

Расчет и конструирование машин

УДК 621.82

Экспериментальное определение температуры в подшипниках качения

О.А. Ряховский, С.Ю. Гончаров, В.С. Сыромятников

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

Experimental determination of temperature in rolling bearings

O.A. Ryakhovskiy, S.Yu. Goncharov, V.S. Syromyatnikov

Bauman Moscow State Technical University, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation.



e-mail: rolgan@mail.ru, gsu@pochta.ru, vsyromia@gmail.com

i Подшипники широко используются в машиностроении. Стандартные подшипники имеют высокую надежность и сохраняют работоспособность в течение всего срока службы машины. Однако небольшая часть из них выходит из строя, внезапно, независимо от продолжительности работы, что приводит к простоям оборудования и дорогостоящему ремонту. Чаще всего потери работоспособности подшипников происходят из-за нарушения условий смазки, одним из признаков которого является повышение температуры. Исследована зависимость температуры подшипника от нагрузки, частоты вращения вала, уровня масла и их взаимодействий. Для планирования эксперимента и статистического анализа экспериментальных данных использован пакет STATGRAPHIC PLUS. С помощью дисперсионного анализа (ANOVA) определена относительная значимость факторов. Установлено, что наибольшее влияние на изменение температуры оказывают уровень масла и скорость вращения вала. По этим факторам построена регрессия температуры подшипника качения и ее график в трех измерениях. Методика эксперимента и статистического анализа может быть использована при исследовании подшипников различных типов.

Ключевые слова: подшипник качения, план эксперимента, дисперсионный анализ, ANOVA, регрессионный анализ.

i Bearings are widely used in mechanical engineering. Standard bearings are highly reliable and ensure safe operation over the lifetime of the machine. However, a small part of them fails suddenly regardless of the duration of work, which leads to downtime and costly repair. In most cases, bearings lose their working capacity due to the violations of lubrication conditions, which is manifested by rise in temperature. The dependence of the bearing temperature on the load, shaft speed, oil level, and their interactions is studied. Experimental design and statistical analysis of the experimental data is performed using StatGraphics Plus. The relative importance of the factors is determined by the analysis of variance (ANOVA). It has been established that the oil level and the shaft speed have the greatest influence on the temperature change. For these factors, the temperature regression of rolling bearings is determined, and a three-dimensional temperature field is plotted. The experimental and statistical analysis techniques can be used to study various types of bearings.

Keywords: rolling bearing, experimental design, analysis of variance, ANOVA, regression analysis.

Подшипники качения широко используются в современных машинах. Валы, сателлиты планетарных передач, роторы двигателей и многие другие устройства устанавливаются на подшипниках для свободного вращения с минимальным сопротивлением. От их качества зависит работоспособность машин: коэффициент полезного действия, производительность, долговечность и др. Подшипник состоит из наружного и внутреннего колец, шариков и сепаратора для равномерного распределения их по окружности между кольцами (рис. 1) [1]. На поверхности колец имеются дорожки качения, по которым перекачиваются тела качения при вращении одного из колец. Стандартные подшипники характеризуются высокой надежностью и сохраняют работоспособность в течение всего срока службы машины. Однако часть из них выходит из строя независимо от продолжительности работы, вызывая простой оборудования и дорогой ремонт. Известно, что 40...50 % потерь работоспособности подшипников происходит из-за нарушений условий смазки [2].

Смазка предохраняет металлические поверхности тел качения, колец и сепаратора от соприкосновения. Масляная пленка защищает подшипник от коррозии, износа и перегрева. Хорошая смазка снижает уровень шума и увеличивает долговечность подшипника. Признаками некачественной смазки является ее недостаточное количество, очень вязкое или очень

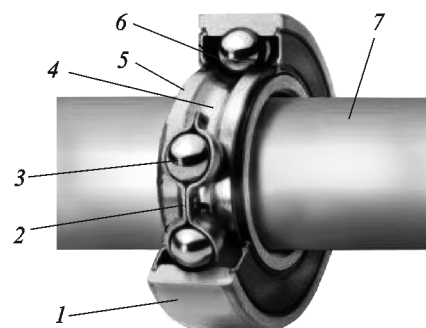


Рис. 1. Подшипник шариковый радиальный однорядный:

- 1 — кольцо наружное; 2 — сепаратор; 3 — шарик;
4 — дорожка качения; 5 — кольцо внутреннее;
6 — уплотнение; 7 — вал

жидкое масло, высокий уровень загрязнения, повышенная температура. Из-за перегрева масляная пленка теряет свою несущую способность. Разрушение пленки приводит к контакту металлов шариков, дорожек качения и сепаратора. Высокая концентрация напряжений в зоне контакта обуславливает образование раковин на поверхности металла и интенсивный износ подшипника. Повышение температуры может зависеть от нагрузки, скорости вращения вала, уровня масла, проскальзывания шариков относительно сепаратора и дорожек качения, перекаса колец и др. Некоторые из этих факторов определяются условиями эксплуатации, другие — точ-

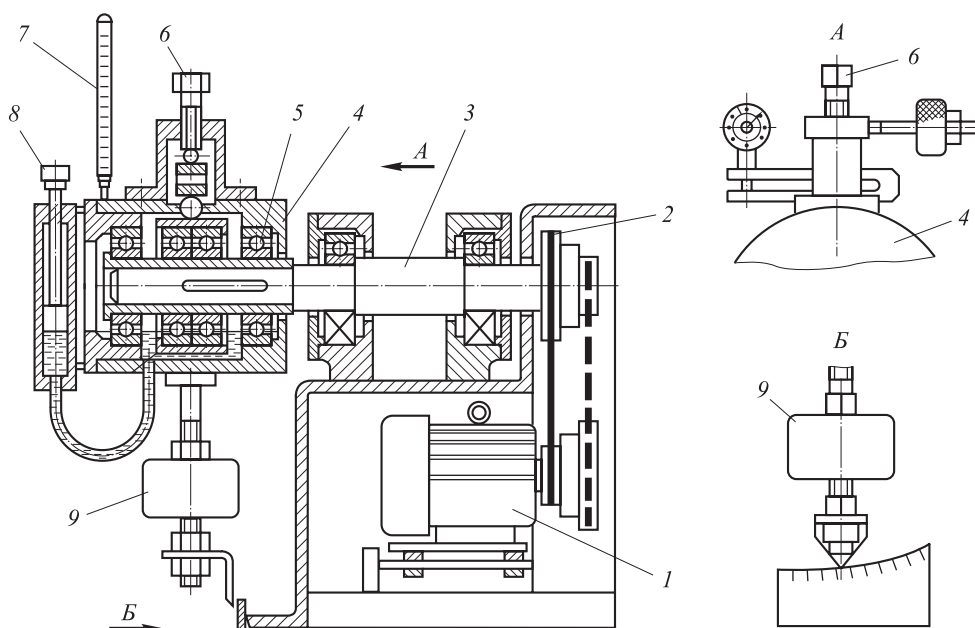


Рис. 2. Стенд для определения температуры в подшипниках качения:

- 1 — электродвигатель; 2 — клиноременная передача; 3 — приводной вал; 4 — головка; 5 — радиальный подшипник;
6 — силовое приспособление; 7 — термометр; 8 — поршень; 9 — измерительное приспособление

ностью изготовления и монтажа подшипников. Большинство из них имеет случайный характер, поэтому статистическая обработка экспериментальных данных оказывается точнее аналитических расчетов [3].

Цель работы — исследование зависимости температуры подшипника от трех факторов: нагрузки, частоты вращения вала (или скорости вращения внутреннего кольца подшипника), уровня масла и их взаимодействий.

Экспериментальная установка. Установка для измерения температуры подшипников содержит электродвигатель 1 и клиноременную передачу 2 со ступенчатыми шкивами (рис. 2).

В положении клинового ремня, обозначенного пунктирной линией, приводной вал 3 вращается с максимальной скоростью, а в положении, обозначенном сплошной линией, — с минимальной. Диапазон скоростей: $n_1 = 102 \text{ с}^{-1}$ (955 об/мин), $n_2 = 200 \text{ с}^{-1}$ (1910 об/мин), $n_3 = 300 \text{ с}^{-1}$ (2 865 об/мин). В головке 4 установлено четыре стандартных радиальных подшипника 5 легкой серии № 208 ГОСТ 8338–75 [1], крайние из которых закреплены в головке 4, а два средних в нагрузочной обойме. Силовое приспособление 6 содержит регулировочный винт, динамометрическую скобу и индикатор (вид А). Для измерения температуры используют термометр 7. Уровень масла в головке 4 изменяют поршнем 8. Приспособление 9 для измерения момента сопротивления вращению четырех подшипников 5 содержит маятник, стрелку и шкалу (вид Б). Двигатель 1, клиноременная передача 2 и приводной вал 3 с двумя опорами смонтированы на литом корпусе. Нагрузку на подшипники определяют зависимости от числа делений индикатора приспособления 6 по формуле

$$F = 159,93 + 44,72N$$

или по графику динамометрической скобы (рис. 3).

Например, при $N_1 = 100$ дел. $F_1 = 159,93 + 44,72 \cdot 100 = 4 632 \text{ Н}$;

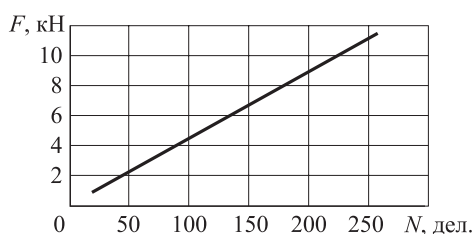


Рис. 3. Силовой график динамометрической скобы. Показания индикатора 1 дел. = 0,01 мм

при $N_2 = 150$ дел. $F_2 = 159,93 + 44,72 \cdot 150 = 6 868 \text{ Н}$;

при $N_3 = 200$ дел. $F_3 = 159,93 + 44,72 \cdot 200 = 9 097 \text{ Н}$.

Распределение нагрузки F между подшипниками определяется схемой их установки в головке 4 (см. рис. 2):

$$F_r = F/2.$$

Уровень масла h в головке 4 может иметь три уровня:

$h_1 = 5 \text{ мм}$ — до погружения нижней части наружного кольца подшипника;

$h_2 = 10 \text{ мм}$ — по центру нижнего шарика;

$h_3 = 15 \text{ мм}$ — до погружения нижней части внутреннего кольца.

План и результаты эксперимента. Зависимость температуры подшипников от скорости вращения вала n , нагрузки F и уровня смазки h может быть получена отдельно для каждого фактора, так называемые однофакторные эксперименты, или для совокупности факторов — двухфакторные или трехфакторные эксперименты, например,

$$T^{\circ}\text{C} = \varphi(n); T^{\circ}\text{C} = \varphi(n, F); T^{\circ}\text{C} = \varphi(n, F, h).$$

Несмотря на простоту однофакторные эксперименты имеют существенный недостаток: они не позволяют определять зависимость переменной отклика от взаимодействия факторов. Число измерений эксперимента зависит от числа комбинаций факторов и от числа параллельных испытаний (реплик) при одних и тех же уровнях факторов [4]. Поскольку каждое измерение имеет ту или иную случайную погрешность, то дополнительные реплики повышают точность [5]. В работе проведен трехфакторный эксперимент с двумя уровнями каждого фактора, типа 2^3 и с числом реплик, равным 3. По этим данным в пакете STATGRAPHIC PLUS [6] составлен план рандомизированного отсеивающего (screening) эксперимента (табл. 1). Повторные испытания состояли из трех блоков с одинаковыми уровнями факторов и одинаковым чередованием комбинаций факторов [7]. Число испытаний равно 24. В соответствии с планом (см. табл. 1), температура подшипника $T^{\circ}\text{C}$ измерялась для блока № 1, содержащего восемь комбинаций уровней факторов. Затем, все повторялось для блоков № 2 и 3. Результаты испытаний приведены в табл. 1. Температура в блоках № 1, 2 и 3 при одинаковых значениях скорости вращения вала n , нагрузки F и уровня смазки h иногда совпадает, но чаще имеет случайные отклонения.

Таблица 1

План и результаты эксперимента 2³

Блок № 1				Блок № 2				Блок № 3			
n, c^{-1}	$N, \text{дел.}$	$h, \text{мм}$	$T, ^\circ\text{C}$	n, c^{-1}	$N, \text{дел.}$	$h, \text{мм}$	$T, ^\circ\text{C}$	n, c^{-1}	$N, \text{дел.}$	$h, \text{мм}$	$T, ^\circ\text{C}$
300	100	15	56	300	100	15	61	300	100	15	64
300	100	5	37	300	100	5	45	300	100	5	50
300	200	15	63	300	200	15	66	300	200	15	68
300	200	5	43	300	200	5	48	300	200	5	52
102	100	5	50	102	100	5	51	102	100	5	51
102	200	5	51	102	200	5	51	102	200	5	51
102	100	15	52	102	100	15	52	102	100	15	52
102	200	15	53	102	200	15	54	102	200	15	53

Статистический анализ температуры подшипников. В табл. 2 приведены измерения температуры в зависимости от уровней факторов и реплик и средние значения температуры при повторных испытаниях, [8]:

$$T^{\circ\text{C}^{\text{CP}}}_{ijk} = (T^{\circ\text{C}}_{ijk r=1} + T^{\circ\text{C}}_{ijk r=2} + T^{\circ\text{C}}_{ijk r=3})/3,$$

где i, j, k — индексы уровней факторов: скорости n , нагрузки N и уровня масла h , соответственно; r — индекс реплик.

С помощью анализа распределения остатков (табл. 3) проверена адекватность измерений температуры [9]. Остаток $e_{ijk r}$ определен как разность одного из повторных измерений температуры

$T^{\circ\text{C}}_{ijk r}$ для заданной комбинации факторов и среднего значения $T^{\circ\text{C}^{\text{CP}}}_{ijk}$ в группе повторных испытаний (см. табл. 2). Например, для скорости $n_2 = 300 c^{-1}$, нагрузки $N_1 = 100 \text{ дел.}$, уровня масла $h_2 = 15 \text{ мм}$ и реплики $r=1$ остаток (см. табл. 3):

$$e_{2121} = T^{\circ\text{C}}_{2121} - T^{\circ\text{C}^{\text{CP}}}_{212} = 56 - 60,3333 = -4,3333 ^\circ\text{C}.$$

Нормальный вероятностный график остатков приведен на рис. 4. На рисунке в средней части заметно отклонение точек от прямой линии, что указывает на некоторое смещение данных от нормального распределения. Тем не менее, нарушение нормальности не оказывает значимого

Таблица 2

Температура подшипников $T, ^\circ\text{C}$

Факторы и уровни	$N = 100 \text{ дел.} = 4\,632 \text{ Н} (j = 1)$		$N = 200 \text{ дел.} = 9\,097 \text{ Н} (j = 2)$		Реплика
	$h = 5 \text{ мм} (k = 1)$	$h = 15 \text{ мм} (k = 2)$	$h = 5 \text{ мм} (k = 1)$	$h = 15 \text{ мм} (k = 2)$	
$n = 102 c^{-1} (i = 1)$	50	52	51	53	$r = 1$
	51	52	51	54	$r = 2$
	51	52	51	53	$r = 3$
$T^{\circ\text{C}^{\text{CP}}}$	50,6667	52	51	53,3333	
$n = 300 c^{-1} (i = 2)$	37	56	43	63	$r = 1$
	45	61	48	66	$r = 2$
	50	64	52	68	$r = 3$
$T^{\circ\text{C}^{\text{CP}}}$	44	60,3333	47,6667	65,6667	

Таблица 3

Остатки измерений температуры $T, ^\circ\text{C}$

Факторы и уровни	$N = 100 \text{ дел.} (j = 1)$		$N = 200 \text{ дел.} (j = 2)$		Реплика
	$h = 5 \text{ мм} (k = 1)$	$h = 15 \text{ мм} (k = 2)$	$h = 5 \text{ мм} (k = 1)$	$h = 15 \text{ мм} (k = 2)$	
$n = 102 c^{-1} (i = 1)$	-0,666667	0,0	0,0	-0,333333	$r = 1$
	0,333333	0,0	0,0	0,666667	$r = 2$
	0,333333	0,0	0,0	-0,333333	$r = 3$
$n = 300 c^{-1} (i = 2)$	-7,0	-4,33333	-4,66667	-2,66667	$r = 1$
	1,0	0,666667	0,333333	0,333333	$r = 2$
	6,0	3,66667	4,33333	2,33333	$r = 3$

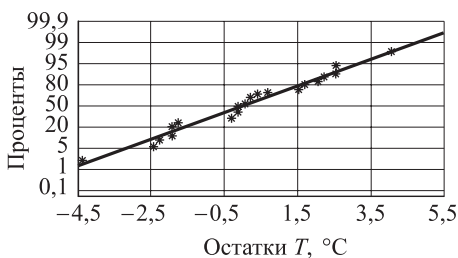


Рис. 4. График остатков температуры подшипников

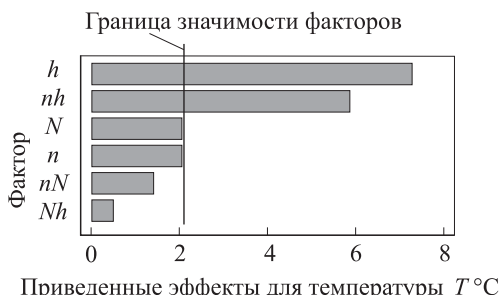


Рис. 5. Диаграмма Парето приведенных эффектов для температуры

влияния на результаты [10]. Степень влияния факторов на изменение температуры определена на основе анализа дисперсий (ANOVA). Результаты анализа дисперсий температуры $T^{\circ}\text{C}$, по данным эксперимента, представленным в табл. 2, приведены в табл. 4. Дисперсия температуры $T^{\circ}\text{C}$ разделена по факторам (скорости n , нагрузке N , уровню смазки h), взаимодействиям факторов (nN , nh , Nh) и случайным погрешностям. Значимость каждого фактора определяется критерием Фишера F_0 как отношение дисперсии фактора к дисперсии от случайных погрешностей (10,2059). Сравнение значения F_0 с критической вероятностью распределения Фишера определяет вероятность ошибки p . Значение $p < 0,05$ указывает на статистическую значимость фактора с 95%-ной вероятностью. Значимыми в табл. 4 являются уровень масла h и взаимодействие скорости и

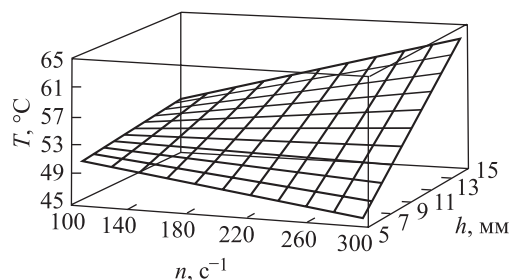


Рис. 6. Поверхность регрессии температуры при $N = 150$ дел. ($F = 6\ 868$ Н)

уровня масла — nh .

Коэффициент детерминации $R^2 = 85,2445\%$, показывает изменчивость температуры от скорости n , нагрузки N и уровня смазки h .

На диаграмме Парето, представленной на рис. 5, в графической форме показана относительная значимость каждого фактора. С помощью STATGRAPHIC PLUS была получена регрессия температуры по факторам n , h и их взаимодействию nh :

$$T^{\circ}\text{C} = 59,0101 + 10^{-3}(-705,051h - 86,7003n + 7,2391nh).$$

Статистическая значимость регрессии $T^{\circ}\text{C}$ имеет 99%-ный доверительный уровень поскольку вероятность ошибки для факторов h и nh составляет $p < 0,01$ (см. табл. 4).

Поверхность регрессии температуры, построенная при постоянном уровне нагрузки $N = 150$ дел. ($F = 6\ 868$ Н) изображена на рис. 6. Согласно данным, представленным на рис. 5 и рис. 6, температура T слабо зависит от нагрузки и скорости вращения подшипников. Основное влияние на изменение температуры оказывает уровень масла h и взаимодействие скорости и уровня масла nh . При уровне масла $h = 5$ мм увеличение скорости от 100 до 300 с^{-1} приводит к снижению температуры (см. рис. 6). Однако при одновременном увеличении уровня масла

Таблица 4

Анализ дисперсий температуры $T, ^{\circ}\text{C}$ (ANOVA)

Фактор влияния	Сумма квадратов отклонений	Степень свободы	Дисперсия температуры	Статистика Фишера F_0	Вероятность ошибки p
n	42,6667	1	42,6667	4,18	0,0567
$N(Q)$	42,6667	1	42,6667	4,18	0,0567
h	541,5	1	541,5	53,06	0,0000
nN	20,1667	1	20,1667	1,98	0,1778
nh	352,667	1	352,667	34,56	0,0000
Nh	2,66667	1	2,66667	0,26	0,6158
Случайные погрешности	173,5	17	10,2059	—	—
Общая сумма	1175,83	23	—	—	—

и скорости подшипников, температура быстро возрастает от 45 до 65 °С.

Приведенную методику эксперимента и статистического анализа можно использовать при исследовании подшипников различных типов.

Выводы

1. Температура подшипников в основном зависит от уровня масла h и от взаимодействия скорости вращения внутреннего кольца подшипника и уровня масла nh . Степень влияния скорости внутреннего кольца n и нагрузки N , в 2–3 раза меньше. Еще меньше влияние совместной скорости и нагрузки nN , нагрузки и уровня масла Nh .

2. Наибольшую значимость имеет уровень масла h (см. рис. 5), наименьшую — взаимодействие нагрузки и уровня масла Nh . Полученный коэффициент детерминации равен 85,24 %, следовательно случайные погрешности, влияющие на температуру, составляют 14,76 %.

3. Для повышения точности результатов рекомендуется увеличить время измерения температуры, число факторов и их уровней, число реплик.

4. Построена регрессия температуры подшипника по уровню масла h , скорости внутреннего кольца n и их взаимодействию nh .

5. Для ориентировочного определения температуры подшипников предлагается использовать регрессию температуры в инженерных расчетах.

Литература

- [1] Фомин М. В. *Расчеты опор с подшипниками качения*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 102 с.
- [2] *Bearing Failure Analysis*. Available at: http://web.applied.com/site.cfm/Bearing_Failure_Analysis_Operating_Conditions_Typically_Hold_Key.cfm (Дата обращения 23 июня 2014).
- [3] Douglas C. Montgomery. *Design and Analysis of Experiments*. John Wiley & Sons, 2008. 680 p.
- [4] Averill M. Law, W. David Kelton. *Simulation Modeling and Analysis*. McGraw – Hill, 2000. 760 p.
- [5] Harrell C., Ghosh B.K., Bowden R.O., Simulation Jr. *Using ProModel*. Mc.Graw Hill, 2003. 733 p.
- [6] Robert Nau. *Statgraphics version 5: overview & tutorial guide*. Fuqua School of Business, Duke University, 2005. 23 p.
- [7] George E.P. Box, J. Stuart Hunter, William G. Hunter. *Statistics for Experimenters: Design, Innovation and Discovery*, John Wiley and Sons, 2005. 625 p.
- [8] Иванов О.В. *Прикладная статистика*. Москва, Издательско-торговый дом «Этногенез», 2005. 406 с.
- [9] Robert L. Mason, Richard F. Gunst, James L. Hess. *Statistical Design and Analysis of Experiments with Applications to Engineering and Science*. John Wiley and Sons, 2003. 725 p.
- [10] Jiju Antony. *Design and of Experiments for Engineers and Scientists*. Elsevier, 2003. 190 p.

References

- [1] Fomin M.V. *Raschety opor s podshipnikami kacheniiia* [Calculations of supports with rolling bearings]. Moscow, Bauman Press, 2001. 102 p.
- [2] *Bearing Failure Analysis*. Available at: http://web.applied.com/site.cfm/Bearing_Failure_Analysis_Operating_Conditions_Typically_Hold_Key.cfm (accessed 23 June 2014).
- [3] Douglas C. Montgomery. *Design and Analysis of Experiments*. John Wiley & Sons, 2008. 680 p.
- [4] Averill M. Law, W. David Kelton. *Simulation Modeling and Analysis*. McGraw–Hill, 2000. 760 p.
- [5] Harrell C., Ghosh B.K., Bowden R.O., Simulation Jr. *Simulation Using ProModel*. Mc.Graw Hill, Higher Education, 2003. 733 p.
- [6] Robert Nau. *Statgraphics version 5: overview & tutorial guide*. Fuqua School of Business, Duke University, 2005. 23 p.
- [7] George E. P. Box, J. Stuart Hunter, William G. Hunter. *Statistics for Experimenters: Design, Innovation, and Discovery*. John Wiley and Sons, 2005. 625 p.
- [8] Ivanov O.V. *Prikladnaia statistika* [Applied Statistics]. Moscow, Izdatel'sko-torgovyi dom «Etnogenez» publ., 2005. 406 p.
- [9] Robert L. Mason, Richard F. Gunst, James L. Hess. *Statistical Design and Analysis of Experiments with Applications to Engineering and Science*. John Wiley and Sons, 2003. 725 p.
- [10] Jiju Antony. *Design and of Experiments for Engineers and Scientists*. Elsevier, 2003. 190 p.

Информация об авторах

РЯХОВСКИЙ Олег Анатольевич (Москва) — доктор технических наук, профессор кафедры «Основы конструирования машин». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: rolgan@mail.ru).

ГОНЧАРОВ Сергей Юрьевич (Москва) — инженер кафедры «Основы конструирования машин». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр.1, e-mail: gsu@pochta.ru).

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

Information about the authors

RYAKHOVSKIY Oleg Anatol'evich (Moscow) — Dr. Sc. (Eng.), Professor of «Fundamentals of Machine Design» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: rolgan@mail.ru).

GONCHAROV Sergey Yur'evich (Moscow) — Engineer of «Fundamentals of Machine Design» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: gsu@pochta.ru).

SYROMYATNIKOV Vladimir Sergeevich (Moscow) — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of «Fundamentals of Machine Design» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: vsyromia@gmail.com).



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышло в свет 2-е издание учебника
В.В. Селиванова, И.Ф. Кобылкина, С.А. Новикова

«Взрывные технологии»

Описаны практически все известные взрывные технологии, имеющие промышленное значение: упрочнение, сварка, штамповка, прессование с помощью энергии взрыва и динамический синтез сверхтвердых материалов, а также рассмотрены технологии разделения на фрагменты стальных конструкций с помощью как удлиненных кумулятивных зарядов, так и ударных волн. Изложены основные представления об экологически безопасных взрывных методах разборки и уничтожения боеприпасов. Рассмотрены способы защиты от действия взрыва, а также приведены простые инженерные методики расчета конструктивных характеристик взрывных устройств, реализующих соответствующие взрывные технологии, и расчета взрывных камер на прочность. В последней части учебника рассказывается о применении мирных ядерных взрывов с целью решения научных и промышленных задач.

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