

DOI: 10/15593/2224-9877/2017.1.07

УДК 621.01-189.2-343

**А.Е. Кобитянский, А.В. Шафранов, В.С. Белобородов**Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет, Пермь, Россия**ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ДОЗАТОРНЫХ СИСТЕМ  
НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА**

Дозаторные системы применяются в различных областях техники, существенно влияя на качество и технологичность процесса производства. В статье рассмотрены вопросы разработки методики расчета динамических систем объемного дозирования жидких сред на примере дозатора с кривошипно-ползунным приводом исполнительного органа. Расчет осуществлялся с помощью математического моделирования, играющего существенную роль при проектировании таких систем. Сформирована расчетная схема и на ее основе получена математическая модель, соотношения которой учитывают динамическую взаимосвязь элементов дозаторной системы в различных режимах эксплуатации. Предложена методика и проведено моделирование динамики процесса дозирования на основе численного эксперимента. Выбраны факторы и функции отклика дозаторной системы. Реализация моделирования осуществлена с помощью пакета программ в системе MATLAB методом Рунге–Кутты 4-го и 5-го порядков. Представлены основные кинематические и динамические характеристики процесса дозирования в виде соответствующих диаграмм. С опорой на результаты проведенных опытов были получены уравнения, характеризующие зависимость функций отклика от факторов для одного из вариантов моделирования. По результатам численного эксперимента приведены аналитические зависимости эксплуатационных характеристик от конструктивно-технологических параметров системы. Дана графическая иллюстрация полученных зависимостей в координатах натуральных значений факторов. Для проверки адекватности полученных полиномов выбраны промежуточные точки плана, в которых осуществлялись дополнительные опыты. Проведена оценка погрешностей всех целевых функций в контрольных и промежуточных точках, показывающая допустимый уровень отклонения значений функций отклика, полученных опытным путем и решением полиномов.

**Ключевые слова:** динамическая взаимосвязь, дозаторная система, кривошипно-ползунный механизм, критерии качества, математическая модель, моделирование, привод, эксперимент, фактор, функции отклика.

**A.E. Kobityansky, A.V. Shafranov, V.S. Beloborodov**

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**STUDY OF THE DYNAMIC OF THE DOSING SYSTEMS BASED  
ON THE NUMERICAL EXPERIMENT**

Dispensing systems are used in various fields of technology, significantly affecting the quality and workability of the production process. In the article discusses the development of methods of calculation of dynamic systems volumetric dosing of liquid media on the example of the dispenser with a slider-crank drive of the executive body. Implementation of the method of calculation was carried out with the help of mathematical modeling plays an important role in the design of such systems. It formed a design scheme, and based on the mathematical model, the ratio of which take into account the dy-

dynamic relationship of elements batching system in various operating modes. The proposed method and the simulation of the dynamics of the dosing process on the basis of numerical experiment. Selected factors and the response functions of the dosing system. The simulation performed using MATLAB software package system Runge-Kutta 4 and 5 orders of magnitude. Presented the kinematic and dynamic characteristics of the dispensing process in the form of the corresponding diagrams. Based on the results of the experiments were obtained equations describing the dependence of the response functions of the factors for one of the simulation options. According to the results of a numerical experiment obtained analytical modeling based on the performance of constructive-technological parameters of the system. Given graphical illustration of the dependences obtained in the coordinates natural values of the factors. To check the adequacy of the obtained polynomials selected intermediate points of plan, which carried out additional experiments. The estimation errors all of the objective functions in the control and intermediate points, showing an acceptable level of deviation of the response function values obtained by experiment and the decision of polynomials.

**Keywords:** dynamic connection, dispensing systems, slider-crank mechanism, figure of merit, mathematical model, modelling, driving gear, experiment, factor, response functions.

При проектировании дозаторных систем, применяемых в различных областях техники, актуальной является проблема оценки влияния конструктивно-технологических параметров на качество функционирования таких систем [1, 2]. Одним из важных этапов проектирования становится процесс моделирования, позволяющий оценить воздействие различных параметров на эксплуатационные характеристики дозаторов (точность процесса дозирования, стабильность дозирования, постоянство процесса дозирования и др.) [3–5].

Оценка характеристик дозирования в зависимости от ряда параметров дает возможность оптимизировать как конструкцию, так и качественные показатели работы дозаторных систем. Такой анализ может быть получен с помощью численного эксперимента на основе соответствующих расчетных схем и математических моделей.

С учетом динамической взаимосвязи всех элементов систем дозирования жидких сред с различным типом привода исполнительного органа (гидравлический, механический) разработаны соответствующие математические модели [6–9]. На их основе сформирована обобщенная математическая модель, учитывающая взаимосвязь конструктивно-технологических и режимных параметров систем дозирования, описываемая системой

$$\dot{Y} = \bar{F}(i = 1...8), \quad (1)$$

где  $\dot{Y}$  – вектор определяемых кинематических и силовых характеристик процесса дозирования, а именно угол поворота и угловая скорость ротора двигателя, кинематические характеристики плунжера и значения давлений в силовой части и сливных камерах дозатора;  $\bar{F}$  – век-

тор-столбец комбинации геометрических, кинематических и силовых факторов [9].

В предлагаемой статье, на примере кривошипно-ползунного привода исполнительного органа дозатора, изложена методика исследования динамики систем объемного дозирования жидких сред. Расчетная схема представлена на рис. 1.

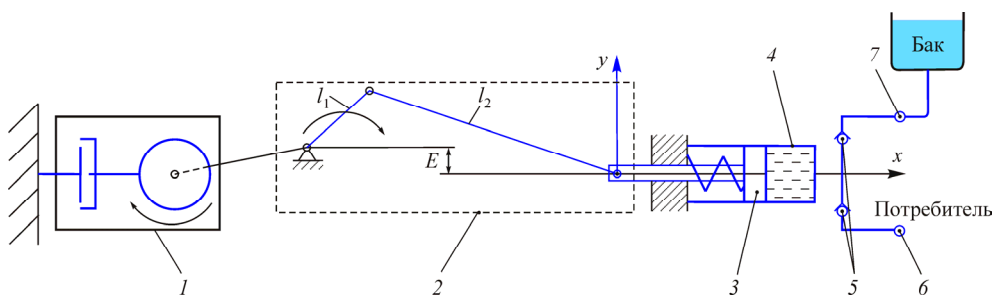


Рис. 1. Расчетная схема дозатора с кривошипно-ползунным приводом: 1 – электродвигатель; 2 – кривошипно-ползунный механизм; 3 – плунжер; 4 – цилиндр дозатора; 5 – обратные клапаны; 6 – потребитель реагента; 7 – бак с реагентом

В процессе исследований приняты следующие основные гипотезы: рабочая и дозируемая жидкости сжимаемы, стенки цилиндра дозатора податливы, учитывается полная механическая характеристика приводного электродвигателя дозатора [10]. При этом математическая модель процесса дозирования в соответствии с расчетной схемой (см. рис. 1) и обобщенной математической моделью (1) представлена соотношениями, в которых приняты следующие обозначения:  $M_d$  ( $M_c$ ) – приведенный момент сил движущих (сопротивления), Нм;  $Q_n$  ( $Q_b$ ),  $G_n$  ( $G_b$ ),  $p_n$  ( $p_b$ ) – расход ( $m^3/c$ ), проводимость клапанов ( $m^4 \cdot c^{-1} \cdot H^{-0,5}$ ) и давление (МПа) потребителя (бака);  $S_H$  ( $\Delta V_H$ ) – площадь сечения (мертвый объем) цилиндра дозатора,  $m^2$  ( $m^3$ );  $K_{упрH}$  – приведенный коэффициент упругости жидкости и стенок полости гидроцилиндра;  $L$  ( $x_0$ ) – ход (начальное положение) плунжера, м;  $E_{жH}$  ( $E_{стH}$ ) – модуль упругости жидкости (стенок полости гидроцилиндра), МПа;  $d_H$  ( $\delta_H$ ) – диаметр (толщина стенок) гидроцилиндра, м;  $R_{тр}^0$  – сила трения покоя, Н;  $H_H$  ( $\varphi_H$ ) – высота манжетного уплотнения (м) (коэффициент трения) цилиндра;  $c$  – жесткость пружины, Н/м;  $l_{S_1}$  ( $J_{S_1}$ ) – положение центра

масс (момент инерции) кривошипа, м (кг·м<sup>2</sup>);  $m_1$  ( $m_3$ ) – масса кривошипа (ползуна), кг;  $\lambda$  – коэффициент шатуна,  $\lambda = l_1/l_2$ ;  $J_{\text{пр}}$ ,  $J_{\text{м}}$ ,  $J_{\text{ред}}$ ,  $J_{\text{дв}}$  – приведенные моменты инерции системы, кривошипно-ползунного механизма, редуктора, ротора двигателя, кг·м<sup>2</sup>;  $i$  – передаточное число редуктора.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dy_2}{dt} = \left[ M_{\text{дл}} \cdot U(t) \cdot i - M_{\text{с}} - \frac{y_2^2}{2} \cdot \frac{dJ_{\text{пр}}}{d\varphi} \right] \cdot \frac{1}{J_{\text{пр}}}, \\ \frac{dy_6}{dt} = \frac{S_H y_4 - Q_{\text{п}} + Q_{\text{б}}}{K_{\text{упрH}}}, \\ Q_{\text{п}} = \begin{cases} 0, & p_{\text{п}} \geq y_6, \\ G_{\text{п}} \sqrt{y_6 - p_{\text{п}}}, & p_{\text{п}} < y_6, \end{cases} \\ Q_{\text{б}} = \begin{cases} 0, & y_6 \geq p_{\text{б}}, \\ G_{\text{б}} \sqrt{p_{\text{б}} - y_6}, & y_6 < p_{\text{б}}, \end{cases} \\ K_{\text{упрH}} = \frac{(\Delta V_H + (L - y_3) S_H)}{E_{\text{жH}}} \left( 1 + \frac{d_H E_{\text{жH}}}{\delta_H E_{\text{срH}}} \right), \\ M_{\text{с}} = (y_6 S_H + c(x_0 + y_3) + R_{\text{тр}}) \cdot \frac{y_4}{y_2}, \\ J_{\text{пр}} = J_{\text{м}} + (J_{\text{ред}} + J_{\text{дв}}) \cdot i^2, \\ J_{\text{м}} = J_{S_1} + m_1 \cdot l_{S_1}^2 + m_3 \cdot l_1^2 \cdot (\sin y_1 + 1/2 \cdot \lambda \cdot \sin 2y_1)^2, \\ R_{\text{тр}} = R_{\text{тр}}^0 + \frac{\pi \varphi_H d_H H_H}{2} |y_6| + H_H |y_4|, \\ y_3 = l_1 \cdot (1 + \lambda/4 - \cos y_1 - 1/4 \cdot \lambda \cdot \cos 2y_1 - (E/l_1) \cdot \lambda \cdot \sin y_1), \\ y_4 = l_1 \cdot y_2 \cdot (\sin y_1 + 1/2 \cdot \lambda \cdot \sin 2y_1 - (E/l_1) \cdot \lambda \cdot \cos y_1), \\ \frac{dJ_{\text{пр}}}{dy_1} = 2 \cdot m_3 \cdot l_1^2 \cdot (\sin y_1 + 1/2 \cdot \lambda \cdot \sin 2y_1) \cdot (\cos y_1 + \lambda \cdot \cos 2y_1). \end{array} \right. \quad (2)$$

Решения системы (2) проводятся с применением интегрированных процедур для дифференциальных уравнений численным методом Рунге–Кутты 4-го и 5-го порядков с автоматическим выбором шага в программном пакете MATLAB R2014a [11, 12].

В процессе расчетов варьировались геометрические, кинематические и силовые параметры дозатора. Результаты вычислений формировались в виде соответствующих таблиц и диаграмм. Основные характеристики процесса дозирования представлены временными зависимостями таких параметров, как перемещение плунжера дозатора и его скорости, изменения давления в гидроцилиндре и расхода дозируемой жидкости и др. Фрагмент одного из результатов расчетов дозатора с приводом в виде аксиального кривошипно-ползунного механизма представлен на рис. 2.

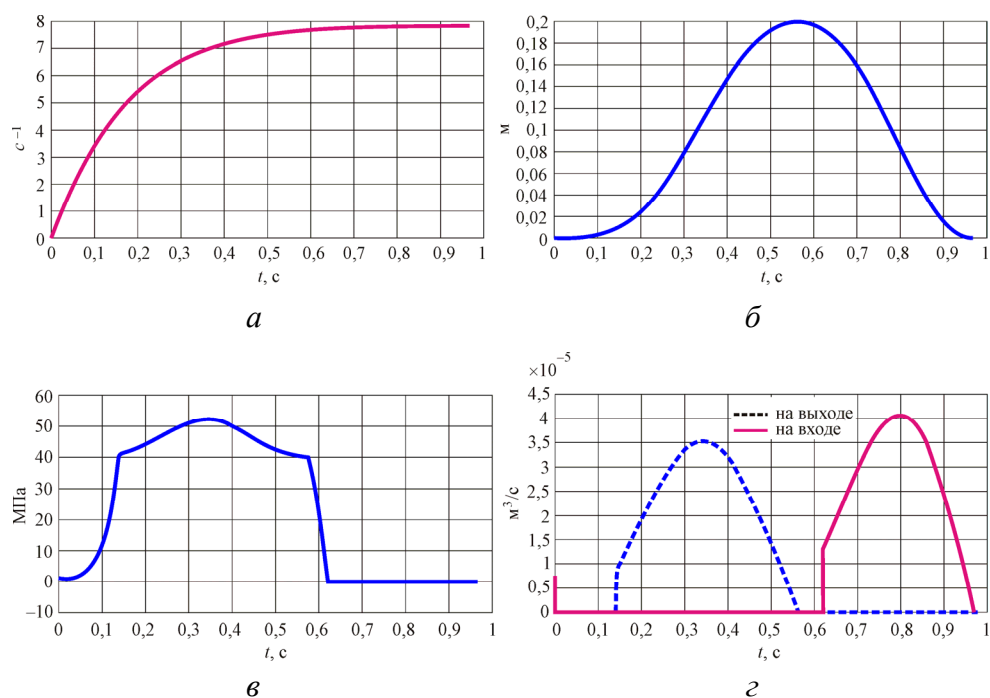


Рис. 2. Характеристики дозаторной системы с аксиальным кривошипно-ползунным приводом исполнительного органа за один цикл работы: *a* – угловая скорость кривошипа; *б* – перемещение исполнительного органа; *в* – давление в нагнетательной камере цилиндра дозатора; *г* – расход дозаторной системы

Процесс моделирования динамики системы дозирования с учетом соотношений (2) заключался в проведении численного эксперимента. Суть численного эксперимента – варьирование значений выбранных независимых параметров (факторов) и получение характеристик про-

цесса дозирования (целевых функций) в зависимости от этих факторов. За основу эксперимента взято ортогональное центральное композиционное планирование второго порядка [13–15].

Для примера в одном из вариантов моделирования в качестве факторов выбраны длина кривошипа  $x_1$  и передаточное число редуктора от двигателя к кривошипу  $x_2$ . Функции отклика (целевые функции)  $Y_1, Y_2$  – соответственно расход и давление в рабочем цилиндре дозатора. Для рассмотренного примера матрица планирования численного эксперимента представлена в табл. 1.

Таблица 1

Матрица планирования

Содержание плана	Номер опыта	$X_1$	$X_2$	$X_1X_2$	$X_1^2-2/3$	$X_2^2-2/3$	$Y_i$	
							$Q_n, \text{см}^3/\text{с}$	$p_H, \text{МПа}$
План типа $2^2$	1	+1	+1	+1	1/3	1/3	47,92	61,52
	2	-1	+1	-1	1/3	1/3	24,92	46,34
	3	+1	-1	-1	1/3	1/3	96,52	128,7
	4	-1	-1	+1	1/3	1/3	55,52	72,68
«Звездные точки»	5	+1	0	0	1/3	-2/3	65,12	84,10
	6	-1	0	0	1/3	-2/3	33,12	47,36
	7	0	+1	0	-2/3	1/3	40,42	57,80
	8	0	-1	0	-2/3	1/3	80,02	105,70
Нулевая точка	9	0	0	0	-2/3	-2/3	53,12	69,6

Примечание:  $X_1$  и  $X_2$  – кодированные значения выбранных факторов.

По результатам опытов были получены уравнения функций отклика.

Уравнение, характеризующее расход жидкости,  $\text{см}^3/\text{с}$ :

$$Q = 53,12 + 16X_1 - 19,8X_2 - 4X_1^2 + 7,1X_2^2 - 4,5X_1X_2. \quad (3)$$

Уравнение, характеризующее давление в цилиндре дозатора, МПа:

$$P = 69,6 + 18,37X_1 - 23,95X_2 - 3,87X_1^2 + 12,15X_2^2 - 10,78X_1X_2. \quad (4)$$

Оба фактора в области их изменения существенно влияют на значения целевых функций. При переходе к натуральным значениям факторов функции отклика представлены на рис. 3 в виде соответствующих поверхностей.

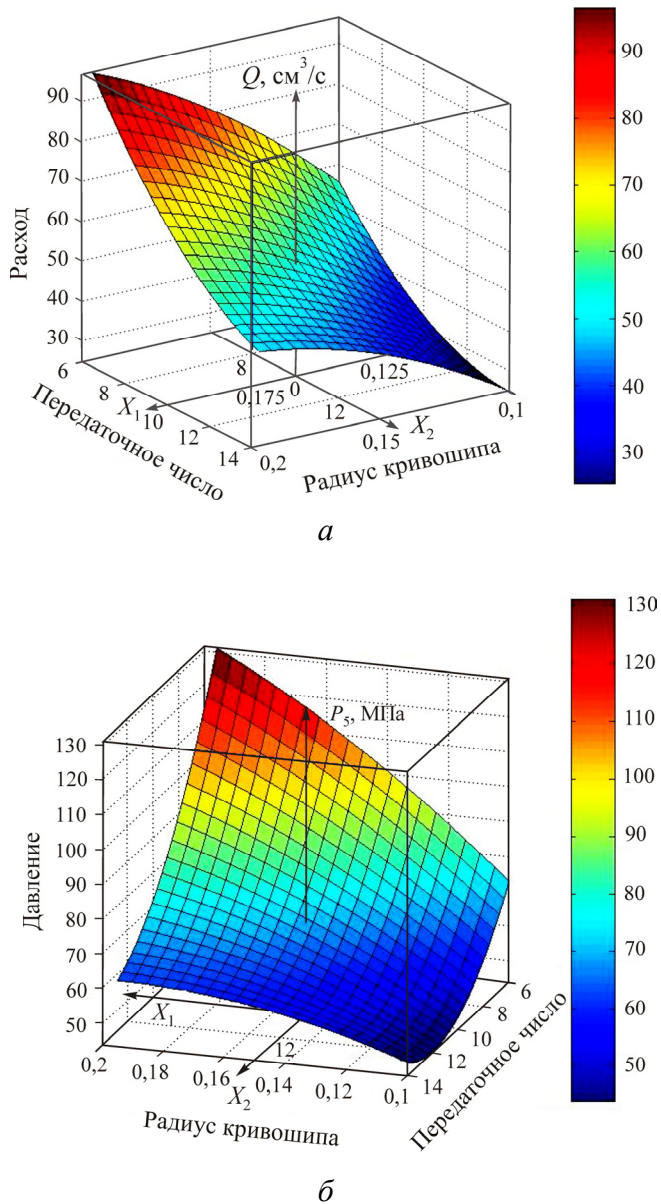


Рис. 3. Поверхности отклика: а – расход; б – давление

Результаты определения погрешностей ( $\delta_Q$ ,  $\delta_P$ ) целевых функций при проведении расчетов непосредственным решением системы (2) в промежуточных точках плана представлены в табл. 2.

Таблица 2

Погрешности по расходу и давлению в промежуточных точках плана

Номер точки	$X_1$	$X_2$	$Q_0$ , см <sup>3</sup> /с	$Q_P$ , см <sup>3</sup> /с	$\delta_Q$ , %	$p_0$ , МПа	$p_P$ , МПа	$\delta_P$ , %
1	0,5	0,5	50,72	50,87	0,29	65,73	66,18	0,69
2	-0,5	0,5	37,23	37,12	0,29	53,86	53,20	1,22
3	0,5	-0,5	69,39	72,92	4,84	88,15	95,52	7,72
4	-0,5	-0,5	51,57	54,67	5,67	66,59	71,76	7,21
5	0,5	1	44,75	45,17	0,93	60,02	60,63	1,00
6	-0,5	1	32,73	33,67	2,79	50,71	53,04	4,39
7	0,5	-1	85,36	89,27	4,39	112,86	119,31	5,40
8	-0,5	-1	64,21	68,77	6,63	81,23	90,16	9,90
9	0,5	0	58,57	60,12	2,58	74,30	77,82	4,52
10	-0,5	0	43,21	44,12	2,06	58,67	59,45	1,31
11	0	0,5	44,17	44,99	1,83	59,51	60,66	1,90
12	0	-0,5	60,84	64,79	6,10	77,02	84,61	8,97
13	1	0,5	56,79	54,75	3,60	72,25	69,77	3,42
14	1	-0,5	77,08	79,04	2,48	99,41	104,50	4,87
15	-1	0,5	30,02	27,24	9,24	48,51	43,81	9,67
16	-1	-0,5	41,73	42,54	1,92	57,42	56,98	0,76

*Примечание:*  $X_1$ ,  $X_2$  – координаты промежуточных точек;  $Q_0$  и  $P_0$  – значения функций отклика, полученные из решения системы уравнений (2);  $Q_P$  и  $P_P$  – значения функций отклика, рассчитанных по полиномам (3), (4).

Таким образом, предложенная методика моделирования позволяет получить аналитические зависимости характеристик процесса дозирования. Тем самым возможно численно оценить влияние конструктивно-технологических и эксплуатационных параметров на динамические характеристики процесса дозирования. С учетом этих оценок можно провести направленное исследование и, соответственно, осуществить переход к решению задач по выбору оптимальной конструкции дозаторов, удовлетворяющих основным критериям качества.



### Список литературы

1. Григорьев С.Н., Грибков А.А. Математическое моделирование оптимального порционного дозирования материалов // Двигатель. – 2011. – № 7. – С. 16–18.
2. Схиртладзе А.Г., Иванов В.И., Кареев В.Н. Гидравлические и пневматические системы: учебник для вузов. – 2-е изд., доп. / МГТУ «СТАНКИН». – М., 2003. – 544 с.
3. Моделирование режимов работы непрерывных и дискретных дозаторов объемного типа / Е.Н. Карнадуд, Р.Р. Исаков, К.С. Якимчук, Р.В. Котляров, Б.А. Федосенков // Техника и технология пищевых производств. – 2013. – № 2(29). – С. 80–84.
4. Наземцев А.С., Рыбальченко Д.Е. Пневматические и гидравлические приводы и системы: учеб. пособие. Ч. 2. Гидравлические приводы и системы. Основы. – М.: ФОРУМ, 2007. – 304 с.
5. Шушпанников А.Б., Федосенков Б.А. Моделирование процесса порционного дозирования // Техника и технология пищевых производств. – 2010. – Т. 17, № 2. – С. 105–109.
6. Кобитянский А.Е., Шафранов А.В., Белобородов В.С. Оценка характеристик дозаторных систем с кулачковым приводом // Master's journal. – 2016. – № 1. – С. 67–72.
7. Математическая модель дозаторной системы с кулачковым приводом / А.М. Ханов, А.Е. Кобитянский, А.В. Шафранов, Д.А. Петров // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2013. – Т. 15, № 2. – С. 24–29.
8. Динамика дозаторной системы с кулачковым приводом [Электронный ресурс] / А.М. Ханов, А.Е. Кобитянский, А.В. Шафранов, Д.А. Петров, М.В. Кузнецов // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 2. – URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=12768> (дата обращения: 06.10.2016).
9. Complex for simulation modeling of the dynamics of dosing system / A.M. Khanov, A.E. Kobityansky, A.V. Shafranov, M.V. Kuznetsov // Modern Applied Science. – 2015. – Vol. 9, № 6. – P. 266–277.
10. Бруязцкий Е.В., Костин А.Г. Метод численного решения уравнений Навье–Стокса в переменных скорость–давление // Прикладна гідромеханіка. – 2008. – Т. 10, № 2. – С. 13–23.
11. Дьяконов В.П. MATLAB. Полный самоучитель. – М.: ДМК Пресс, 2012. – 768 с.
12. Shampine L.F, Reichelt M.W. The MATLAB ODE suite // SIAM Journal on Scientific Computing. – 1997. – № 18. – P. 1–22.
13. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1976. – 280 с.
14. Финни Д. Введение в теорию планирования экспериментов. – М.: Наука 1970. – 288 с.
15. Джонсон Н.Л., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Методы планирования эксперимента. – М.: Мир, 1981. – 520 с.

## References

1. Grigor'ev S.N., Gribkov A.A. Matematicheskoe modelirovanie optimal'nogo portsiionnogo dozirovaniia materialov [Mathematical modeling of optimum portion dispensing of materials]. *Dvigatel'*, 2011, no. 7, pp. 16–18.
2. Skhirtladze A.G., Ivanov V.I., Kareev V.N. Gidravlicheskie i pnevmaticheskie sistemy: uchebnik dlia vuzov [Hydraulic and pneumatic systems: the textbook for higher education institutions]. 2-e izdanie, dopolnennoe, Moskovskii Gosudarstvennyi Tekhnicheskii Universitet «STANKIN», Moscow, 2003, 544 p.
3. Karnadud E.N., Iskhakov R.R., Iakimchuk K.S., Kotliarov R.V., Fedosenkov B.A. Modelirovanie rezhimov raboty nepreryvnykh i diskretnykh dozatorov ob"emnogo tipa [Modeling of operating modes of continuous and discrete batchers of volume type]. *Tekhnika i tekhnologiia pishchevykh proizvodstv*, 2013, no. 2(29), pp. 80–84.
4. Nazemtsev A.S., Rybal'chenko D.E. Pnevmaticheskie i gidravlicheskie privody i sistemy: uchebnoe posobie. Chast' 2. Gidravlicheskie privody i sistemy. Osnovy [Pneumatic and hydraulic drives and systems: education guidance. Part 2. Hydraulic drives and systems. Bases]. Moscow, FORUM, 2007, 304 p.
5. Shushpannikov A.B., Fedosenkov B.A. Modelirovanie pro-tsessa portsiionnogo dozirovaniia [Modeling of process of portion dispensing]. *Tekhnika i tekhnologiia pishchevykh proizvodstv*, 2010, vol. 17, no. 2, pp. 105–109.
6. Kobitianskii A.E., Shafranov A.V., Beloborodov V.S. Otsen-ka kharakteristik dozatornykh sistem s kulachkovym privodom [Assessment of characteristics the dozatornykh of systems with the cam drive]. *Master's journal*, 2016, no. 1, pp. 67–72.
7. Khanov A.M., Kobitianskii A.E., Shafranov A.V., Petrov D.A. Matematicheskaiia model' dozatornoi sistemy s kulachkovym privodom [Mathematical model of dozatoryny system with the cam drive]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo poli-tekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie*, 2013, vol. 15, no. 2, pp. 24–29.
8. Khanov A.M., Kobitianskii A.E., Shafranov A.V., Petrov D.A., Kuznetsov M.V. Dinamika dozatornoi sistemy s kulachkovym privodom [Dynamics of dozatoryny system with the cam drive]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniia*, 2014, no. 2, available at: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=12768> (accessed 06 october 2016).
9. Khanov A.M., Kobityansky A.E., Shafranov A.V., Kuznetsov M.V. Complex for simulation modeling of the dynamics of dosing system. *Modern Applied Science*, 2015, vol. 9, no. 6, pp. 266–277.
10. Bruiatskii E.V., Kostin A.G. Metod chislennogo resheniia uravnenii Nav'e–Stoksa v peremennykh skorost'–davlenie [Method of the numerical solution of the equations of Navier-Stokes in variables speed pressure]. *Prikladna gidromekhanika*, 2008, vol. 10, no. 2, pp. 13–23.
11. D'iakonov V.P. MATLAB. Polnyi samouchitel' [MATLAB. Full self-instruction manual]. Moscow, DMK Press, 2012, 768 p.
12. Shampine L.F., Reichelt M.W. The MATLAB ODE suite. *SIAM Journal on Scientific Computing*, 1997, no. 18, pp. 1–22.

13. Adler Iu.P., Markova E.V., Granovskii Iu.V. Planirovanie eksperimenta pri poiske optimal'nykh uslovii [Planning of an experiment by search of optimum conditions]. Moscow, Nauka, 1976, 280 p.

14. Finni D. Vvedenie v teoriyu planirovaniia eksperimentov [Introduction to the theory of planning of experiments]. Moscow, Nauka 1970, 288 p.

15. Dzhonson N.L., Lion F. Statistika i planirovanie eksperimenta v tekhnike i nauke. Metody planirovaniia eksperimenta [Statistics and planning of an experiment in the equipment and science. Experiment planning methods]. Moscow, Mir, 1981, 520 p.

Получено 27.01.17

### **Об авторах**

**Кобитянский Алексей Ефимович** (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры материалов, технологий и конструирования машин Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: allania00@mail.ru.

**Шафранов Алексей Владимирович** (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры материалов, технологий и конструирования машин Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: a\_shafranov@mail.ru.

**Белобородов Владимир Сергеевич** (Пермь, Россия) – магистрант кафедры материалов, технологий и конструирования машин Пермского национального исследовательского политехнического университета; e-mail: beloborodovvova@mail.ru.

### **About the authors**

**Alexey E. Kobityansky** (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Professor, Department of Materials, Technologies and Constructions of Machines, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: allania00@mail.ru.

**Alexey V. Shafranov** (Perm, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Materials, Technologies and Constructions of Machines, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: a\_shafranov@mail.ru.

**Vladimir S. Beloborodov** (Perm, Russian Federation) – Master Student, Department of Materials, Technologies and Constructions of Machines, Perm National Research Polytechnic University; e-mail: beloborodovvova@mail.ru.