

**СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Жильников, Е. П. Основы триботехники: учеб. для вузов / Е. П. Жильников, В. Н. Самсонов. – Самара: Изд-во Самар, гос. аэро-косм. ун-та, 2012. – 136 с.
2. Ерохин, В. Г. Основы термодинамики и теплотехники / В. Г. Ерохин, М. Г. Маханько. – М.: Либроком, 2015. – 226 с.
3. Зорин, В. М. Промышленная теплоэнергетика и теплотехника: справочник / Ред. В. А. Григорьев, В. М. Зорин. – М.: Энергоатомиздат, 2015. – 552 с.
4. Справочник по триботехнике: в 3 т. / Под общ. ред. М. Хебды, А. В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 1989. – Т. 1: Теоретические основы. – 400 с.
5. Бунаков, П. Ю. Сквозное проектирование в T-FLEX: учеб. для вузов / П. Ю. Бунаков. – М.: ДМК Пресс, 2009. – 400 с.

Материал поступил в редакцию 08.11.2018

**KALUGIN Yu. K., LESHCHIK S. D. Modelling of the thermal modes and design data at assessment of frictional and iznosny characteristics of couple of friction**

The thermal analysis of three-dimensional models of friction unit is carried out. The temperature fields by the model volume and the temperature gradient module are constructed.

A mathematical model establishing the dependence of the temperature in the friction zone on the main parameters is obtained. Changed the design of the pressure plate friction machine to reduce the temperature in the friction zone to 11 K.

УДК 621.926

**Сотник Л. Л., Сиваченко Л. А., Богданович И. А.**

**ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ПОТРЕБЛЯЕМУЮ МОЩНОСТЬ ВИБРОВАЛКОВОГО ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ**

**Введение.** На процессы измельчения материалов, которые являются одними из основных операций целого ряда технологий, в настоящее время в мире затрачивается около 10% всей производимой энергии, а в отдельных технологиях и 20–50%. Поэтому снижение энергозатрат на измельчение материалов является весьма актуальной задачей.

В последние годы во многих отраслях промышленности для дезинтеграторной переработки материалов с различными физико-механическими характеристиками широко используются пресс-валковые агрегаты, реализуемые по различным технологическим схемам [1–4]. Разрушение исходного продукта в таких агрегатах происходит путем прохода слоя материала между цилиндрическими измельчающими поверхностями, где образуется критическая зона и развивается сжимающее усилие, превосходящее предел прочности материала [5, 6].

Анализ литературных источников выявил, что вопросы влияния величины зазора между валками и скоростей вращения валков на процесс измельчения материалов, имеющих различную структуру и физико-механические характеристики, изучены недостаточно, а вопрос влияния вибрационного воздействия не изучен вовсе. Таким образом, проведение исследований, направленных на оптимизацию параметров процесса измельчения, является актуальной задачей.

**Постановка задачи.** Целью данной работы является изучение влияния параметров процесса измельчения в вибровалковом измельчителе на величину энергетических затрат.

В соответствии с поставленной целью определены следующие задачи:

- 1) провести экспериментальные исследования по изучению влияния величины зазора между валками, относительной скорости вращения валков и величины эксцентриситета на затраты энергии в процессе измельчения;
- 2) получить уравнение регрессии, связывающее параметры процесса и энергопотребление;
- 3) с использованием полученных данных обосновать рекомендации по выбору оптимальных параметров процесса измельчения.

**Условия и методы исследования.** На процесс измельчения различных строительных материалов в вибровалковом измельчителе влияют такие факторы технологического процесса, как усилие измельчения, зависящее от зазора между валками  $b$ ; отношение скоростей вращения валков  $K_{\text{вр}} = n_1/n_2$ ; значения величины эксцентриситета  $e$ ; частоты колебаний эксцентрикового валка  $V_e$ . Кроме того, на эффективность измельчения влияют также физико-

механические характеристики измельчаемых материалов: средне-взвешенный диаметр исходных частиц  $d_{0\text{ср}}$ ; их механическая прочность  $\sigma_{\text{сж}}$ ; а также характеристики, определяющие технологический режим измельчения: степень измельченности материала  $\eta_{\text{изм}}$ ; удельная поверхность измельченного продукта  $S$  и содержание в нем тонкодисперсных фракций, прошедших через сито  $\sum R_{0,063}$  [1].

Установлено, что наиболее существенное влияние на энергоэффективность процесса измельчения оказывают такие факторы, как величина зазора, относительная скорость вращения валков и величина эксцентриситета.

Для проведения экспериментальных исследований по определению влияния величины зазора  $b$ , отношения скоростей вращения валков  $n_1$  и  $n_2$ , а также величины эксцентриситета  $e$  на мощность  $N$  была использована лабораторная установка (рис. 1), принцип действия которой описан в [7, 8]. Установка имеет следующие конструктивно-технологические параметры: диаметры валков  $d = 0,24$  м, ширина валков  $b = 0,05$  м; и режимные параметры: частота колебаний эксцентрикового валка  $V_e = 1440$  мин<sup>-1</sup>, окружная скорость неподвижного валка  $v = 1,82$  м/с.



**Рисунок 1** – Лабораторная установка вибровалкового измельчителя

**Сотник Леонид Леонидович**, преподаватель кафедры оборудования и автоматизации производства Барановичского государственного университета.

**Сиваченко Леонид Александрович**, преподаватель кафедры оборудования и автоматизации производства Барановичского государственного университета.

**Богданович Ирина Аркадьевна**, к.т.н., заведующий кафедрой оборудования и автоматизации производства инженерного факультета Барановичского государственного университета, доцент.

Беларусь, 225404, Брестская обл-ть, г. Барановичи, ул. Войкова, 21.

Таблица 1 – Уровни варьирования факторов

Факторы	Кодированное обозначение	Шаг варьирования	Уровни варьирования				
			-1,215	-1	0	1	+1,215
Зазор между валками $b$ , мм	$X_1$	1	0,8	1	2	3	3,2
Величина эксцентриситета $e$ , мм	$X_2$	1	0,8	1	2	3	3,2
Отношение скоростей вращения $K_{фр}$	$X_3$	0,2	0,55	0,6	0,8	1,0	1,05

В качестве измельчаемого материала для исследований был использован пенобетон 1100 прочностью 6,3 МПа (ГОСТ 21520–89).

К установке подключен счетчик электрической энергии «Гран-Электро СС-301», счетчик измеряет и отображает на дисплее значения мощности, погрешность 1 Вт.

Показания счетчика электрической энергии «Гран-Электро СС-301» фиксировали посредством цифровой видеокамеры и по полученным видеозаписям определяли значения затраченной на процесс измельчения мощности  $N$ .

Для построения математической модели, описывающей процесс измельчения материалов, нами использовались методы математического планирования эксперимента [9–12], которые позволяют учесть большое количество факторов, влияющих на процесс измельчения материалов в вибровальковом измельчителе, а также необходимость установления их совокупного влияния на выходные параметры агрегата – потребляемую мощность привода  $N$  [1].

Наиболее универсальной для каких-либо откликов и факторов считается функция регрессии в виде отрезков ряда Тейлора. Функция отклика аппроксимируется в виде полинома:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + \dots + b_n x_n + b_{12} x_1 x_2 + \dots + b_{(n-1)n} x_{(n-1)n} + b_{11} x_1^2 + \dots + b_{nn} x_n^2,$$

где  $y$  – расчетное значение параметра оптимизации;

$b_0, b_1, \dots, b_n$  – коэффициенты регрессии, которые определяются статистическим путем на основании эксперимента;

$x_i$  – кодовая переменная, причем  $x_i = (X_i - X_{0i}) / \Delta X_i$ ;

$\Delta X_i$  – натуральное значение интервала варьирования  $i$ -го фактора;

$x_i$  – натуральное значение уровня  $i$ -го фактора ( $X_{0i}$  – основной уровень).

В исследовании используем центральное композиционное планирование (ЦКП), в котором параметром оптимизации принимаем потребляемую мощность  $N$ , а влияющими факторами:  $X_1$  – зазор между валками  $b$ , мм;  $X_2$  – величина эксцентриситета  $e$ , мм;  $X_3$  – отношение скоростей вращения  $K_{фр}$ .

Кодовая переменная может иметь значения  $+a$ ;  $-1$ ;  $0$ ;  $+1$ ;  $-a$ . Такое кодирование переменных удобно при экспериментальных исследованиях, поскольку обработка исследуемых данных используется в стандартной форме, независимо от конкретных условий задачи, что значительно упрощает вычисления. Для увеличения общего числа точек вводят так называемые звездные точки. Значение звездного плеча  $\alpha$  для трехфакторного эксперимента  $\alpha = 1,215$ .

Проведем кодирование факторов для перевода натуральных величин в безразмерные с целью построения план-матрицы эксперимента. Уровни варьирования факторов (таблица 1) выбраны по результатам анализа известных по литературе [1–6] теоретических и экспериментальных исследований.

Для такого центрального композиционного планирования уравнение регрессии имеет вид полинома второй степени:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{33} x_3^2.$$

**Результаты исследований и их обсуждение.** По результатам исследований получена выборка данных о мощности  $N$ , затраченной в процессе измельчения образцов (таблица 2). Значения исследуемых факторов изменяли в соответствии с планом эксперимента,

при трехкратном повторении опытов.

Статистическая обработка данных выполнена общепринятыми методами математической статистики для 5%-го уровня значимости с использованием программного пакета Microsoft Office Excel 2007.

После реализации серии параллельных опытов  $m = 3$  полученные значения были проверены на однородность дисперсии ошибок по критерию Кохрена [11].

Для проверки воспроизводимости опытов было найдено отношение наибольшей из оценок дисперсий  $\max s_j^2$  к сумме всех оце-

нок дисперсий  $\sum s_j^2$  (таблица 2):

$$G_p = \frac{\max s_j^2}{\sum s_j^2} = \frac{91}{728} = 0,125.$$

Соответствующее значение критерия Кохрена при количестве оценок дисперсии  $N = 15$  и числе степеней свободы  $f = m - 1 = 2$  принимаем  $G = 0,335$  [11].

Условие  $G_p \leq G$  выполняется, опыты считаются воспроизводимыми, а оценки дисперсии – однородными.

После расчета коэффициентов уравнения регрессии (таблица 3) проверялась их значимость по доверительным границам при помощи критерия Стьюдента при 5-м % уровне значимости.

Таким образом, было получено уравнение регрессии (модель) второго порядка.

$$y = 1329 - 28,9 x_1 - 24,1 x_2 - 1,6 x_3 + 0,1 x_1 x_2 - 13,9 x_1 x_3 - 1,4 x_2 x_3 - 0,8 x_1^2 + 1,2 x_2^2 - 14,7 x_3^2.$$

После определения оценок коэффициентов регрессии  $b_i$  была проверена гипотеза об их значимости. Если выполняется условие  $|b_i| \geq t \cdot s_{b_i}$ , то данный коэффициент является статистически

значимым.

Находим дисперсию коэффициентов:

$$s_{b_i}^2 = \frac{s_y^2}{\sum (x_{ij})^2}$$

и оцениваем значимость коэффициентов уравнения регрессии. Табличное значение критерия Стьюдента для уровня значимости  $\alpha = 0,05$  и степени свободы  $f = N(m - 1) = 15(3 - 1) = 30$  равно  $t_{0,05; 30} = 2,0423$  [10].

Коэффициенты  $b_0, b_1, b_2, b_{13}, b_{33}$  по абсолютной величине превышают это значение (таблица 3), следовательно, мы должны признать их значимыми. Коэффициент  $b_3, b_{12}, b_{23}, b_{11}, b_{22}$  является незначимым.

Адекватность модели проверялась с помощью  $F$ -критерия Фишера:

$$F = \frac{s_{ad}^2}{s_y^2} = \frac{99}{48,53} = 2,04,$$

где  $s_{ad}^2$  – дисперсия адекватности математической модели;

$s_y^2$  – средняя дисперсия эксперимента.

Таблица 2 – Ортогональный план второго порядка

№ опыта	Кодовая переменная									Параметр оптимизации			Среднее значение	Значение дисп.	
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1^2 - 0,73$	$x_2^2 - 0,73$	$x_3^2 - 0,73$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_2x_3$	$Y_1$	$Y_2$	$Y_3$			
Точки ПФЭ	1	1	1	1	0,27	0,27	0,27	1	1	1	1242	1256	1249	1249	49
	2	1	1	-1	0,27	0,27	0,27	1	-1	-1	1281	1295	1282	1286	61
	3	1	-1	1	0,27	0,27	0,27	-1	1	-1	1295	1308	1300	1301	43
	4	1	-1	-1	0,27	0,27	0,27	-1	-1	1	1324	1326	1328	1326	27
	5	-1	1	1	0,27	0,27	0,27	-1	-1	1	1328	1333	1335	1332	28
	6	-1	1	-1	0,27	0,27	0,27	-1	1	-1	1305	1314	1320	1313	57
	7	-1	-1	1	0,27	0,27	0,27	1	-1	-1	1377	1379	1396	1384	91
	8	-1	-1	-1	0,27	0,27	0,27	1	1	1	1353	1353	1368	1358	75
Звездные точки	9	-1,215	0	0	0,746	-0,73	-0,73	0	0	0	1366	1378	1372	1372	36
	10	1,215	0	0	0,746	-0,73	-0,73	0	0	0	1291	1301	1302	1298	37
	11	0	-1,215	0	-0,73	0,746	-0,73	0	0	0	1358	1372	1374	1368	76
	12	0	1,215	0	-0,73	0,746	-0,73	0	0	0	1303	1302	1319	1308	91
	13	0	0	-1,215	-0,73	-0,73	0,746	0	0	0	1311	1318	1313	1314	13
	14	0	0	1,215	-0,73	-0,73	0,746	0	0	0	1315	1310	1320	1315	25
Нулевая точка	15	0	0	0	-0,73	-0,73	-0,73	0	0	0	1325	1328	1328	1327	19

Таблица 3 – Расчетные значения коэффициентов уравнения регрессии и коэффициентов дисперсии

Коэффициент $b_i$	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_{12}$	$b_{13}$	$b_{23}$	$b_{11}$	$b_{22}$	$b_{33}$
Значение $b_i$	1329	-28,9	-24,1	-1,6	0,1	-13,9	-1,4	-0,8	1,2	-14,7
Значение $S_{b_i}$	3,6	1,22	1,22	1,22	1,42	1,42	1,42	1,93	1,93	1,93
$ b_i  / S_{b_i}$	369,2	23,7	19,8	1,3	0,1	9,8	1,0	0,4	0,6	7,6

Табличное значение  $F$ -критерия Фишера для 5 %-го уровня значимости  $F_{0,05} = 2,1$  при степенях свободы  $f_1 = 30$  и  $f_2 = 11$  превышает величину опытного значения этого критерия. Поэтому гипотезу об адекватности представления результатов эксперимента можно принять.

Выполняем переход от кодированных значений факторов к натуральным по уравнению:

$$y = 1329 - 28,9x_1 - 24,1x_2 - 13,9x_3 - 14,7x_3^2;$$

$$N = 1329 - 28,9\left(\frac{b-2}{1}\right) - 24,1\left(\frac{e-2}{1}\right) - 13,9\left(\frac{b-2}{1}\right)\left(\frac{K_{фр}-0,8}{0,2}\right) - 14,7\left(\frac{K_{фр}-0,8}{0,2}\right)^2 = 1376,9 - 23,34b - 24,1e + 131,5K_{фр} + 131,5K_{фр}^2 - 6,95bK_{фр} - 73,5K_{фр}^2.$$

Обработка модели показала, что достоверность аппроксимации модели полиномом второго порядка составила  $R_2 = 97,11\%$ .

На рисунках 2-4 представлены графики поверхности отклика критерия оптимизации  $N$ , показывающие влияние факторы величины эксцентриситета  $e$ , величины зазора  $b$  и относительной скорости вращения  $K_{фр}$ , которые наглядно отображают область оптимальных значений данных факторов.

Для проверки достоверности результатов был проведен контрольный эксперимент при оптимальных значениях факторов. Относительная ошибка в сравнении с приведенным в таблице 2 значением составила  $\sim 4,6\%$ .

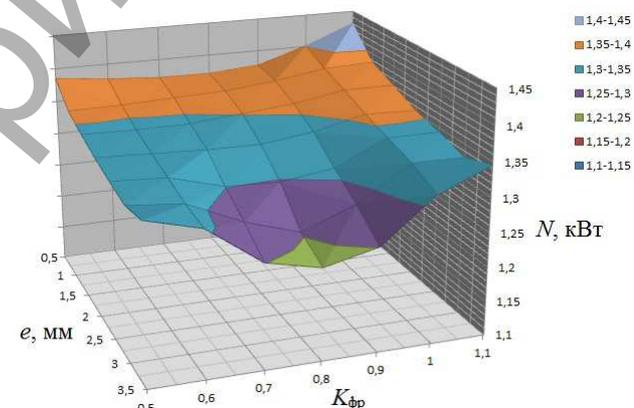


Рисунок 2 – График поверхности отклика критерия оптимизации  $N$  при величине зазора  $b = 1$  мм

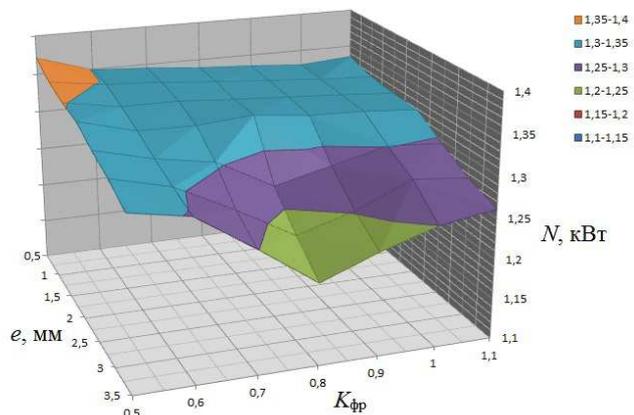


Рисунок 3 – График поверхности отклика критерия оптимизации  $N$  при величине зазора  $b = 2$  мм

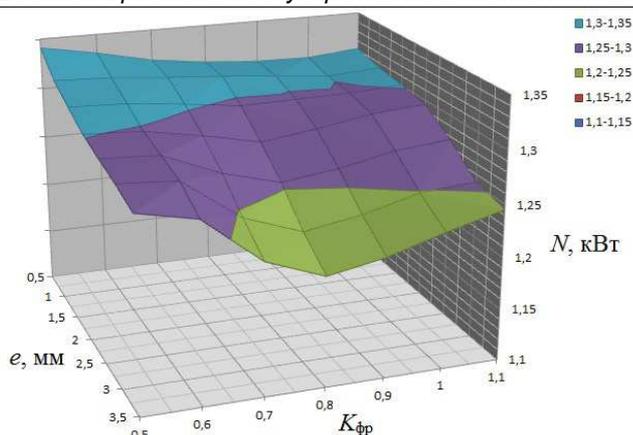


Рисунок 4 – График поверхности отклика критерия оптимизации  $N$  при величине зазора  $b = 3$  мм

**Заключение.** Анализ модели показывает, что увеличение значений факторов  $b$  и  $e$  ведет к уменьшению значения критерия оптимизации  $N$ , а увеличение фактора  $K_{фр}$  – к увеличению  $N$ . Характер влияния факторов на критерий оптимальности  $N$  достаточно полно описывается представленной моделью.

Анализ полученных результатов позволил обосновать рациональные параметры процесса измельчения на установке принципиально новой конструкции. Оптимальными значениями технологических параметров процесса измельчения пенобетона являются:

- величина зазора 2–3 мм;
- отношение скоростей вращения валков 0,7–0,9;
- величина эксцентриситета 2–3 мм.

Результаты проведенных экспериментов по полученным оптимальным значениям факторов согласуются с результатами расчета по этой модели, а сама модель достоверно описывает процесс измельчения рассмотренных образцов.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Романович, А. А. Основы расчета и проектирования пресс-валковых агрегатов для измельчения анизотропных материалов: монография / А. А. Романович, А. В. Колесников. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2011. – 165 с.
2. More Than 250 Roller Mills from Polysius in Use Worldwide // World Cement. – 2003. – Vol. 34. – № 4. – P. 15.
3. Poliad, M. A look at internet grinding shop / M. Poliad, P. Coonet // World Cement. – 1990. – № 9. – P. 395–399.
4. The world's largest roller mills / International cement review. 2000. – № 1. – P. 43–44.
5. Bogdanov, V. S. The Power Consumption Calculation of a Ball Drum Mill / S. I. Antsiferov, N. E. Bogdanov // Middle-East Journal of Scientific Research. – 2013. – Т. 18. – № 10. – С. 1448–1454.
6. Богданов, В. С. Уравнение кинетики процесса измельчения в горизонтальной валковой мельнице / В. С. Богданов, В. С. Романенко // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2013. – № 1. – С. 53–57.
7. Сиваченко, Л. А. Анализ работы подшипниковых узлов эксцентрикового вала вибровалкового измельчителя / Л. А. Сиваченко, Л. Л. Сотник // Вестник БарГУ. – 2017 – Вып. 5. – С. 87–92.
8. Сиваченко, Л. А. Основы проектирования вибровалкового агрегата для дезинтеграторной обработки минеральных материалов / Л. А. Сиваченко, Л. Л. Сотник, И. А. Богданович // Научные технологии и инновации: сб. докладов Междунар. научно-практ. конф. – Часть 4 – Белгород: БГТУ, 2016. – С. 179–185.
9. Зенгинидзе, И. Т. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем / И. Т. Зенгинидзе. – М.: Наука, 1976. – 390 с.
10. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных решений / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 280 с.
11. Саутин, С. Н. Планирование эксперимента в химии и химической технологии / С. Н. Саутин. – Л.: Химия, 1975. – 45 с.
12. Дропсон, Н. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Методы обработки данных / Н. Дропсон, Ф. Лион. – М.: Мир, 1980. – 512 с.

Материал поступил в редакцию 08.11.2018

#### SOTNIK L. L., SIVANCHENKO L. A., BOGDANOVICH I. A. Study of the technological factors influence on the power consumed by the vibrating-rolling grinder

Reducing energy costs for grinding materials is a very urgent task. The authors studied the influence of the technological factors of the grinding process in a grinder of a fundamentally new design on the power consumption. It is established that the most significant effect on the energy efficiency of the grinding process is provided by such factors as the gap size, the relative rotation speed of the rolls and the eccentricity value. The article presents the results of the studies on the effect of the above parameters on the grinding process.

The study uses the central compositional planning of the experiment. The reproducibility of the experiments at specified levels of variation has been mathematically proven with the Kohren criterion. A regression equation that correlates the parameters of the grinding process and energy consumption is obtained; the adequacy of the obtained mathematical model was verified with the Fisher's F-criterion. The surface response of the optimization criterion, showing the influence of factors on the optimization parameter is represented graphically.

The rational parameters of the grinding process in the experimental setup are justified. Optimum values of these technological parameters are established.

УДК 621.822.6 (031)

Санюкевич Ф. М., Монтик С. В.

### ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ В УЗЛАХ МЕХАНИЧЕСКИХ ПРИВОДОВ

**Введение.** Момент трения подшипника качения является одной из важнейших характеристик, определяющей его долговечность и предельную быстроходность. Особенно это актуально для высокооборотных подшипников, в качестве которых чаще всего использу-

ются роликовые подшипники с короткими цилиндрическими роликами. Как известно, для этих подшипников используется циркуляционный метод смазки, для оценки эффективности которого необходим критерий, способный оценить эффективность смазки роликов в за-

Санюкевич Федор Михайлович, к.т.н., доцент, доцент кафедры машиностроения и эксплуатации автомобилей Брестского государственного технического университета.

Монтик Сергей Владимирович, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой машиностроения и эксплуатации автомобилей Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.