

УДК 621.867: 658

DOI 10.18698/0536-1044-2017-10-69-76

Оптимизация параметров привода конвейера при случайном изменении нагрузки

М.В. Кулешов¹, В.С. Сыромятников²

¹ НИИ урологии и интервенционной радиологии им. Н.А. Лопаткина — филиал ФГБУ «НМИРЦ» Минздрава России, 105425, Москва, Российская Федерация, 3-я Парковая ул., д. 51

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

Optimization of the Conveyor Drive Parameters under Stochastic Loads

M.V. Kuleshov¹, V.S. Syromyatnikov²

¹ N.A. Lopatkin Research Institute of Urology and Interventional Radiology, Branch of the Federal State Budgetary Institution — National Medical Research Radiological Center of the Ministry of Health of the Russian Federation, 105425, Moscow, Russian Federation, 3rd Parkovaya St., Bldg. 51

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



e-mail: kuleshov.mv@mail.ru, vsyromia@gmail.com



Неполнота информации о работе машины в новых условиях является одной из проблем, с которой сталкивается конструктор при проектировании привода. Обычно используют усредненные показатели, полученные на основе анализа действующего оборудования. В большинстве случаев они оказываются малоприспособленными вследствие изменения технологического процесса и модернизации машины. Проведено компьютерное моделирование для имитации работы привода ленточного конвейера и оптимизации его параметров при случайном изменении нагрузки. Разработана модель системы, отражающая конструктивные и технологические особенности машины, и ее взаимодействие со смежным оборудованием. Модель содержит геометрические, кинематические и динамические характеристики системы. В ней описаны логические и функциональные зависимости между параметрами привода и характеристиками системы. Модель позволяет воспроизводить различные режимы работы привода: постоянные, переменные и вероятностные. Продолжительность имитации функционирования привода может изменяться в пределах от нескольких минут до нескольких часов или смен. Точность моделирования по времени составляет 0,1 с, а в пространстве — 1 см. Имеется средство для сбора и обработки статистических данных, таких как мощность привода, момент на приводном валу машины и др.

Ключевые слова: проектирование привода, ленточный конвейер, компьютерное моделирование, GPSS World, статистический анализ



Lack of information about operation of a machine under new conditions is one of the problems that designers face when designing a machine drive. Average values based on the analysis of existing equipment are usually used. In most cases, they are of little use due to changes in the technological process and modernization of the machine. In this study, the authors simulated the operation of a conveyor belt drive and optimized its parameters under stochastic loads. A model of the system was developed that reflected design and technological features of the machine and its interaction with adjacent equipment. The model contains geometric, kinematic and dynamic characteristics of the system and describes logical and functional dependences between the parameters of the drive and the characteristics of the system. Various drive operation modes (constant, variable and prob-

abilistic) can be reproduced using the model. The duration of the simulation of the drive operation may vary from a few minutes to several hours or shifts. The accuracy of the simulation with regards to time is 0.1 sec, to space — 1 cm. There is a tool for collecting and processing statistical data, such as the drive power, torque on the drive shaft of the machine, etc.

Keywords: drive design, belt conveyor, computer simulation, GPSS World, statistical analysis

Привод ленточного конвейера должен обеспечивать бесперебойную работу транспортирующего устройства для непрерывного перемещения потока грузов между производственными участками. Определяющими факторами при транспортировании материалов являются производительность загрузки конвейера, скорость движения ленты, время простоя грузов в очереди перед конвейером, расстояния между участками загрузки и разгрузки, масса и размеры грузов, форма траектории движения и др. При этом некоторые из них могут изменяться в соответствии с требованиями производства или случайно.

Однако при разработке приводов новых конвейеров используют усредненные данные по действующим системам [1], которые не отражают реальных показателей проектируемого оборудования. Вследствие несоответствия расчетных и реальных производственных характеристик привода вероятны серьезные отклонения в работе транспортной системы. С помощью методов имитационного моделирования и статистического анализа данных можно повы-

сить эффективность и точность проектирования нового привода [2].

Цель работы — применение компьютерного моделирования для имитации работы привода ленточного конвейера и оптимизации его параметров при случайном изменении нагрузки.

Ленточный конвейер, применяемый при производстве и распределении освежающих напитков, молока и молочных изделий, показан на рис. 1.

Аналогичные конвейеры используют во многих отраслях промышленности для транспортирования в одном потоке грузов, имеющих разные массы и размеры. Модель ленточного конвейера позволяет исследовать работу привода при изменении частоты его загрузки, длины участков между зонами разгрузки, скорости транспортирования грузов и др.

Поступательное движение ленте конвейера сообщает приводной барабан, вал которого соединен с электроприводом [3]. Тяговое усилие T_e на приводном барабане и мощность привода P изменяются во времени и зависят

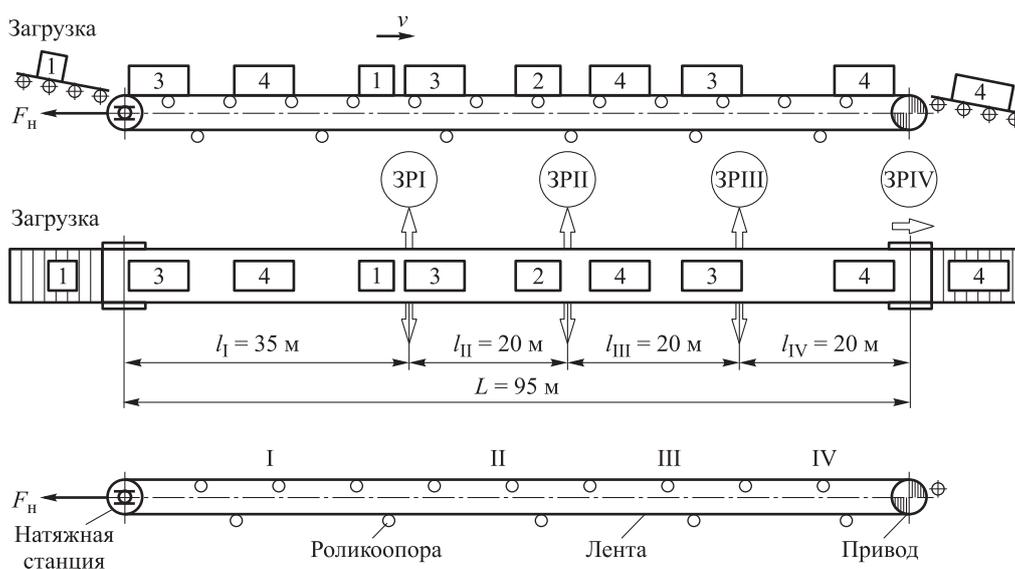


Рис. 1. Схема ленточного конвейера:

1–4 — типы грузов; I–IV — номера участков конвейера; ЗР I–ЗР IV — зоны разгрузки в конце участка; F_H — натяжное усилие

от геометрии конвейера, положения линий загрузки и разгрузки, распределения на конвейере грузов, их числа и массы и др. Текущее тяговое усилие в модели определяется выражением [4]

$$T_e = A + \sum_{j=1}^n B_j M_j(t),$$

где A — постоянная составляющая тягового усилия, учитывающая сопротивление движению порожней ленты; B_j — удельный коэффициент сопротивления участка конвейера j ; $M_j(t)$ — общая масса грузов на участке j в момент времени моделирования t ,

$$M_j(t) = \sum_{i=1}^{d_j(t)} m_{ci}$$

Таблица 1

Статистика измерений тягового усилия T_e в модели конвейера

Номер класса	Левый предел T_e , Н, свыше	Правый предел T_e , Н, до	Частота записи в класс	Суммарная частота записи в класс, %
1	0	1 350	43	0,02
2	1 350	1 400	140	0,07
3	1 400	1 450	1 350	0,61
4	1 450	1 500	41 844	17,34
5	1 500	1 550	11 8271	64,63
6	1 550	1 600	73 583	94,05
7	1 600	1 650	13 966	99,64
8	1 650	1 700	869	99,98
9	1 700	1 750	40	100,00

Среднее значение $T_{e\text{cp}} = 1\,537$ Н
 Среднее квадратичное отклонение $\sigma = 38,92$ Н
 Общее число измерений T_e за 8 ч $T_{e\text{общ}} = 250\,106$

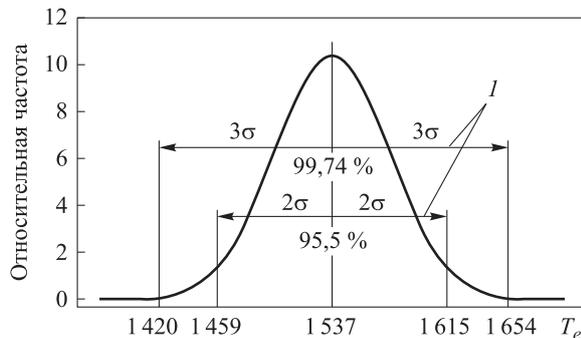


Рис. 2. График распределения тягового усилия T_e (I — доверительный интервал)

($d_j(t)$ — число грузов на участке конвейера с номером j в момент времени t ; m_{ci} — масса i -го груза).

Мощность привода

$$P(t) = \frac{T_e(t)v}{\eta},$$

где v — скорость ленты конвейера; η — коэффициент полезного действия привода.

Тяговое усилие T_e рассчитывается по указанной выше формуле каждый раз, когда изменяется число грузов на участках конвейера. В модели определены частотные классы, куда записывается T_e в соответствии с его значением (табл. 1, рис. 2).

Модель ленточного конвейера содержит шесть сегментов.

В сегменте 0 задаются исходные данные для каждого прогона модели: генераторы случайных чисел для имитации вероятностных распределений и случайных событий, таблицы частот переменных отклика, функции и аналитические зависимости между параметрами системы.

Сегмент 1 имитирует загрузку первого участка конвейера в соответствии с заданным законом распределения грузов: показательным [5], постоянным, нормальным и т. п. Тип груза назначается в соответствии со стандартным равномерным распределением, масса и длина груза определяются в зависимости от типа.

Сегмент 2 моделирует перемещение грузов по нескольким участкам конвейера (табл. 2). Время движения рассчитывается в соответствии с длинами участков и грузов.

Сегмент 3 воспроизводит переход грузов с участка на участок. Как и на действующем конвейере, грузы могут переходить с одного участка на другой последовательно во времени или одновременно сразу на нескольких участках (см. табл. 2). Модель фиксирует положение каждого груза на конвейере с точностью 0,1 с

Таблица 2

Участки конвейера и типы грузов (см. рис. 1)

Номер участка	Длина участка, м	Зона разгрузки в конце участка	Тип груза	
			разгружаемого	проходящего
I	35	ЗРI	1	2, 3, 4
II	20	ЗРII	2	3, 4
III	20	ЗРIII	3	4
IV	20	ЗРIV	4	—



Рис. 3. Блок-схема сегментов 3 и 4

Таблица 3

Результаты моделирования загрузки конвейера при показательном законе распределения

Тип груза	Масса груза, кг	Длина груза, см	Вероятность подачи груза	Расчетное число грузов, шт.	Число грузов в модели, шт.	Отклонение модели, %
1	20	40	0,15	2 400	2 423	0,9583
2	25	50	0,20	3 200	3 192	-0,2500
3	30	60	0,25	4 000	4 032	0,8000
4	35	70	0,40	6 400	6 344	-0,8750
Все типы			1,00	16 000	15 991	-0,0563

или до 1 см. На рис. 3 представлена блок-схема фрагмента модели, отражающая логику моделирования тягового усилия и мощности привода конвейера в системе GPSS World [6].

Сегмент 4 имитирует разгрузку в четырех зонах (см. табл. 2). Грузы разгружаются в соответствии с их типом, после чего подсчитывается число грузов каждого типа и их общее количество, чтобы оценить точность моделирования вероятности распределения грузов и частоты загрузки (см. рис. 3). В табл. 3 приведены результаты моделирования загрузки конвейера при показательном законе распределения

$$Z(t) = -\frac{Z}{\ln R(t)},$$

где $Z(t)$ — текущая производительность загрузки в момент времени t ; Z — средняя произ-

водительность загрузки, шт./ч; $R(t)$ — равномерно распределенное случайное число [7].

Среднее расчетное число грузов в 8-часовую смену:

$$Z_{\text{см}} = 8Z = 8 \cdot 2\,000 = 16\,000 \text{ шт.}$$

Наибольшее отклонение результатов моделирования от расчетных данных составило 0,9583 %.

В сегменте 5 вычисляются статистические характеристики тягового усилия T_e , момента на валу барабана T , мощности P , времени движения грузов до зон разгрузки T_m и др.

В сегменте 6 задана продолжительность моделирования (8 ч) в единицах модельного времени 0,1 с, т. е. 288 000 ед. Среди переменных, определяющих характеристики привода конвейера, наиболее важными являются тяговое

Таблица 4

Факторы и их уровни

Фактор	Уровень		
	1	2	3
v , м/с	1,0	1,5	2,0
Z , шт./ч	1 000	2 000	3 000

усилие T_e , момент на валу барабана T , мощность P , время транспортирования грузов на конвейере T_m и число грузов в очереди перед конвейером L_q . Эти переменные зависят от двух факторов — скорости ленты v и производительности загрузки конвейера $Z(t)$. Если производительность загрузки больше, чем производительность конвейера, то перед ним образуется очередь грузов, что отражается на пропускной способности транспортной системы. В противном случае конвейер может оказаться недогруженным. Чтобы обеспечить наилучшую работу привода, необходимо определить оптимальное соотношение между частотой загрузки и скоростью ленты. Для модельного эксперимента приняты три уровня факторов (табл. 4).

Согласно рекомендациям, приведенным в работе [8], число повторных испытаний для каждой комбинации факторов $r = 5$. Для определения значимости факторов использован план двухфакторного эксперимента. Анализ полученных результатов выполнен с помощью программного пакета STATGRAPHICS Plus [9]. Проверена адекватность модели, проведен дисперсионный анализ переменных отклика, и осуществлена глобальная оптимизация целевой функции. С помощью графиков распределения остатков проверена гипотеза о нормальном распределении результатов моделирования [10].

На рис. 4 показан график распределения остатков для мощности привода P . В централь-

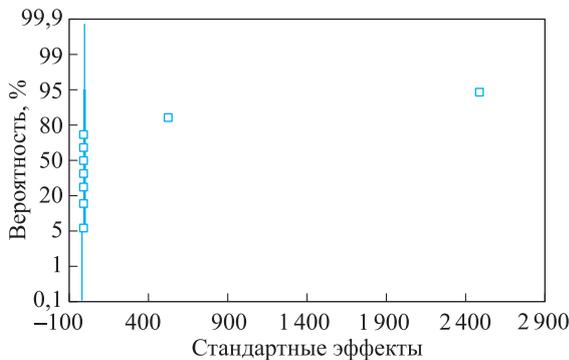


Рис. 4. График распределения остатков для мощности P

ной части график прямолинейный, что свидетельствует о нормальном распределении мощности P , т. е. модель адекватно отражает работу привода конвейерной системы [11].

Для оценки статистической значимости факторов использованы графики Парето (рис. 5). Факторы, полосы которых пересекают границу значимости I , имеют 95%-ный уровень значимости.

Диаграмма Парето показывает, что для момента на приводном валу барабана T наибольшую значимость имеет производительность загрузки Z , а наименьшую — взаимодействие скоростей v .

Коэффициенты детерминации R^2 и нормированные коэффициенты детерминации R^2_{aj} (табл. 5) показывают степень зависимости переменных отклика от заданных характеристик модели: производительности загрузки, массы и размеров грузов, длины участков конвейера,

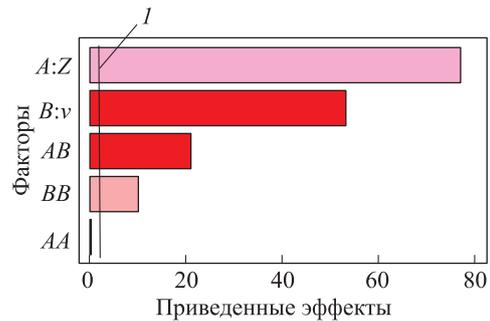


Рис. 5. Диаграмма Парето для момента T (I — граница значимости факторов)

Таблица 5

Степень достоверности переменных отклика

Коэффициент детерминации	T_e	T	P	T_m	L_q
R^2 , %	99,79	99,62	99,99	98,18	79,22
R^2_{aj} , %	99,77	99,58	99,99	97,94	76,55

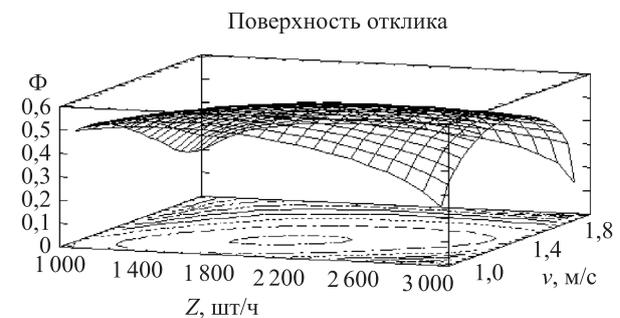


Рис. 6. Поверхность отклика и функция предпочтения Φ

Таблица 6

Оптимальные значения переменных отклика

Переменная отклика	Интервал	Вид оптимизации	Оптимальное значение
Тяговое усилие T_e , Н	1 392...1 751	Максимизация	1 540
Момент на барабане T , Н·м	348...438	Минимизация	384,9
Мощность привода P , Вт	1 949...4 092	»	2 633
Время движения грузов T_m , с	36...94	»	57,61
Длина очереди грузов L_q , шт.	3...79	»	5

Таблица 7

Экспериментальные и оптимальные расчетные значения переменных отклика

Номер эксперимента	Значение генератора случайных чисел	T_e , Н	T , Н·м	P , Вт	T_m , с	L_q , шт.	Число грузов в смену, шт.
1	57 341	1 535	383,8	2 661	56,27	5,0	15 716
2	39 527	1 537	384,3	2 664	56,39	5,0	15 716
3	81 523	1 531	383,0	2 655	56,40	5,0	15 404
4	47 178	1 534	383,5	2 659	56,28	6,0	15 583
5	28 967	1 537	384,2	2 664	56,39	5,0	15 778
Среднее экспериментальное значение		1 535	383,8	2 661	56,35	5,2	15 650
Оптимальное расчетное значение		1 540	384,9	2 633	57,61	5,0	16 000
Ошибка, %		0,3247	0,2858	1,063	2,187	4,0	2,187

скорости ленты и др. Глобальная оптимизация переменных отклика выполнена с использованием функции предпочтения [9, 10].

С помощью пакета STATGRAPHICS Plus определено максимальное значение функции предпочтения $\Phi = \{\max T_e, \min (T, P, T_m, L_q)\}$, составившее 0,5648 (рис. 6). Оно соответствует оптимальным значениям скорости ленты ($v = 1,285$ м/с) и производительности загрузки ($Z = 1 960$ шт/ч).

В табл. 6. приведены интервалы переменных отклика при имитации работы конвейера в течение 45 суток модельного времени, вид оптимизации и их оптимальные значения.

Для проверки результатов оптимизации проведены пять повторных экспериментов с оптимальными значениями производительности и скорости ($Z = 1 960$ шт/ч и $v = 1,285$ м/с). Продолжительность каждого эксперимента составляла 8 ч модельного времени. Сравнительные данные представлены в табл. 7. Различия экспериментальных и оптимальных расчетных значений переменных отклика в модели составило 0,325...4,0 %.

Выводы

1. Для определения параметров привода конвейера на этапе проектирования предложено использовать компьютерную модель конвейера.

2. Модель конвейера отражает основные характеристики транспортирующего устройства и технологии производства: длину конвейера, массу и размеры грузов, неравномерную подачу грузов к конвейеру, программируемую разгрузку в разных точках в зависимости от типа груза и др.

3. Для проведения испытаний на модели составлен план двухфакторного эксперимента с тремя уровнями факторов — скорости конвейера v и производительности загрузки Z . Каждое испытание повторялось 5 раз. В каждом из них имитировалась работа привода в течение 8-часовой смены. Общее число смен составило 45.

4. В процессе моделирования определены средние значения и стандартные отклонения для тягового усилия ленты T_e , момента на валу

барабана T , мощности привода P , времени транспортирования грузов T_m и числа грузов в очереди перед конвейером L_q . Число измерений за одну смену каждого показателя в среднем составляло 250 000.

5. Анализ результатов испытаний выполнен с помощью пакета STATGRAPHICS Plus. Проверена достоверность полученных результатов, проведен дисперсионный анализ показателей и осуществлена глобальная оптимизация целевой функции, в результате которой определены оптимальные значения скорости конвейера ($v = 1,285$ м/с) и производительности загрузки ($Z = 1\,960$ шт/ч).

6. Найдены оптимальные параметры привода конвейера: тяговое усилие ленты $T_e = 1\,540$ Н, момент на приводном валу $T = 384,9$ Н·м, мощность привода $P = 2\,633$ Вт.

7. Исследование показало высокую точность результатов моделирования и оптимизации параметров привода при переменных условиях работы машины.

8. Компьютерная модель может быть использована для определения оптимальных параметров приводов ленточных конвейеров, различных по длине, скорости ленты, массе штучных грузов, программе загрузки и разгрузки грузов разных типов и др.

Литература

- [1] Иванов М.Н., Финогенов В.А. *Детали машин*. Москва, Высшая школа, 2008. 408 с.
- [2] Кудрявцев Е.М. *GPSS World. Основы имитационного моделирования различных систем*. Москва, ДМК Пресс, 2004. 320 с.
- [3] Зуев Ф.Г., Лотков Н.А. *Подъемно-транспортные установки*. Москва, КолосС, 2007. 471 с.
- [4] Сыромятников В.С., Палочкин С.В. Оптимизация характеристик конвейерной системы в условиях неритмичного производства. *Рынок приводной техники*, 2007, № 2(9), с. 11–14.
- [5] Gross D., Shortle J., Thompson J., Harris C. *Fundamentals of queueing theory*. New York, John Wiley&Sons, 2008. 528 p.
- [6] *GPSS World. Reference manual. Minuteman Software*. Holly Springs, North Carolina, USA, 2001. 700 p.
- [7] Downey A.B. *Think Stats Probability and Statistics for Programmers. Version 1.6.0*. Massachusetts, Green Tea Press, 2011. 128 p.
- [8] Harrell C., Ghosh B.K., Bowden R.O. *Simulation Using ProModel*. McGraw Hill, Higher Education, 2003. 733 p.
- [9] Nau R. *Statgraphics Version 5: Overview & Tutorial Guide*. Fuqua School of Business, Duke University, 2005. 23 p.
- [10] Montgomery D.C. *Design and Analysis of Experiments*. John Wiley & Sons Inc., 2013. 730 p.
- [11] Скворцова Д.А. Статистическое моделирование производственных процессов гибкой автоматизированной сборки в среде объектно-ориентированного программирования. *Компьютерные исследования и моделирование*, 2015, т. 7, № 2, с. 289–300.

References

- [1] Ivanov M.N., Finogenov V.A. *Detali mashin* [Machine parts]. Moscow, Vysshiaia shkola publ., 2008. 408 p.
- [2] Kudriavtsev E.M. *GPSS World. Osnovy imitatsionnogo modelirovaniia razlichnykh sistem* [GPSS World. Fundamentals of simulation of different systems]. Moscow, DMK Press, 2004. 320 p.
- [3] Zuev F.G., Lotkov N.A. *Pod'emno-transportnye ustanovki* [Conveying installation]. Moscow, KolosS publ., 2007. 471 p.
- [4] Syromiatnikov V.S., Palochkin S.V. Optimizatsiia kharakteristik konveiernoii sistemy v usloviakh neritmichnogo proizvodstva [Optimizing performance of the conveyor system in conditions of irregular production]. *Rynok privodnoi tekhniki* [The drive technology market]. 2007, no. 2(9), pp. 11–14.
- [5] Gross D., Shortle J., Thompson J., Harris C. *Fundamentals of queueing theory*. New York, John Wiley&Sons, 2008. 528 p.

- [6] *GPSS World. Reference manual. Minuteman Software*. Holly Springs, North Carolina, USA, 2001. 700 p.
- [7] Downey A.B. *Think Stats Probability and Statistics for Programmers. Version 1.6.0*. Massachusetts, Green Tea Press, 2011. 128 p.
- [8] Harrell C., Ghosh B.K., Bowden R.O. *Simulation Using ProModel*. McGraw Hill, Higher Education, 2003. 733 p.
- [9] Nau R. *Statgraphics Version 5: Overview & Tutorial Guide*. Fuqua School of Business, Duke University, 2005. 23 p.
- [10] Montgomery D.C. *Design and Analysis of Experiments*. John Wiley & Sons Inc., 2013. 730 p.
- [11] Skvortsova D.A. Statisticheskoe modelirovanie proizvodstvennykh protsessov gibkoi avtomatizirovannoi sborki v srede ob"ektno-orientirovannogo programmirovaniia [Statistical modeling of the production processes of the flexible automated assembly in the object-oriented programming environment]. *Komp'yuternye issledovaniia i modelirovanie* [Computer Research and Modeling]. 2015, vol. 7, no. 2, pp. 289–300.

Статья поступила в редакцию 29.05.2017

Информация об авторах

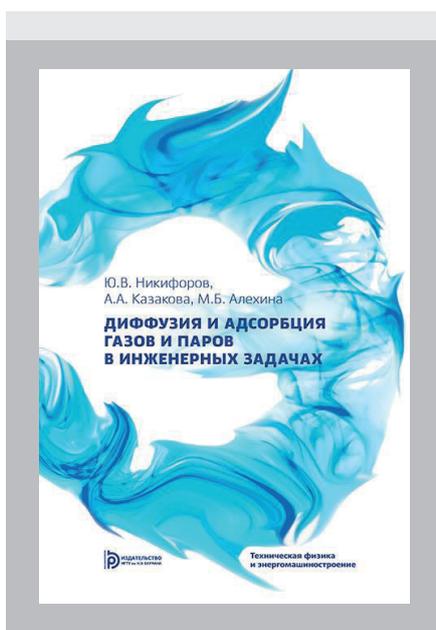
КУЛЕШОВ Максим Вадимович (Москва) — инженер отдела «Аналитическая деятельность и перспективные программы развития». НИИ урологии и интервенционной радиологии им. Н.А. Лопаткина — филиал ФГБУ «НМИРЦ» Минздрава России (105425, Москва, Российская Федерация, 3-я Парковая ул., д. 51, e-mail: kuleshov.mv@mail.ru).

СЫРОМЯТНИКОВ Владимир Сергеевич (Москва) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Основы конструирования машин». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1, e-mail: vsyromia@gmail.com).

Information about the authors

KULESHOV Maksim Vadimovich (Moscow) — Engineer, Department of Analytics and Prospective Development Programs. N.A. Lopatkin Research Institute of Urology and Interventional Radiology, Branch of the Federal State Budgetary Institution — National Medical Research Radiological Center of the Ministry of Health of the Russian Federation (105425, Moscow, Russian Federation, 3rd Parkovaya St., Bldg. 51, e-mail: kuleshov.mv@mail.ru).

SYROMYATNIKOV Vladimir Sergeevich (Moscow) — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Fundamentals of Machine Design. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: vsyromia@gmail.com).



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышла в свет монография
Ю.В. Никифорова, А.А. Казаковой, М.Б. Алехиной
**«Диффузия и адсорбция газов и паров
в инженерных задачах»**

Изложены теоретические основы мембранных и адсорбционных технологий и даны примеры расчета соответствующих процессов и аппаратов.

Для специалистов в области очистки и разделения газовых смесей.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; www.baumanpress.ru