техники. Разработаны алгоритмы оптимизации конструктивных параметров баллонов высокого давления по критериям массы и себестоимости. Алгоритмы учитывают особенности технологии изготовления баллонов: зависимость дефектности сварного шва от толщины стенки шар-баллона, влияние метода изготовления полусфер на массу баллона, производственные расходы и др. Предложенные алгоритмы допускают оптимизацию конструктивных параметров баллонов высокого давления, эксплуатирующихся при криогенных температурах. Показано совпадение результатов оптимизации параметров цельнометаллических баллонов высокого давления по критериям массы и себестоимости.*

**Ключевые слова:** цельнометаллические баллоны высокого давления, унификация, оптимизация конструктивных параметров, влияние технологических факторов на конструктивные параметры унифицированной конструкции.

## DESIGN-ENGINEERING PRINCIPLES OF STANDARDIZATION OF CHARACTERISTICS OF SOLID-METAL HIGH-PRESSURE TANKS IN ROCKET AND SPACE MACHINE BUILDING

V.A. Tarasov<sup>1</sup>, A.V. Baraev<sup>2</sup>, A.S. Filimonov<sup>1</sup>, R.V. Boyarskaya<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation  
e-mail: tarasov@sm.bmstu.ru

<sup>2</sup>Federal State Unitary Enterprise “Scientific-production association “Technomash”, Moscow, Russian Federation

*Based on analysis of literary sources it was discovered that solid-metal high-pressure tanks were unique object. It allows dealing with an actual problem of rocket-and-space machine building which is the standardization of rocket-and-space machinery. It was suggested to use internal energy accumulated in pressurized gas as an object of statistical analysis. This internal energy specifies running efficiency of high-pressure tanks within rocket-and-space machinery. Algorithms of optimization of design*

*characteristics of high-pressure tank by the criterion of weight and prime cost were worked out. The algorithms take special features of tank production (dependency of defectiveness of joint weld and thickness of wall of spherical tank, the influence of hemisphere production method on weight of the tank, production expenses, etc.) into account. The algorithms allow optimization of design characteristics of high-pressure tanks which operate under cryogenic temperatures. Shown that thanks to the significant contribution of cost of stainless steels and titanic alloys in prime cost of all-metal HPB results of optimization of parameters of balloons on criteria of weight and prime cost coincide.*

**Keywords:** solid-metal high-pressure tanks, standardization, design characteristics optimization, influence of technology factor on optimization of design characteristics of standardized configuration.

Ракетно-космическое машиностроение характеризуется тем, что эксплуатационные показатели ракетно-космической техники (РКТ) обеспечиваются при изготовлении мелкими сериями на предприятиях-разработчиках, или в рамках сложившейся кооперации предприятий. В результате в отрасли теряются значительные средства на выпуск большого числа однотипной продукции в условиях мелкосерийного производства с его характерными особенностями [1]: невысоким уровнем коэффициента использования материалов, применением дорогостоящего широкоуниверсального оборудования, высокой квалификацией рабочих, созданием дорогостоящей системы испытаний изделий на каждом предприятии и др.

В указе Президента РФ В.В.Путина [2] отмечается, что интеграция разработчиков и производителей РКТ в единую научно-производственную структуру позволит оптимизировать число предприятий, их имущественный комплекс и численность работников. Унификация технических решений при создании РКТ и единый технологический подход к производству комплектующих изделий позволят устранить конкуренцию между предприятиями на внутреннем рынке и усилить их влияние на внешнем.

В связи с этим актуальной для ракетно-космического машиностроения является задача широкой унификации, отраслевой специализации и рационального размещения производства. Решение этой задачи позволит улучшить все составляющие технологичности конструкций РКТ и, в первую очередь, сократить затраты на производство унифицированной продукции.

Общие вопросы унификации продукции освещены в работах [3–17]. Унификации компонентов РКТ посвящены работы [18–27], включая вопросы международной стандартизации коммерческой РКТ [18]. Проблемам унификации конструкций и специализации производства топливных емкостей и баллонов высокого давления РКТ посвящены работы [28, 29].

Задачи унификации баков и БВД были предметом дискуссий на ряде научно-технических конференций [30–34]. Так, в работе [30] унификация продукции рассматривается как средство обеспечения низкой

удельной стоимости и повышения надежности выведения полезной нагрузки ракетами-носителями.

На отраслевой конференции “Проблемы унификации конструкций и специализации производства топливных емкостей и баллонов высокого давления РКТ. Разработка предложений по унификации, отраслевой специализации и рациональному размещению производства”, состоявшейся 18–19 апреля 2013 г. в г. Королеве (Московская область), ведущие специалисты отрасли обсуждали направления унификации БВД:

- общую методику технологической унификации и примеры ее применения для различных операций с выбором оборудования, оснастки и инструмента;
- создание унифицированных средств автоматизации намотки композитных емкостей и др.

Однако рекомендации приведенных работ носят общий характер и слабо учитывают роль технологии производства в процессе унификации.

В настоящей работе предлагается методика унификации одного из важнейших конструктивных элементов РКТ — баллонов высокого давления (БВД) на базе оптимизации конструктивных параметров по техническим и технико-экономическим показателям.

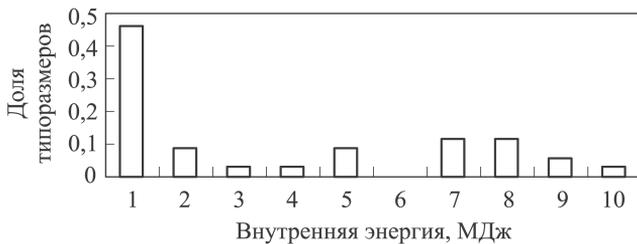
В отличие от традиционного подхода, при котором унифицированное решение ищется на основе изучения интервала группирования рабочих давлений для известной номенклатуры БВД, главным параметром, характеризующим работоспособность БВД, выбран запас внутренней энергии сжатого газа. Тогда в соответствии с законами газовой динамики для оценки запаса внутренней энергии  $E_0$  сжатого газа можно предложить следующее соотношение:

$$E_0 = p_u V_u \ln \frac{p_u}{p_0}, \quad (1)$$

где  $p_u$  — рабочее давление сжатого газа в БВД,  $V_u$  — объем БВД,  $p_0$  — нормальное атмосферное давление.

Данные ведущих отечественных и зарубежных предприятий отрасли, таких как РКК “Энергия”, ФГУП “НИИМаш”, УНИИКМ, ОАО “Сафит” Композит Инжиниринг, Красмаш, Luxfer, SCI, Dunetek, EDO, Lincoln Composites, EADS Astrum, позволили построить гистограмму распределения внутренней энергии, запасаемой в БВД (рис. 1), которые выпускались на протяжении нескольких десятков лет. На гистограмме видно, что на шкале внутренней энергии существуют области группирования типоразмеров БВД.

Для областей запасенной энергии  $E_0 < 2$  МДж;  $2 < E_0 < 6$  МДж и  $E_0 > 6$  МДж были определены средние значения 1, 4,5 и 8 МДж



**Рис. 1.** Диаграмма распределения типоразмеров БВД на шкале внутренней энергии

соответственно, которые можно принять в качестве унифицированных параметров БВД. Для малоразмерной РКТ характерна область внутренних энергий менее 1 МДж, для большинства космических кораблей удобна область 8...9 МДж.

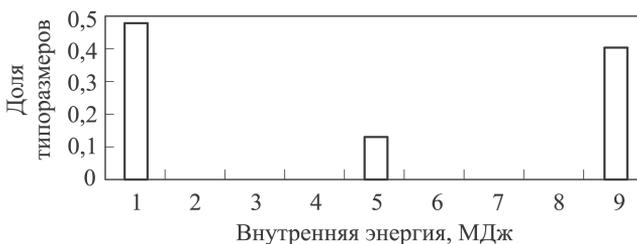
Особую область составляют БВД с высоким уровнем внутренней энергии (18, 36 и 79 МДж). Доля этих БВД невелика, и в этом случае возможны два решения:

1. БВД с большим запасом внутренней энергии могут изготавливаться в мелкосерийном производстве.
2. Необходимый запас внутренней энергии можно создавать, используя одновременно 2, 4 и 8 БВД по 9 МДж.

С учетом вышесказанного окончательно получим диаграмму, соответствующую этой идее и охватывающую область запасенной энергии 0...81 МДж (рис. 2).

Вместе с этим полученные унифицированные значения внутренней энергии не позволяют разрешить неопределенность в назначении рабочего давления и радиуса БВД. В соответствии с соотношением (1) один и тот же уровень внутренней энергии  $\tilde{E}_0 = 10^{-6} E_0$  может быть обеспечен различными комбинациями давления сжатого газа  $\bar{p} = \frac{p_u}{p_0}$  и радиуса БВД

$$R = \left( \frac{3 \cdot 10 \tilde{E}_0}{4\pi \bar{p} \ln \bar{p}} \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (2)$$



**Рис. 2.** Диаграмма распределения унифицированных типоразмеров БВД на шкале внутренней энергии в интервале 0...81 МДж

При выборе толщины стенки БВД из условия обеспечения требования к ее сплошности

$$\delta = \frac{\bar{p}}{20\tilde{\sigma}}\sigma^*R, \quad (3)$$

коэффициент запаса прочности обычно представляют в виде произведения трех коэффициентов:  $\sigma^* = \frac{\sigma_{\text{в}}}{\sigma_u} = K_0K_KK_T$ , где  $\tilde{\sigma}_{\text{в}} = 10^{-6}\sigma_{\text{в}}$ ;  $\sigma_{\text{в}}$  — временное сопротивление материала;  $\sigma_u$  — допустимое напряжение в стенке БВД при рабочем давлении; гарантированный коэффициент запаса  $K_0$  в соответствии с рекомендациями для БВД принят равным 1,5; коэффициент  $K_K \approx 1,1$  учитывает несовершенство расчетных схем; коэффициент  $K_T$  призван учесть несовершенство конструкции, обусловленное примененными при изготовлении технологическими процессами. В частности для аргоно-дуговой сварки была выбрана следующая зависимость коэффициента  $K_T$  от толщины стенки в области сварного шва:

$$K_T = 1,1 \begin{cases} 1 - b(\delta_0^* - \delta^*) & \text{при } \delta^* < \delta_0^*; \\ 1 - b(\delta^* - \delta_0^*) & \text{при } \delta^* \geq \delta_0^*, \end{cases}$$

где  $b, \delta_0^*$  — константы;  $\delta^*$  — толщина стенки БВД.

Последнее уравнение совместно с (3) позволяет выразить толщину стенки через давление

$$\delta^* = \begin{cases} \frac{A(1 + b\delta_0^*)}{1 + Ab} & \text{при } \delta^* < \delta_0^*; \\ \frac{A(1 - b\delta_0^*)}{1 - Ab} & \text{при } \delta^* \geq \delta_0^*, \end{cases} \quad (4)$$

где  $A = \frac{1,21K_0\bar{p}R}{\tilde{\sigma}_{\text{в}}}$ .

Анализ соотношения (4) показывает, что при увеличении рабочего давления толщина стенки БВД сначала уменьшается, а затем неограниченно возрастает при стремлении к предельному значению давления. Это давление может быть определено при решении трансцендентного уравнения

$$A = \frac{50K_0K_1\bar{p}_{\text{пр}}R}{\tilde{\sigma}_{\text{в}}} \left( \frac{3}{4\pi} \frac{10\tilde{E}_0}{\bar{p}_{\text{пр}} \ln \bar{p}_{\text{пр}}} \right)^{\frac{1}{3}} = \frac{1}{b}.$$

Отсюда следует, что существует оптимальное значение давления  $\bar{p}_{\text{опт}}$ , при котором масса корпуса БВД

$$M_u = 4\pi\rho_u R^2 \delta$$

минимальна и может быть выбрана в качестве целевой функции при создании унифицированной конструкции, где  $\rho_u$  — плотность материала БВД. Это наглядно показывают расчеты для цельнометаллического БВД из титанового сплава ВТ6-С. Как видно на графиках (рис. 3),

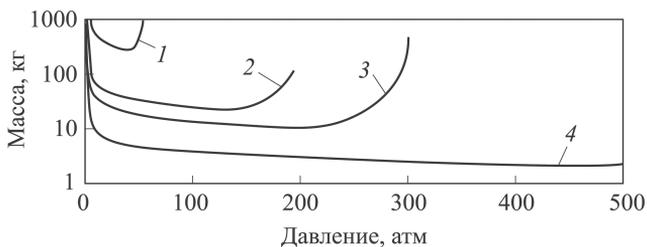
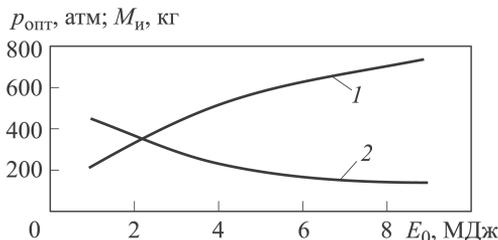


Рис. 3. Зависимость массы БВД от рабочего давления и внутренней энергии сжатого газа. Кривые 1–4 соответствуют уровням энергии 80, 9, 4,5 и 1 МДж

Рис. 4. Значения рабочего давления  $p_{\text{опт}}$  и увеличенной в 10 раз массы БВД ( $10M_u$ ) из титанового сплава в зависимости от уровня внутренней энергии сжатого газа



функция  $M_u$  имеет минимум. На рис. 4 представлены зависимости оптимального давления (2) и минимальной массы (1) от внутренней энергии.

Полученные кривые аппроксимируются уравнениями

$$p_{\text{опт}}^* = 453,4E_0^{-0,52}, \quad M_u^* = 20,6E_0. \quad (5)$$

Радиус и толщина БВД вычисляются из соотношений (2) и (3) по значениям внутренней энергии и рабочего давления. Функция радиуса БВД от внутренней энергии приведена на рис. 5.

Следует заметить, что значение толщины стенки БВД следует скорректировать с учетом возможной разностенности, которая возникает в процессе штамповки полусфер.

С помощью предложенной методики можно унифицировать БВД из различных материалов.

Методика позволяет исследовать возможность эксплуатации БВД при криогенных температурах. Для этого в соотношении (4) при расчете параметра  $A$  учитывается увеличение прочности  $\bar{\sigma}_в$  при снижении температуры до криогенных значений.

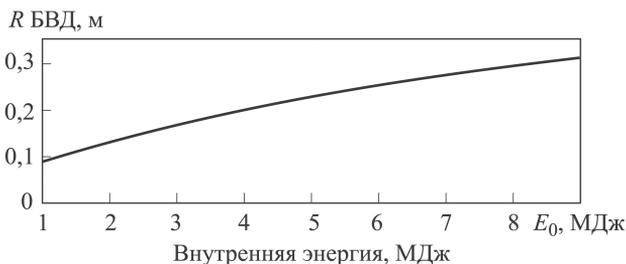


Рис. 5. Радиус  $R$  БВД как функция внутренней энергии  $E_0$

Если цель унификации БВД заключается в снижении затрат на изготовление (первая задача), то в качестве целевой функции следует принять себестоимость изделия. Для отрасли не менее важной задачей (второй задачей) является снижение затрат на использование БВД в составе РКТ. В этом случае в целевой функции следует учитывать как затраты средств на участие БВД в выведении РКТ на орбиту, так и затраты средств, связанные с использованием объема РКТ. В любом случае решение следует искать на пути изучения степени изменения затрат при унификации БВД и создания специализированных производств.

При упрощенной оценке технологической себестоимости изготовления БВД

$$C_T = C_{ам}^{пр} + C_{мат}M_u + C_{св}, \quad (6)$$

учитывались амортизационные отчисления стоимости пресса  $C_{ам}^{пр}$ , стоимость материала  $C_M = C_{мат}M_u$  и стоимость сварки полусфер, которая определялась с помощью соотношения вида:

$$C_{св} = (K_{э}C_{ээ}W_{св}^0\delta + C_{и.г}\dot{m}_{и.г}) \frac{2\pi R}{v_{св}},$$

где  $C_{ээ}$  – стоимость электроэнергии, потребляемой при сварке,  $W_{св}^0$  – мощность сварочного тока, отнесенная к единице толщины свариваемой конструкции,  $K_{э}$  – коэффициент, учитывающий расход электродов (присадочной проволоки) и характер проведения сварочных работ (ручная или автоматическая сварка),  $C_{и.г}$ ,  $\dot{m}_{и.г}$  – цена и расход инертного газа (аргона),  $v_{св}$  – скорость сварки.

Амортизационные отчисления  $C_{ам}^{пр}$  свяжем соотношением со стоимостью пресса  $C_{пр}$ , ресурсом его работы  $Re$ , а также программой выпуска изделия  $\Pi$ :

$$C_{ам}^{пр} = \frac{C_{пр}}{Re\Pi}. \quad (7)$$

В свою очередь анализ цен на прессовое оборудование, приведенных на конец 2013 г., устанавливает зависимость составляющей  $C_{пр}$  от силы пресса  $F_{пр}$

$$C_{пр} = C_{пр}^0 F_{пр}^\alpha, \quad (8)$$

где  $C_{пр}^0 = 197,4$  руб,  $\alpha = 1,6274$ .

И, наконец, сила пресса  $F_{пр}$  зависит от способа штамповки и может быть выражена через работу деформирования при штамповке полусфер с помощью методик расчета, изложенных в работах [35, 36].

Таким образом, предложенная методика позволяет унифицировать конструкции БВД по различным критериям: минимальным массе и себестоимости изготовления БВД. Анализ ее возможностей был проведен на базе оптимизации параметров стальных баллонов для нормальной и криогенной температур по критериям минимальной массы

и минимальной себестоимости изготовления БВД. Расчеты показали, что оптимальное давление и минимальная масса БВД во всех исследуемых случаях пропорциональны величинам  $p_{\text{опт}}^*$  и  $M_u^*$  для одних и тех же значений запасенной внутренней энергии  $E_0$ :

$$p_{\text{опт}} = K_{\text{рм}} p_{\text{опт}}^*, \quad M_u = K_{\text{м}} M_u^*, \quad p_{\text{опт}} = K_{\text{рс}} p_{\text{опт}}^*, \quad M_u = K_{\text{с}} M_u^*,$$

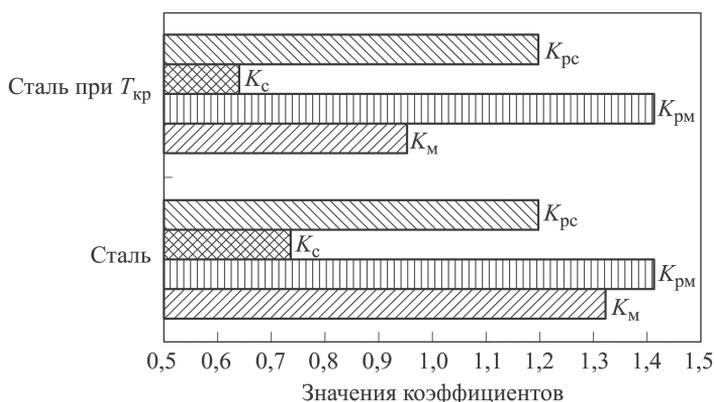
где  $p_{\text{опт}}^*(E_0)$  и  $M_u^*(E_0)$  — функции для БВД из титанового сплава, работающего при нормальной температуре,  $K_{\text{рм}}$ ,  $K_{\text{м}}$ ,  $K_{\text{рс}}$ ,  $K_{\text{с}}$  — коэффициенты пропорциональности по отношению к титановым БВД.

Значения коэффициентов представлены на рис. 6. Из рисунка следует, что при минимизации по критерию массы стальные БВД при нормальной температуре оказываются на 33 % тяжелее титановых. В то же время у стальных БВД рабочие давления на 42 % больше, чем у титановых. Значение оптимального давления не зависит от температуры эксплуатации БВД.

При погружении БВД в жидкий кислород масса стальных БВД оказываются на 5 % меньше титановых, которые рекомендованы для нормальных температур.

Приведенная диаграмма позволила сравнить титановые и стальные БВД по себестоимости. Установлено, что стальные БВД при нормальной температуре на 26 % дешевле титановых, а при криогенной температуре — на 36 %.

Анализ технологической себестоимости, рассчитанной для программы выпуска изделий 1000 шт/год, показал, что основной вклад в ее значение вносит стоимость материала. Так, для титановых БВД в диапазоне 1...9 МДж доля стоимости материала в себестоимости БВД составляет 46,9...48 %, т.е. колебание составляет 2,5 %. Поэтому результаты оптимизации параметров БВД путем минимизации технологической себестоимости и массы слабо отличаются друг от друга.



**Рис. 6.** Значения коэффициентов пропорциональности в формулах для определения рабочего давления и массы стальных БВД, работающих при нормальной и криогенной температурах

Таким образом, сильными сторонами предложенной методики унификации БВД являются:

- возможность учета влияния на конструктивно-эксплуатационные параметры унифицированных БВД программы выпуска изделий;
- возможность учета влияния технологических методов формообразования полусфер и их сварки на конструктивно-эксплуатационные параметры унифицированных БВД;
- возможность учета влияния температурного режима эксплуатации БВД.

При оценке возможности применения предложенной методики для решения второй задачи, суть которой состоит в снижении затрат  $C_{исп}$  на использование конструкции БВД в составе РКТ, исходили из допущения, что в сечении расположения БВД погонная масса корпуса ракеты-носителя  $\dot{M}_{кор}$  пропорциональна ее диаметру  $D_{кор}$  и приведенной толщине корпуса  $\delta_{кор}$ .

Эффективность проектного решения оценивалась условием для суммарной массы

$$M_{\Sigma}^{\text{эфф}} = M_u + 2\dot{M}_{кор}R \Rightarrow \min,$$

где  $\dot{M}_{кор}$  — погонная масса ракеты-носителя, которая при расчетах была принята равной  $\dot{M}_{кор} = 174,6$  кг/м. Оказалось, что для снижения суммарной массы ракеты-носителя и БВД следует увеличивать рабочее давление сжатого газа БВД, снижая его габаритный размер.

**Выводы.** 1. На базе анализа литературных источников установлено, что БВД являются уникальными объектами, допускающими решение актуальной проблемы производства в ракетно-космическом машиностроении — унификации компонентов РКТ.

2. В отличие от известных работ, посвященных унификации БВД, в качестве объекта статистического анализа предложено использовать запасенную сжатым газом внутреннюю энергию, которая определяет эффективность работы БВД в составе РКТ. Показано, что для унифицированных БВД можно рекомендовать числовой ряд значений запасаемой внутренней энергии: 1; 4,5; 9 МДж.

3. Разработанные алгоритмы оптимизации конструктивных параметров БВД по критериям массы и себестоимости их изготовления учитывают особенности технологии изготовления БВД:

- зависимость дефектности сварного шва от толщины стенки шарбаллона;
- влияние метода изготовления полусфер на массу БВД и производственные расходы и т.д.

4. Предложенные алгоритмы допускают оптимизацию конструктивных параметров БВД, эксплуатирующихся при криогенных температурах.

5. Значительный вклад в себестоимость изделия вносят затраты на материал цельнометаллических БВД из коррозионно-стойких сталей и титановых сплавов, что приводит к совпадению результатов оптимизации по критериям массы и себестоимости.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Тарасов В.А., Каиуба Л.А.* Теоретические основы технологии ракетостроения. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 351 с.
2. *Указ* Президента РФ В.В. Путина № 874 “О системе управления ракетно-космической отраслью” от 2 декабря 2013 г.
3. *Васильев В.Н.* Организация производства в условиях рынка. М.: Машиностроение, 1993. 368 с.
4. *Организация и планирование машиностроительного производства* / под ред. М.И. Ипатов, В.И. Постникова, М.К. Захаровой. М.: Высш. шк., 1988.
5. *ГОСТ 23945.0–80.* Унификация изделий. Основные положения.
6. *Антонов Г.А.* Основы стандартизации и управления качеством продукции. СПб.: Изд-во СПбУЭФ, 2011. 684 с.
7. *Методы оптимизации решений в стандартизации и унификации* // Сборник. Л.: ЦНИИ “РУМБ”, 1987. 84 с.
8. *Мартино Дж.* Технологическое прогнозирование. М.: Наука, 1997. 460 с.
9. *Семенов Г.Е.* Разработка процессно-ориентированного подхода к моделированию организационно-технологических видов деятельности в производственных системах: Дисс. . . канд. техн. наук. М.: МАТИ, 2003. 144 с.
10. *Скворцов М.А., Семенов Г.Е., Бутко А.О., Мартыченко И.В.* Технологический мониторинг продукции в процессах оснащения производства. СПб.: СпбЭлТех, 2003, С. 32–35.
11. *Цыркоч Г.А.* Разработка методики комплексной автоматизации информационного сопровождения процессов подготовки производства сложных технических систем: Дисс. . . канд. техн. наук. М.: МАТИ, 2010. 151 с.
12. *Р 50.1.027–2001.* Рекомендации по стандартизации. Информационные технологии поддержки жизненного цикла продукции. Автоматизированный обмен технической информацией. Основные положения и общие требования. Госстандарт РФ, Москва.
13. *Р 50.1.028–2001.* Рекомендации по стандартизации. Информационные технологии поддержки жизненного цикла продукции. Методология функционального моделирования. Госстандарт РФ, Москва.
14. *Р 50.1.031–2001.* Рекомендации; по стандартизации. Информационные технологии поддержки жизненного цикла продукции. Терминологический словарь. Ч. 1. Стадии жизненного цикла продукции. Госстандарт РФ, Москва.
15. *Pinto J.K., Slevin D.P.* (1988a). Critical success factors across the project life cycle // *Project Management Journal*, 19(3), P. 67–75.
16. *Островерх А.И.* Основные принципы совершенствования организационно-технологического сопровождения производственных процессов в машиностроении: Дисс. . . д-ра техн. наук. М.: Изд-во МАТИ, 2007. 287 с.
17. *Новые наукоемкие технологии в технике: Энциклопедия.* Т. 12. Технологическое обеспечение сложных технических систем. Ч. 1 / К.С. Касаев, Ю.А. Артемов, Ю.П. Астахов и др.; под общей ред. К.С. Касаева. М.: ЗАО НИИ “ЭНЦИТЕХ”, 1998. 396 с.
18. *Международная стандартизация коммерческой ракетно-космической техники* // *Электроника: наука, технология, бизнес.* 2001. № 5. С. 74.

19. *Филатов А.Н., Стерликов К.В., Микушикина М.В.* Технология нисходящего проектирования изделий РКТ, основанная на решениях компании РТС // Рациональное управление предприятием. 2013. № 2.
20. *Прудников В.А.* Методика системного проектирования комплекса средств технологического оснащения для испытаний агрегатов систем управления ракетно-космической техники на этапе производства: Дисс. . . канд. техн. наук. М.: ФГУП “ГКНПЦ им. М.В. Хруничева”, 2006. 150 с.
21. *Сухов Г.М., Сухов С.Г.* Технологическое прогнозирование испытаний технических систем летательных аппаратов. М.: Изд-во МАТИ, 1993. 86 с.
22. *Петров А.В.* Моделирование организационно-технологической среды создания ракетно-космической техники. М.: Машиностроение, 1999. 318 с.
23. *Островерх А.И., Сычев В.Н., Цырков А.В.* Реинжиниринг системы организационно-технологического сопровождения процессов производства ракетно-космической техники. ISSN 1562-322X // Технология машиностроения. 2006. № 8. С. 88–91.
24. *Шенаев М.О.* Разработка методики и средств организации технической подготовки серийного производства пневмогидравлических систем изделий авиационной техники: Дисс. . . канд. техн. наук. М.: Изд-во МАТИ, 2009. 146 с.
25. *НТО “Экспертные оценки и расчеты технологической трудоемкости изготовления средств выведения нового поколения, обеспечивающих эффективное решение задач ФКП”.* М.: ФГУП “НПО “Техномаш”, 2008.
26. *Aeronautics and space within the Air Liquide Group.* 2009. Электронный ресурс: <http://www.airliquide.com/file/otherelementcontent/pj/dp%20juin%2009%20ven55801.pdf> (дата обращения 08.07.2014).
27. *Избранные главы по авиа- и ракетостроению (в конспектах лекций) / А.С. Чумадин, В.И. Ершов, В.А. Барвинок и др.* М.: Наука и технологии, 2005. 850 с.
28. *Рач В.А.* Оптимизация цилиндрических баллонов давления по критерию массового совершенства // Механика композитных материалов. 1990. № 3. С. 489–494.
29. *Benedic Fabien, Leard Jean-Philippe, Lefloch Christian.* Helium High Pressure Tanks at EADS Space Transportation New Technology with Thermoplastic Liner. 2005. Электрон. журн.: <http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?Location=U2&doc=GetTRDoc.pdf&AD=ADA445482> (дата обращения 08.07.2014).
30. *Унификация как средство обеспечения низкой удельной стоимости и повышения надежности выведения полезной нагрузки ракетами-носителями.* Медведев А.А. // Материалы XXX Академических чтений по космонавтике. М., 2006.
31. *Семенов Г.Е.* Методика конструктивно-технологической отработки газодинамических систем изделий РКТ // Материалы XXVI Гагаринских чтений. М.: Изд-во МГАТУ “ЛАТМЭС”, 2000. С. 237.
32. *Ryan Gehm.* Scorpion Space Launch propels all-composite tanks forward. SAE International. 2008.
33. *Patrick Ponticel.* Manufacturing technology combo a first for aerospace. SAE International. 2010.
34. *Matthew Monaghan.* NASA picks Boeing for composite cryogenic propellant tank tests. SAE International. 2011.
35. *Понов И.П.* Исследование процессов штамповки полусфер вытяжкой и обжимом: Дисс. . . канд. техн. наук. М., 1976.
36. *Сизов Е.С.* Интенсификация вытяжного производства полых деталей из листового металла. Ч. 1. Штамповка-вытяжка листовых деталей пластичным металлом. Пермь: Издание по заказу Западно-Уральского отд. АЕН РФ, 1995. 239 с.

## REFERENCES

- [1] Tarasov V.A., Kashuba L.A. Teoreticheskie osnovy tekhnologii raketostroeniya [Theoretical foundations of rocket technology]. Moscow, MGТУ im. N.E. Baumana Publ., 2006. 351 p.
- [2] Executive order (Decree) of the President of Russia V.V. Putin "O sisteme upravleniya raketno-kosmicheskoy otrasl'yu [The control system of space and missile industry]", Moscow, Adm. of the RF President, December 2, 2013, no. 874.
- [3] Vasil'ev V.N. Organizatsiya proizvodstva v usloviyakh rynka [Organization of production in market conditions]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1993. 368 p.
- [4] Ipatov M.I., Postnikov V.I., Zakharova M.K. Organizatsiya i planirovaniye mashinostroytel'nogo proizvodstva [Organization and planning of machinery production]. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1988. 367 p.
- [5] State Standard of RF "GOST 23945.0-80". Unifikatsiya izdeliy. Osnovnyye polozheniya. [Product unification. Basic principles]. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1991. 8 p.
- [6] Antonov G.A. Osnovy standartizatsii i upravleniya kachestvom produktsii [Fundamentals of standardization and product quality control]. SPb., SPBUEF Publ., 2011. 684 p.
- [7] Metody optimizatsii resheniy v standartizatsii i unifikatsii. Sbornik trudov TsNII "RUMB" [Collect. Pap. of Central Scientific Research Institute "RUMB": "Methods of decisions optimization for standardization and unification"]. Leningrad, TsNII "RUMB" Publ., 1987. 84 p.
- [8] Martino J.P. Technological forecasting for decision making. Hardcover. 2nd ed. Elsevier Science Ltd, 1983. 404 p. (Russ. Ed.: Martino Dzh. Tekhnologicheskoe prognozirovaniye. Moscow, Nauka Publ., 1997. 460 p.).
- [9] Semenov G.E. Razrabotka protsessno-orientirovannogo podkhoda k modelirovaniyu organizatsionno-tekhnologicheskikh vidov deyatel'nosti v proizvodstvennykh sistemakh. Diss. kand. tekhn. nauk. Rossiyskiy gosudarstvennyy tekhn. univ. im. K.E. Tsiolkovskogo [Development of a process-oriented approach to the modeling of organizational and technological activities in manufacturing systems. Cand. tech. sci. diss. Tsiolkovskiy Russ. St. Tech. Uni.]. Moscow, Tsiolkovskiy RSTU, MATI Publ., 2003. 144 p.
- [10] Skvortsov M.A., Semenov G.E., Butko A.O., Martychenko I.V. Tekhnologicheskoye monitoring produktsii v protsessakh osnashcheniya proizvodstva [Technological monitoring in processes of equipment production]. SPb., SpbEITekh Publ., 2003, pp. 32–35.
- [11] Tsyrvkov G.A. Razrabotka metodiki kompleksnoy avtomatizatsii informatsionnogo soprovozhdeniya protsessov podgotovki proizvodstva slozhnykh tekhnicheskikh sistem. Diss. kand. tekhn. nauk. Rossiyskiy gosudarstvennyy tekhn. univ. im. K.E. Tsiolkovskogo [Development of methodology for complex automation of information support of the processes of production preparation for complex technical systems. Cand. tech. sci. diss. Tsiolkovskiy Russ. St. Tech. Univ.]. Moscow, Tsiolkovskiy RSTU, MATI Publ., 2010. 151 p.
- [12] Recommendations for Standardization "P 50.1.027-2001". Informatsionnyye tekhnologii podderzhki zhiznennogo tsikla produktsii. Avtomatizirovanny obmen tekhnicheskoy informatsiyey. Osnovnyye polozheniya i obshchie trebovaniya [Continuous acquisition and life-cycle support. Automated interchange of technical informations. Overview and general requirements]. Moscow, Standartinform Publ., 2002. 39 p.
- [13] Recommendations for Standardization "P 50.1.028-2001". Informatsionnyye tekhnologii podderzhki zhiznennogo tsikla produktsii. Metodologiya funktsional'nogo modelirovaniya [Continuous acquisition and life-cycle support. Methodology of functional modeling]. Moscow, Standartinform Publ., 2002. 54 p.

- [14] Recommendations for Standardization "P 50.1.031-2001". *Informatsionnye tekhnologii podderzhki zhiznennogo tsikla produktsii. Terminologicheskii slovar'*. Ch. 1. Stadii zhiznennogo tsikla produktsii [Continuous acquisition and life-cycle support. Glossary. Part 1. Product life-cycle stages]. Moscow, Standartinform Publ., 2002. 32 p.
- [15] Pinto J.K., Slevin D.P. Critical success factors across the project life cycle. *Project Management J.*, 1988, vol. 19, iss. 3, pp. 67–75.
- [16] Ostroverkh A.I. Osnovnye printsipy sovershenstvovaniya organizatsionno-tekhnologicheskogo soprovozhdeniya proizvodstvennykh protsessov v mashinostroenii. Diss. dokt. tekhn. nauk. Rossiyskiy gosudarstvennyy tekhn. univ. im. K.E. Tsiolkovskogo [Fundamentals for improved organizational and technological support of production processes at machinery production. Dr. tech. sci. diss. Tsiolkovskiy Russ. St. Tech. Univ.]. Moscow, Tsiolkovskiy RSTU, MATI Publ., 2007, 287 p.
- [17] Kasaev K.S., Artemov Yu.A., Astakhov Yu.P., eds. Tekhnologicheskoe obespechenie slozhnykh tekhnicheskikh sistem. Entsiklopediya v 24 tomakh "Novye naukoemkie tekhnologii v tekhnike" [Technological support of complex technical systems. In encyclopedia "New high technologies in technics". In 24 vol.]. Moscow, ENTSITEKH Publ., 1998. 396 p. (vol. 12, part 1).
- [18] International standardization of commercial rocket and space technology. *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes* [Electronika:NTB], 2001, no. 5, p. 74 (in Russ.).
- [19] Filatov A.N., Sterlikov K.V., Mikushkina M.V. Technology of top-down design of rocket space engineering (RSE) based on decisions of the "PTK" company. *Rats. Upr. Predpriyatiem* [Rat. Enterpr. Man.], 2013, no. 2 (in Russ.).
- [20] Prudnikov V.A. Metodika sistemnogo proektirovaniya kompleksa sredstv tekhnologicheskogo osnashcheniya dlya ispytaniy agregatov sistem upravleniya raketno-kosmicheskoy tekhniki na etape proizvodstva. Diss. kand. tekhn. nauk. FGUP GKNPTs im. M.V. Khrunicheva [Methodology of system design for complex of technological equipment means for testing of control systems aggregates of space rocket engineering at the production stage. Cand. tech. sci. diss. Federal state unitary enterprise "Khrunichev State Space Research and Production Center"]. Moscow, GKNPTs im. M.V. Khrunicheva Publ., 2006. 150 p.
- [21] Sukhov G.M., Sukhov S.G. Tekhnologicheskoe prognozirovaniye ispytaniy tekhnicheskikh sistem letatel'nykh apparatov [Technology forecasting of testing for engineering systems of aircraft]. Moscow, MATI Publ., 1993. 86 p.
- [22] Petrov A.V. Modelirovaniye organizatsionno-tekhnologicheskoy sredy sozdaniya raketno-kosmicheskoy tekhniki [Modeling organizational and technological environment for the creation of space rocket machinery]. Moscow, Mashinostroeniye Publ., 1999. 318 p.
- [23] Ostroverkh A.I., Sychev V.N., Tsyrov A.V. Reengineering of organizational and technological support of the processes for production of space rocket machinery. *Tekhnol. Mashinost.* [Engin. Techn.], 2006, no. 8, pp. 88–91 (in Russ.).
- [24] Shenaev M.O. Razrabotka metodiki i sredstv organizatsii tekhnicheskoy podgotovki seriynogo proizvodstva pnevmogidravlicheskikh sistem izdeliy aviatsionnoy tekhniki. Diss. kand. tekhn. nauk. Rossiyskiy gosudarstvennyy tekhn. univ. im. K.E. Tsiolkovskogo [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. Tsiolkovskiy Russ. St. Tech. Univ.]. Moscow, Tsiolkovskiy RSTU, MATI Publ., 2009. 146 p.

- [25] Report of the Federal State Unitary Enterprise “Scientific-production association “Technomas”. Ekspertnye otsenki i raschety tekhnologicheskoy trudoemkosti izgotovleniya sredstv vyvedeniya novogo pokoleniya, obespechivayushchikh effektivnoe reshenie zadach FKP” [“Expert estimates and calculations technological labor input of manufacturing launch vehicles of the new generation, providing effective decision of Federal Space Program’ tasks”]. Moscow, 2008 (unpubl.).
- [26] Aeronautics and space within the Air Liquide Group. 2009. Available at: <http://www.airliquide.com/file/otherelementcontent/pj/dp%20juin%2009%20ven55801.pdf> (accessed 08.07.2014).
- [27] Chumadin A.S., Ershov V.I., Barvinok V.A., Izbrannye glavy po avia- i raketostroeniyu (v konspektakh lektsiy) [Selected chapters on aircraft and rocket production (in the summaries of lectures)]. Moscow, Nauka i tekhnologii Publ., 2005, 850 p.
- [28] Rach V.A. Optimization of cylindrical pressure cylinders by the criterion of the mass perfection. *Mekh. komp. mat.* [MCM Journal], 1990, no. 3, pp. 489–494 (in Russ.).
- [29] Fabien B., Leard J.-Ph., Lefloch Ch. Helium High Pressure Tanks at EADS Space Transportation New Technology with Thermoplastic Liner. 2005. Available at: <http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?Location=U2&doc=GetTRDoc.pdf&AD=ADA445482> (accessed 08.07.2014).
- [30] Medvedev A.A. Unification as a means of providing low unit cost and improving reliability of payload capability excretion by launch vehicle. *Mat. XXX akademicheskikh chteniy po kosmonavtike* [Proc. XXX Academic Readings on Space], Moscow, 2006 (in Russ.).
- [31] Semenov G.E. Metodika konstruktivno-tekhnologicheskoy otrabotki gazodinamicheskikh sistem izdeliy RKT [Methodology of constructive-process for gas-dynamic systems of products of rocket space engineering (RSE)]. *Mat. XXVI Gagarinskikh chteniy* [Proc. XXVI Gagarin readings]. Moscow, LATMES Publ., 2000. 237 p.
- [32] Gehm R. Scorpius space launch propels all-composite tanks forward. SAE International. 2008. Available at: <http://articles.sae.org/2866/> (accessed 08.07.2014).
- [33] Ponticel P. Manufacturing technology combo a first for aerospace. SAE International. 2010. Available at: <http://articles.sae.org/7376/> (accessed 08.07.2014).
- [34] Monaghan M. NASA picks Boeing for composite cryogenic propellant tank tests. SAE International. 2011. Available at: <http://articles.sae.org/10275/> (accessed 08.07.2014).
- [35] Popov I.P. Issledovanie protsessov shtampovki polusfer vytyazhkoy i obzhimom. Diss. kand. tekhn. Nauk [Research of processes of forming hemispheres using hood and crimp. Cand. tech. sci. diss.]. Moscow, 1976.
- [36] Sizov E.S. Intensifikatsiya vytyazhnogo proizvodstva polykh detaley iz listovogo metalla. Ch. 1. Shtampovka-vytyazhka listovykh detaley plastichnym metallom [Intensification of exhaust production of hollow components from sheet metal. Part 1. Stamping-hood of sheet components by using plastic metal]. Perm’, 1995. 239 p.

Статья поступила в редакцию 17.04.2014

Тарасов Владимир Алексеевич — д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой “Технологии ракетно-космического машиностроения” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 200 научных работ в области технологии машиностроения.

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

Tarasov V.A. — Dr. Sci. (Eng.), professor, chief of “Rocket and Space Machine Building Technologies” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 200 publications in the field of machine building technologies.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Бараев Алексей Викторович — заместитель генерального директора по научной работе ФГУП “НПО “Техномаш”. Автор ряда научных работ в области технологий космического машиностроения и организации машиностроительного производства. ФГУП “НПО “Техномаш”, Российская Федерация, 127018, Москва, 3-й пр-д Марьиной Рощи, д. 40.

Baraev A.V. — Deputy director for R&D of FGUP “NPO Tehnomash” [Federal State Unitary Enterprise “Scientific-production association “Technomash”]. Author of several publications in the field of technologies of space machine building and machinery production management.

FGUP “NPO “Tehnomash”, Tretiy pr. Mar’inooy Roshchi 40, Moscow, 127018 Russian Federation.

Филимонов Алексей Сергеевич — канд. техн. наук, доцент кафедры “Технологии ракетно-космического машиностроения” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 30 научных работ в области технологии машиностроения.

Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Filimonov A.S. — Cand. Sci. (Eng.), assoc. professor of “Rocket And Space Machine Building Technologies” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 30 publications in the field of machine building technologies.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Боярская Раиса Владимировна — канд. техн. наук, доцент кафедры “Технологии машиностроения” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 60 научных работ в области технологии машиностроения.

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

Boyarskaya R.V. — Cand. Sci. (Eng.), assoc. professor of “Mechanical Engineering Technology” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 60 publications in the field of machine building technologies.

Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.