

УДК 621.5, 004.94, 62-9

DOI: 10.18698/0536-1044-2018-9-57-63

Обоснование выбора модели рабочего тела при расчете динамических параметров пневмогидравлических систем

А.В. Чернышев¹, Ю.В. Кюрджиев¹, Н.В. Атамасов¹, А.В. Лебедев²

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

² ПАО «Ракетно-космическая Корпорация «Энергия» им. С.П. Королёва», 141070, Королев, Московская обл., Российская Федерация, ул. Ленина, 4А

Justification of the Working Medium Model Selection for Calculation of Dynamic Parameters of Pneumohydraulic Systems

A.V. Chernyshev¹, Y.V. Kyurdzhiev¹, N.V. Atamasov¹, A.V. Lebedev²

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

² PAO «S.P. Korolev Rocket and Space Corporation «Energia», 141070, Korolev, Moscow region, Russian Federation, Lenin St., Bldg. 4A



e-mail: av-chernyshev@yandex.ru, uribmstu@yandex.ru, n.atamasov@yandex.ru, lebedev_bmstu@mail.ru



Исследованы свойства моделей рабочего тела пневмогидравлических систем, основанных на различных уравнениях состояния. Выполнен анализ применяемых подходов к выбору методов исследования, и выявлены их недостатки. Показано, как использование различных уравнений состояния рабочего тела (Дюпре — Абеля, Ван-дер-Ваальса, Редлиха — Квонга, идеального газа) влияет на точность расчета времени наполнения емкости. Для полости постоянного объема разными способами найдено время наполнения газом под давлением через отверстие постоянной площади до требуемого давления. Приведены результаты исследования на экспериментальном стенде, состоящем из двух емкостей объемом 0,01 и 0,003 м³, соединенных между собой коротким трубопроводом (рабочая среда — воздух с давлением 26 МПа). Выполнено сопоставление данных, полученных в результате расчета и эксперимента. На основе проведенных экспериментальных и расчетно-теоретических исследований сделаны выводы о необходимости применения уравнения состояния Редлиха — Квонга при определении времени наполнения емкости.

Ключевые слова: пневматическая система, уравнение состояния, реальный газ, уравнение Дюпре — Абеля, уравнение Ван-дер-Ваальса, уравнение Редлиха — Квонга



This article presents the research of properties of pneumohydraulic system models based on various equations of state. An analysis of the approaches applied to the selection of the research methods is performed, and the existing shortcomings are revealed. It is shown how the use of different equations of state (Dupre-Abel, Van der Waals, Redlich-Kwong, ideal gas) affects the accuracy of calculation of vessel filling time. For the constant volume cavity, the time of filling with gas under pressure through a hole of a constant area to the required pressure is determined in various ways. The research results are presented on an experimental stand, consisting of two vessels of 0.01 m³ and 0.003 m³, connected by a short pipeline (air with a pressure of 26 MPa is used as a working medium). The calculation and the experimental data is compared. Conclusions about the Redlich-Kwong equation of state as

the most suitable for calculating the vessel filling time are made based on the theoretical and experimental studies.

Keywords: pneumatic system, equation of state, real gas, Dupré — Abel equation, Van der Waals equation, Redlich-Kwong equation

Постановка задачи. При разработке и эксплуатации сложных высокоэнергетических пневматических систем (ПС) широко применяют методы математического моделирования как наиболее достоверный и быстрый способ получения информации о процессах и характеристиках ПС.

Традиционно при моделировании ПС рассматривают как совокупность связанных подсистем: открытых термодинамических систем — полостей; силовых элементов — поршней, пружин, сильфонов и мембран; а также ступеней — твердых тел, перемещающихся и вращающихся под действием внешних сил. Представление ПС в виде набора этих элементов и их связей (включая систему координат, параметры, характеризующие элементы, ограничения и т. д.) называют расчетной схемой.

На первых этапах (в 80-е годы прошлого века) для каждого элемента ПС конструкторы разрабатывали свою уникальную расчетную схему, для которой обосновывали выбор используемых моделей, описывающих элементы расчетной схемы, в том числе выбор уравнения состояния (УС) рабочего тела (РТ). Время, затрачиваемое на обоснование выбора УС РТ для каждого элемента расчетной схемы, составляет значительную долю общего времени реализации и расчета.

С повышением сложности ПС возрастает количество агрегатов, а следовательно, и количество математических моделей, необходимых для расчета рабочих процессов в ПС. При достижении критического уровня сложности ПС эффективность подхода одна схема — одна модель снижается.

Альтернативным способом создания расчетной схемы ПС является рассмотрение агрегата ПС как совокупности взаимодействующих типовых элементов (рис. 1). Моделируемый пневматический агрегат представляют в виде набора типовых элементов и их связей. При наличии унифицированных моделей типовых элементов ПС, из которых можно составить расчетную схему любого агрегата ПС, и общего подхода к построению его расчетной схемы время разработки модели возрастает незначительно. Создание унифицированных моделей элементов агрегатов ПС является актуальной задачей [1–3].

В ряде работ, например в [3–9], проведен анализ точности расчета термодинамических параметров РТ для различных УС, позволяющий обоснованно выбрать модель состояния РТ. Оценка точности выполнена для таких параметров, как внутренняя энергия, энтальпия, теплоемкость и скорость звука. Некоторые УС позволяют учитывать фазовые переходы в РТ.

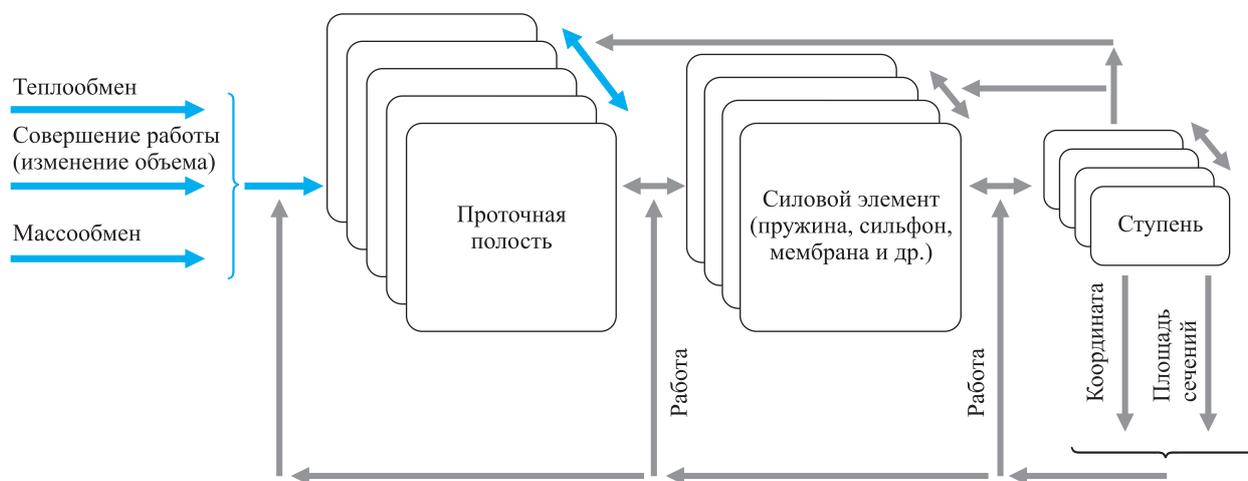


Рис. 1. Агрегат ПС как совокупность взаимодействующих типовых элементов: проточных полостей, силовых элементов и ступеней

Однако для расчета пневматических агрегатов одним из основных критериев является время переходных процессов, как термодинамических, так и кинематических. Данных, представленных в работах по этой теме (например, в [1, 2, 4–14]), недостаточно для обоснования выбора УС по критерию точности вычисления времени переходных процессов для типового элемента в виде проточной полости.

При этом существующие методы определения времени наполнения емкости постоянного объема обычно основаны на допущениях идеального газа или предполагают применение программ математического моделирования с применением метода конечных элементов. В первом случае, как показано в публикациях [4–7], значительные неточности закладываются уже на начальном этапе расчета. Во втором случае расчет может стать неактуальным, поскольку программы, применяющие метод конечных элементов, крайне требовательны к производительности вычислительной техники, а время реализации математических моделей агрегатов в таких расчетных комплексахкратно превышает остальные временные затраты.

Цель исследования — оценка точности расчета времени наполнения полости постоянного объема как основного типового элемента ПС при использовании моделей, описывающих состояние РТ различными УС.

Результаты расчета времени наполнения емкости постоянного объема для разных моделей РТ сопоставлялись с экспериментальными данными. Для этого был разработан измерительный стенд, схема которого приведена на рис. 2. Стенд включает в себя две емкости РСВ1 объемом $V_1 = 0,01 \text{ м}^3$ и РСВ2 объемом $V_4 = 0,003 \text{ м}^3$, соединенные между собой коротким трубопроводом. В качестве рабочей среды использован воздух с давлением

26 МПа, который подается в полость объемом V_1 через ограничительный дроссель ДРН1. Наполнение емкости РСВ2 осуществлялось через отверстие постоянной площади дросселя ДРН2 диаметром 0,8 мм. Показания датчиков давления МН1–МН4 (p_1 – p_4) и температуры ТДН1–ТДН4 (T_1 – T_4) фиксировались. Дискретизация сигналов — около 0,01 с.

Основные результаты исследования. Время наполнения емкости объемом V газом под давлением через отверстие постоянной площади до требуемого давления определено с помощью различных моделей, описывающих состояние РТ.

На основе допущений модели идеального газа получена аналитическая зависимость [8] для вычисления времени наполнения емкости

$$t_{\text{нап}} = t^* + \Delta t_{\text{докр}} = \frac{V(p_p \beta_{\text{кр}} - p_0)}{\mu_p S_p k k_0 p_p \sqrt{RT_p}} + \frac{V}{\mu_p S_p \sqrt{RT_p}} \sqrt{\frac{2}{k(k+1)}}, \quad (1)$$

где t^* — время наддува полости от начального давления p_0 до давления $p_p \beta_{\text{кр}}$ ($\beta_{\text{кр}}$ — критическое отношение давлений); $\Delta t_{\text{докр}}$ — время наддува полости от давления $p_p \beta_{\text{кр}}$ до давления p_p ; p_p и p_0 — требуемое (конечное) и начальное давление в емкости; $\beta_{\text{кр}}$ — критическое отношение давлений; μ_p — коэффициент расхода; S_p — площадь отверстия, через которое наполняется емкость; k — показатель адиабаты; k_0 — показатель адиабаты при нормальных условиях; R — газовая постоянная; T_p — конечная температура.

На базе методов, предложенных в работах [1, 9], реализованы подходы к моделированию рабочих процессов в агрегатах ПС с использованием различных УС РТ. Так как внутренняя

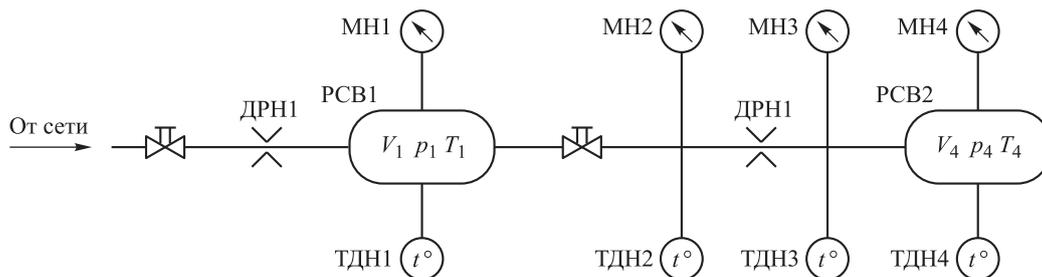


Рис. 2. Схема измерительного стенда

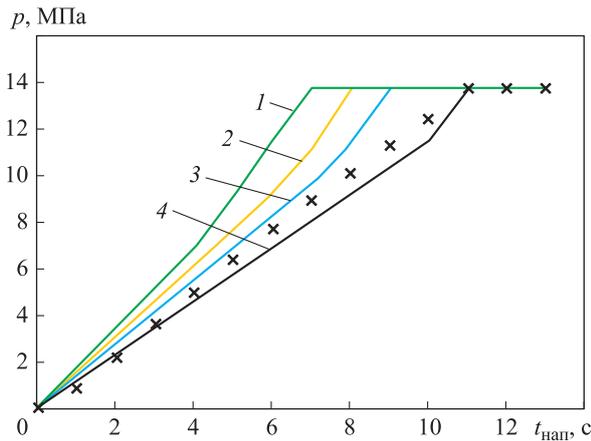


Рис. 3. Зависимости давления p от времени наполнения $t_{\text{нап}}$ емкости постоянного объема:
 × — экспериментальные данные;
 1–4 — результаты расчета с использованием УС Ван-дер-Ваальса, Дюпре — Абеля, идеального газа и Редлиха — Квонга

энергия и энтальпия РТ являются полными дифференциалами, на основе уравнения баланса энергии для открытой термодинамической системы получены уравнения изменения давления p и плотности ρ рабочей среды в полости:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{\frac{du}{dt} - \left(\frac{\partial u}{\partial \rho}\right)_p \frac{d\rho}{dt}}{\left(\frac{\partial u}{\partial p}\right)_\rho}; \quad (2)$$

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{1}{V} \left(\Sigma G - \rho \frac{dV}{dt} \right), \quad (3)$$

где t — время; u — внутренняя энергия; G — расход газа.

Значение температуры в емкости определяется из УС реального газа. Эти УС корректны для любого РТ в пределах основных допущений термодинамического подхода.

Для расчета параметров состояния РТ (уравнения (2) и (3)) использованы УС Дюпре — Абеля, Ван-дер-Ваальса, Редлиха — Квонга и идеального газа.

На рис. 3 приведены данные эксперимента и результаты расчета давления в емкости, выполненного с использованием различных моделей состояния РТ.

Основные результаты расчетно-теоретических и экспериментальных исследований

Объем емкости РСВ2 V_4 , м ³	0,003
Требуемое (конечное) давление в емкости p_p , Па	13 671 450,8
Начальное давление в емкости p_0 , Па	841 705
Критическое отношение давлений $\beta_{\text{кр}}$	0,528
Площадь отверстия, через которое наполняется емкость, S_p , м ²	$5,02 \cdot 10^{-7}$
Газовая постоянная R , Дж/(кг·К)	287
Коэффициент расхода μ_p	0,95
Показатель адиабаты k	1,4
Показатель адиабаты при нормальных условиях k_0	1,4
Конечная температура T_p , К	282,38
Экспериментальное время наполнения емкости, с	10
Время наполнения емкости/его отклонение от экспериментального значения, с/%, при расчете с использованием:	
зависимости (1)	22,3/-123
УС идеального газа	9/10
УС Дюпре — Абеля	8/20
УС Ван-дер-Ваальса	7/30
УС Редлиха — Квонга	11/-10

Выводы

В результате исследований установлено, что для обоснования выбора модели состояния РТ типового элемента в виде проточной полости для давления до 20 МПа необходимо учитывать следующее:

- аналитическая зависимость (1), выведенная с использованием допущений идеального газа, дает существенные отклонения расчетного времени наполнения емкости от экспериментального значения и может быть применена только в оценочных (предварительных) расчетах;

- наименьшие отклонения расчетного времени наполнения емкости от экспериментального (10 %) обеспечивают модели с использованием УС Редлиха — Квонга и идеального газа. Следует отметить, что эти отклонения имеют разный знак;

- применение в практических задачах УС Редлиха — Квонга дает запас по времени наполнения емкости, что позволяет избежать наддува емкости ниже расчетного. Это заключение качественно согласуется с результатами, полученными в исследованиях [3, 15].

Литература

- [1] Елагин М.Ю. *Математическое моделирование нестационарных процессов в открытых термодинамических системах*. Тула, Изд-во ТулГУ, 1999. 112 с.
- [2] Опарин Д.М. *Разработка автоматизированной системы построения информационных моделей процессов управления пневмосистемами на базе объектно-ориентированного подхода*. Дис. ... канд. техн. наук. Владимир, 2002. 252 с.
- [3] Никишкин С.И., Котов В.В. Выбор математического обеспечения для учета свойств реального газа при автоматизированном проектировании систем газоснабжения. *Мониторинг. Наука и технологии*, 2016, № 2, с. 84–93.
- [4] Павловский В.А. *Введение в термодинамику реальных газов*. Санкт-Петербург, Крыловский государственный научный центр, 2013. 230 с.
- [5] Поливцев В.П., Поливцев В.В., Мосин Е.Е. Исследование быстропротекающего процесса наполнения сжатым воздухом емкости постоянного объема. *Вестник СевГТУ*, 2013, вып. 14, с. 67–72.
- [6] Подчуфаров Б.М., Подчуфаров Ю.Б. *Тепломеханика*. Тула, ТПИ, 1985. 103 с.
- [7] Рязанов А.А. *Краны шаровые для пневмогидравлических систем. Основы проектирования*. Москва, Машиностроение, 2011. 152 с.
- [8] Арзуманов Ю.Л., Халатов Е.М., Чекмазов В.И., Чуканов К.П. *Математические модели систем пневмоавтоматики*. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. 296 с.
- [9] Чернышев А.В., Атамасов Н.В. Рекомендации по моделированию процессов истечения в пневматических системах с учетом свойств реального газа на основе безразмерных критериев. *Компрессорная техника и пневматика*, 2017, № 3, с. 19–23.
- [10] Mithun S., Mariappa S., Suresh Gayakwad. Modeling and simulation of pneumatic brake system used in heavy commercial vehicle. *Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 2014, vol. 11, is. 1, ver. II, pp. 1–9.
- [11] Dutton J.C., Coverdill R.E. Experiments to Study the Gaseous Discharge and Filling of Vessels. *International Journal of Engineering Education*, 1997, vol. 13, no. 2, pp. 123–134.
- [12] Thorncroft G., Patton J.S., Gordon R. Modeling Compressible Air Flow in a Charging or Discharging Vessel and Assessment of Polytropic Exponent. *ASEE Annual Conference and Exposition, Conference Proceedings*, 2007. 18 p.
- [13] Aakenes F. *Frictional pressure-drop models for steady-state and transient two-phase flow of carbon dioxide*. Master of Science in Product Design and Manufacturing, Norwegian University of Science and Technology, 2012. 124 p.
- [14] Туголуков Е.Н., Егоров Е.С. Методика математического моделирования термодинамических процессов поршневого компрессора. *Вестник Астраханского государственного технического университета. Сер. Управление, вычислительная техника и информатика*, 2014, № 1, с. 45–53.
- [15] Павловский В.А., Чистов А.Л. Моделирование динамики заполнения резервуара реальным газом. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления*, 2014, № 3, с. 46–57.

References

- [1] Elagin M.Yu. *Matematicheskoe modelirovanie nestatsionarnykh protsessov v otkrytykh termodinamicheskikh sistemah* [Mathematical modeling of unsteady processes in open thermodynamic systems]. Tula, TulSU publ., 1999. 112 p.
- [2] Oparin D.M. *Razrabotka avtomatizirovannoy sistemy postroeniya informatsionnykh modeley protsessov upravleniya pnevmosistemami na baze ob"ektno-orientirovannogo podhoda*. Diss. kand. tekh. nauk [Development of an automated system for building information models of pneumatic systems control processes based on object-oriented approach. Cand. tech. sci. diss.]. Vladimir, 2002. 252 p.
- [3] Nikishkin S.I., Kotov V.V. *Vybor matematicheskogo obespecheniya dlya ucheta svoystv real'nogo gaza pri avtomatizirovannom proektirovanii sistem gazosnabzheniya* [Selection

- of mathematical software for account of real gas properties at automated engineering of gas systems]. *Monitoring. Nauka i tekhnologii* [Monitoring. Science and technology]. 2016, no. 2, pp. 84–93.
- [4] Pavlovskiy V.A. *Vvedenie v termodinamiku real'nyh gazov* [Introduction to thermodynamics of real gases]. St. Petersburg, Krylov State Research Centre publ., 2013. 230 p.
- [5] Polivtsev V.P., Polivtsev V.V., Mosin E.E. Issledovanie bystroprotekayushchego protsessa napolneniya szhatym vozduhom emkosti postoyannogo ob'ema [Study of the high-speed process of filling a constant volume container with compressed air]. *Vestnik SevGTU* [Bulletin SevSTU]. 2013, is. 14, pp. 67–72.
- [6] Podchufarov B.M., Podchufarov Yu.B. *Teplomekhanika* [Heat mechanics]. Tula, TPI publ., 1975. 103 p.
- [7] Ryazanov A.A. *Krany sharovye dlya pnevmogidravlicheskih sistem. Osnovy proektirovaniya* [Ball valves for pneumatic and hydraulic systems. Design basics]. Moscow, Mashinostroenie publ., 2011. 152 p.
- [8] Arzumanov Yu.L., Halatov E.M., Chekmazov V.I., Chukanov K.P. *Matematicheskie modeli sistem pnevmoavtomatiki* [Mathematical models of pneumatic systems]. Moscow, Bauman Press, 2009. 296 p.
- [9] Chernyshev A.V., Atamasov N.V. Rekomendatsii po modelirovaniyu protsessov istecheniya v pnevmaticheskikh sistemah s uchetom svoystv real'nogo gaza na osnove bezrazmernykh kriteriev [Selection of mathematical models for discharge process in pneumatic systems with the assumption of the real gas using dimensionless criteria]. *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika* [Compressors and Pneumatics]. 2017, no. 3, pp. 19–23.
- [10] Mithun S., Mariappa S., Suresh Gayakwad. Modeling and simulation of pneumatic brake system used in heavy commercial vehicle. *Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 2014, vol. 11, is. 1, ver. 2, pp. 1–9.
- [11] Dutton J.C., Coverdill R.E. Experiments to Study the Gaseous Discharge and Filling of Vessels. *International Journal of Engineering Education*, 1997, vol. 13, no. 2, pp. 123–134.
- [12] Thorncroft G., Patton J.S., Gordon R. Modeling Compressible Air Flow in a Charging or Discharging Vessel and Assessment of Polytropic Exponent. *ASEE Annual Conference and Exposition, Conference Proceedings*, 2007. 18 p.
- [13] Aakenes F. *Frictional pressure-drop models for steady-state and transient two-phase flow of carbon dioxide*. Master of Science in Product Design and Manufacturing, Norwegian University of Science and Technology, 2012. 124 p.
- [14] Tugolukov E.N., Egorov E.S. Metodika matematicheskogo modelirovaniya termodinamicheskikh protsessov porshnevogo kompressora [Methods of mathematical modeling of thermodynamic processes of piston compressor]. *Vestnik Astrahanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika* [Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics]. 2014, no. 1, pp. 45–53.
- [15] Pavlovskiy V.A., Chistov A.L. Modelirovanie dinamiki zapolneniya rezervuara real'nyim gazom [Modeling of real gas tank fill-up dynamics]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Prikladnaya matematika. Informatika. Protessy upravleniya* [Vestnik SPbSU. Applied Mathematics. Computer Science. Control Processes]. 2014, no. 3, pp. 46–57.

Статья поступила в редакцию 05.06.2018

Информация об авторах

ЧЕРНЫШЕВ Андрей Владимирович (Москва) — доктор технических наук, профессор кафедры «Вакуумная и компрессорная техника». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: av-chernyshev@yandex.ru).

КЮРДЖИЕВ Юрий Владимирович (Москва) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Вакуумная и компрессорная техника». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: uribmstu@yandex.ru).

АТАМАСОВ Никита Владимирович (Москва) — аспирант кафедры «Вакуумная и компрессорная техника». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: n.atamasov@yandex.ru).

ЛЕБЕДЕВ Антон Вячеславович (Королёв) — инженер-конструктор. ПАО «Ракетно-космическая Корпорация «Энергия» им. С.П. Королёва» (141070, Королев, Московская обл., Российская Федерация, ул. Ленина, 4А, e-mail: lebedev_bmstu@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Чернышев А.В., Курджиов Ю.В., Атамасов Н.В., Лебедев А.В. Обоснование выбора модели рабочего тела при расчете динамических параметров пневмогидравлических систем. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2018, № 9, с. 57–63, doi: 10.18698/0536-1044-2018-9-57-63.

Please cite this article in English as:

Chernyshev A.V., Kyurdzhiev Y.V., Atamasov N.V., Lebedev A.V. Justification of the Working Medium Model Selection for Calculation of Dynamic Parameters of Pneumohydraulic Systems. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2018, no. 9, pp. 57–63, doi: 10.18698/0536-1044-2018-9-57-63.

Information about the authors

CHERNYSHEV Andrei Vladimirovich (Moscow) — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Vacuum and Compressor Equipment. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Bauman-skaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: av-chernyshev@yandex.ru).

KYURDZHIEV Yuriy Vladimirovich (Moscow) — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Vacuum and Compressor Equipment. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Bauman-skaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: uribmstu@yandex.ru).

ATAMASOV Nikita Vladimirovich (Moscow) — Postgraduate, Department of Vacuum and Compressor Equipment. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Bauman-skaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: n.atamasov@yandex.ru).

LEBEDEV Anton Vyacheslavovich (Korolev) — Design Engineer. PAO S.P. Korolev Rocket and Space Corporation Energia (141070, Russian Federation, Moscow region, Korolev, Lenin St., Bldg. 4A, e-mail: lebedev_bmstu@mail.ru).