

*И. И. Воячек, Ю. Н. Кошелева, А. Ю. Муйземнек*

**ВЫБОР РЕЖИМОВ АЛМАЗНОГО ГЛУБИННОГО  
ШЛИФОВАНИЯ ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ  
МАТЕРИАЛОВ ИЗ УСЛОВИЯ СОХРАНЕНИЯ  
РЕЖУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ КРУГА**

*Аннотация.* Предложена методика определения режимов глубинного алмазного шлифования труднообрабатываемых материалов, обеспечивающая максимальную производительность процесса. При этом научнообоснованно определяется предельная скорость перемещения детали и прогнозируется возможность засаливания круга для глубинного алмазного шлифования при выбранных режимах.

*Ключевые слова:* глубинное шлифование, режимы шлифования, зернистость круга, засаливание круга, межзерновое пространство круга, производительность шлифования.

*I. I. Voyachek, Y. N. Kosheleva, A. Y. Muyzemnek*

**SELECTING THE MODES OF DEEP DIAMOND  
GRINDING OF CHURLISH MATERIALS FOR RETAINING  
CIRCLE'S CUTTING CAPACITY**

*Abstract.* The authors suggest a method of determining the mode of deep diamond grinding of hard materials, ensuring maximum productivity of the process. The article scientifically proves the calculation of limit velocity of a detail and predicts circle clogging probability for deep diamond grinding in selected modes.

*Key words:* deep grinding, modes of grinding, grain grinding circle, grinding circle clogging, intergranular space of a grinding circle, grinding productivity.

**Введение**

Производительность процесса шлифования зависит от комплекса сложных механических и физических явлений, происходящих при взаимодействии шлифовального круга с деталью. Существенное влияние на качество обработанных изделий оказывает температурный режим шлифования. Чтобы не допустить появления прижогов и трещин на обработанной поверхности, необходимо ограничивать скорость перемещения изделия и глубину шлифования. С другой стороны, производительность шлифования связана с режущей способностью круга и находится в прямой зависимости от скорости засаливания круга, которая в свою очередь связана с пористостью круга и объемом межзернового пространства (с объемом стружки, размещаемой в порах и между зернами круга).

Повышение производительности шлифования может быть обеспечено применением высокопористых кругов. Однако для алмазного шлифования зернами АСб рекомендуется использовать металлические связки [1], в которых поры практически отсутствуют (около 2 %). Следовательно, весь объем стружки должен размещаться в межзерновом пространстве круга. Если объем снимаемой стружки превышает объем межзернового пространства, то стружка брикетизируется, а круг засаливается.

### 1. Определение объема межзернового пространства круга

Процесс глубинного шлифования характеризуется большими объемами снимаемого материала за один проход по сравнению с многопроходным шлифованием и проблема с размещением стружки встает наиболее остро.

Основным условием сохранения режущей способности кругов на металлических связках будет условие равенства объемов межзернового пространства круга (МЗП) на дуге контакта с изделием  $V_{\text{МЗП}}$  и объема стружки, снимаемого за период прохождения кругом дуги контакта  $V_{\text{СТР}}$ :

$$V_{\text{СТР}} \leq V_{\text{МЗП}} \quad (1)$$

Объем межзернового пространства можно найти как разность объема слоя круга, в котором размещаются зерна максимальной высоты  $h_{3\text{max}}$  (мм) и суммарного объема  $n$  зерен, находящихся в этом слое  $\sum_{i=1}^n V_{3i}$  (рис. 1):

$$V_{\text{МЗП}} = \pi D_{\text{к}} B_{\text{к}} h_{3\text{max}} - \sum_{i=1}^n V_{3i}, \text{ мм}^3,$$

где  $D_{\text{к}}$  – диаметр шлифовального круга, мм;  $B_{\text{к}}$  – ширина круга, мм.

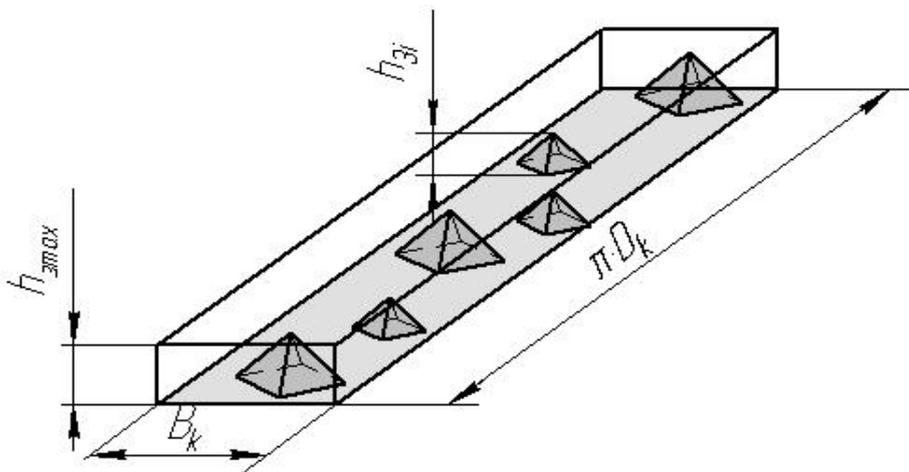


Рис. 1. Схема к расчету МЗП алмазного круга

Для определения суммарного объема зерен необходимо определить объем каждого зерна  $V_{3i}$ . Форма алмазного зерна сложна, кроме того, зерно может располагаться в связке различным образом. В ряде работ форма зерна моделировалась шаром [2], эллипсоидом [3] или тетраэдром. При замене абразивного зерна эллипсоидом вращения с постоянным значением полуосей возникает проблема, связанная с наклоном полуосей относительно поверхности круга, что приводит к существенным ошибкам [3]. Аппроксимация формы абразивного зерна шаром также недостаточно точна, так как реальное зерно имеет острые грани.

В данной работе зерна представлялись в виде октаэдров, расположенных перпендикулярно поверхности круга и выступающих из связки на некоторую величину  $h_3$ , которая изменяется от нуля до  $h_{3\max}$  и является случайной величиной, подчиняющейся закону нормального распределения [4]. В работе [4] установлено, что максимальная высота выступления зерен в большей степени зависит от типа связки и зернистости алмазного порошка и получена эмпирическая формула для определения максимальной высоты выступления зерен:

$$h_{3\max} = C_h(1 + d_{\text{ср}})^{X_h},$$

где  $C_h$  и  $X_h$  – постоянные коэффициенты, зависящие от типа связки;  $d_{\text{ср}}$  – средний размер зерна, мкм.

Средний размер зерна находится по следующей формуле [3]:

$$d_{\text{ср}} = 0,5(h_{\text{в}} + h_{\text{н}})\eta,$$

где  $h_{\text{в}}$  – размер ячейки верхнего сита в свету, мкм;  $h_{\text{н}}$  – размер ячейки нижнего сита в свету, мкм;  $\eta$  – поправочный коэффициент на размер зерна, определяемый в работе [5].

Величина  $h_{3i}$  представляется как произведение максимальной высоты выступов зерен на некоторый коэффициент  $\varphi_i$ , изменяющийся от нуля до единицы:

$$h_{3i} = \varphi_i h_{3\max}, \quad 0 \leq \varphi_i \leq 1.$$

Случайное число  $\varphi_i$  подчиняется закону нормального распределения и при вычислении задается с помощью генератора случайных чисел. Математическое ожидание  $\bar{\varphi} = 0,5$ , диапазон рассеивания принимается равным  $6\sigma$ , откуда среднее квадратическое отклонение  $\sigma = \frac{1}{6}$ .

Выступающая часть зерна представляет собой правильную четырехгранную пирамиду, объем которой равен

$$V = \frac{2}{3}h^3.$$

Для расчета суммарного объема выступающей части зерен необходимо знать их количество на поверхности круга –  $n$ , которое зависит от марки и концентрации алмазов и зернистости алмазного порошка [6].

При моделировании с помощью генератора случайных чисел разыгрывались в соответствии с нормальным законом распределения значения случайного числа  $\varphi_i$  при числе реализаций  $n$ , подсчитывались объемы выступающей части зерен, после чего находился суммарный объем межзернового пространства:

$$V_{\text{МЗП}} = \pi D_{\text{к}} B_{\text{к}} h_{3\max} - \frac{2}{3} h_{3\max}^3 \sum_{i=1}^n \varphi_i^3, \text{ мм}^3.$$

Алгоритм расчета МЗП алмазного круга программно реализован на языке программирования Delphi в виде автономного модуля (рис. 2).

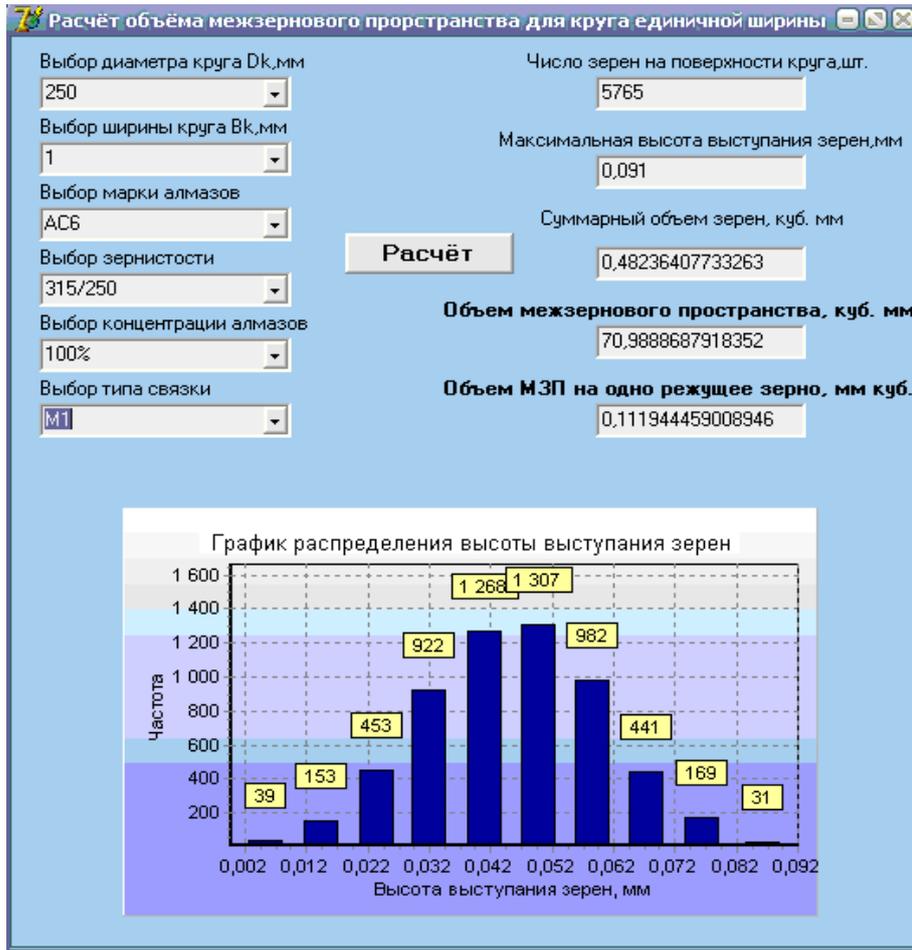


Рис. 2. Окно программы расчета МЗП алмазного круга

Поскольку в процессе шлифования стружка снимается только режущими зернами, при построении критерия оценки и выбора технологических режимов необходимо учитывать объем межзернового пространства, приходящийся на одно режущее зерно.

Известно, что количество режущих зерен колеблется в пределах 10–12 % от их общего числа [1, 2]. С учетом этого средний объем межзернового пространства, приходящийся на одно режущее зерно, можно определить по формуле

$$V_{\text{МЗП}i} = \frac{V_{\text{МЗП}}}{(0,10 \dots 0,12)n}$$

## 2. Определение объема стружки, снимаемой при шлифовании

Объем стружки, снимаемый одним режущим зерном за период прохождения им дуги контакта круга с изделием, можно определить из следующих

соображений. Объем материала, снимаемый шлифовальным кругом за единицу времени, равен (рис. 3)

$$V_{\text{мин}} = V_{\text{д}} t B_{\text{к}} 10^3, \text{ мм}^3/\text{мин}, \quad (2)$$

где  $V_{\text{д}}$  – скорость перемещения детали, м/мин;  $t$  – глубина шлифования, мм.

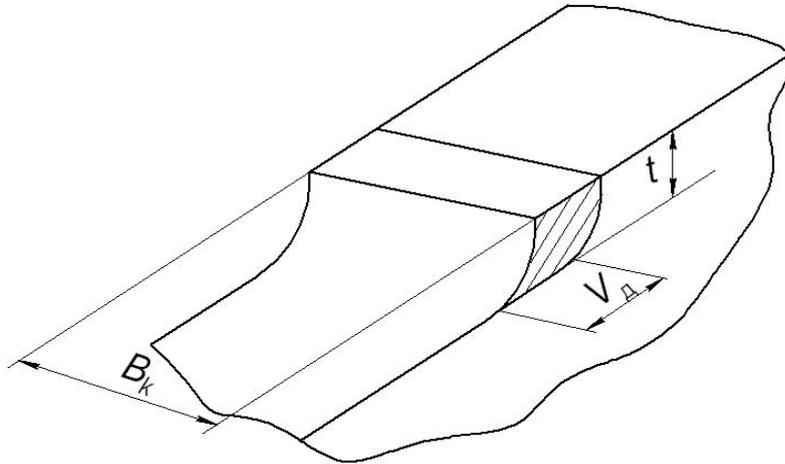


Рис. 3. Схема к определению объема снимаемого слоя

С другой стороны, данный объем можно определить по формуле

$$V_{\text{мин}} = V_{\text{стри}} z_p n_{\text{к}}, \text{ мм}^3/\text{мин}, \quad (3)$$

где  $V_{\text{стри}}$  – объем стружки, снимаемый одним зерном на дуге контакта круга с изделием,  $\text{мм}^3$ ;  $z_p$  – число режущих зерен;  $n_{\text{к}}$  – частота вращения шлифовального круга,  $\text{мин}^{-1}$ ;

$$z_p = 0,11n; n_{\text{к}} = \frac{1000V_{\text{кр}}}{60\pi D_{\text{к}}},$$

где  $V_{\text{кр}}$  – скорость шлифовального круга, м/с.

Приравнивая выражения (2) и (3) и решая уравнение относительно  $V_{\text{стри}}$ , можно получить

$$V_{\text{стри}} = \frac{1714D_{\text{к}}V_{\text{д}}tB_{\text{к}}}{nV_{\text{кр}}}, \text{ мм}^3. \quad (4)$$

### 3. Выбор режимов шлифования из условия сохранения стабильных режущих свойств круга

Используя условие (1), формулу (4) и результаты расчета величины  $V_{\text{МЗП } i}$ , выполненного с помощью программного модуля (рис. 2), можно определить режимы, при которых для принятых характеристик алмазного круга будут обеспечены его стабильные режущие свойства.

В частности, предельно допустимая скорость перемещения детали определяется по формуле

$$V_d = \frac{V_{мп} n V_{кр}}{1714 D_k t B_k}. \quad (5)$$

По формуле (5) выполнены расчеты для следующих режимов шлифования:

1)  $V_{кр} = 30$  м/с;  $t = 1$  мм,  $B_k = 1$  мм,  $D_k = 250$  мм, тип связки М2-01, концентрация алмазов в алмазоносном слое 100%, марки алмазов АС6, АС4, АС2 (рис. 4);

2)  $V_{кр} = 30$  м/с;  $t = 1$  мм,  $B_k = 1$  мм,  $D_k = 250$  мм, типы связок М2-01, М5-04, М2-09, концентрация алмазов в алмазоносном слое 100 %, марка алмазов АС6 (рис. 5).

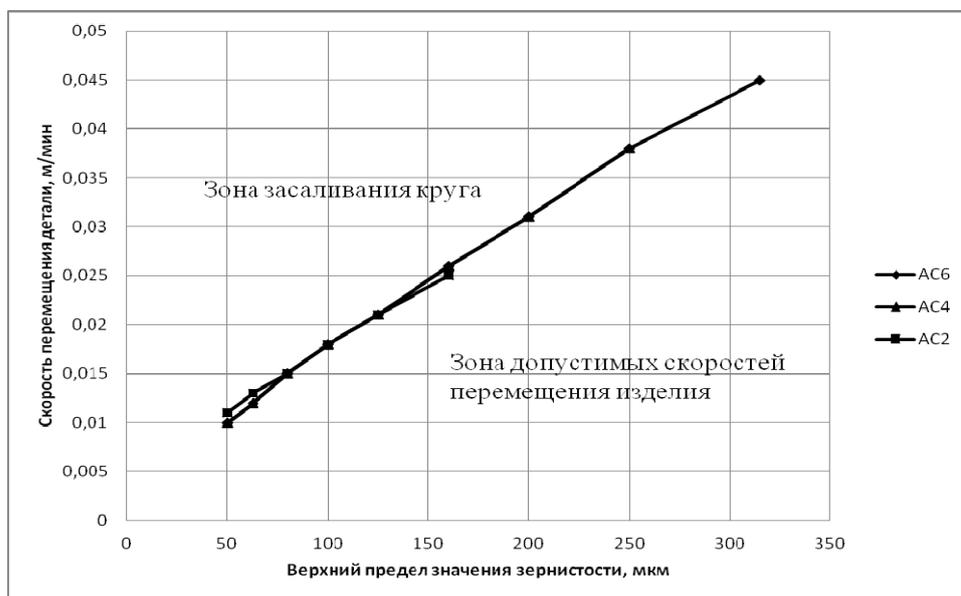


Рис. 4. Зависимость допустимой скорости перемещения детали от зернистости алмазного порошка и марок алмазов (тип связки М2-01)

Результаты расчета показали, что на величину допустимой скорости перемещения детали в значительной степени влияет зернистость алмазного порошка и в определенной степени тип связки (рис. 5). Для различных марок алмазов (АС6, АС4, АС2) при одинаковой зернистости значения допустимой скорости перемещения детали различаются незначительно.

### Заключение

Таким образом, в результате проведенных исследований разработана методика выбора эффективных режимов алмазного глубинного шлифования из условия сохранения стабильных режущих свойств круга.

Установлено, что основным фактором, влияющим на выбор предельно допустимой скорости перемещения детали и, следовательно, обеспечение

максимальной и стабильной производительности шлифования, является зернистость алмазного порошка.

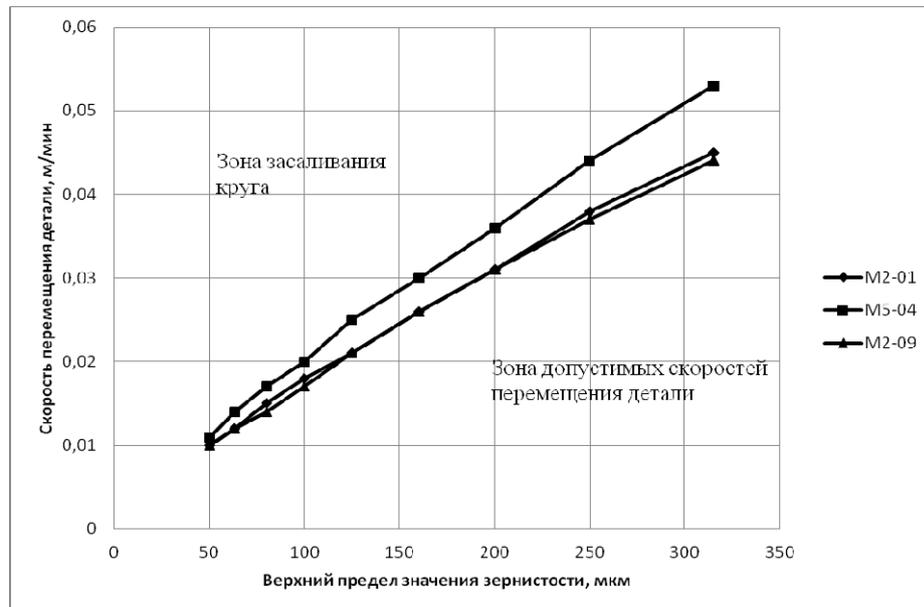


Рис. 5. Зависимость допустимой скорости перемещения детали от зернистости алмазного порошка и типов связки (марка алмазов АС6)

С увеличением зернистости можно назначать большую скорость перемещения детали. В свою очередь выбор зернистости алмазного порошка необходимо осуществлять с учетом обеспечения требуемой шероховатости поверхности готового изделия. От типа связки предельная скорость перемещения детали зависит в меньшей степени. Для обеспечения максимальной производительности следует применять связку М5-04, однако наиболее подходящим типом связки для глубинного шлифования твердых сплавов с учетом теплофизических характеристик является М2-01. От марки алмазов предельная скорость перемещения детали практически не зависит, что объясняется незначительными отличиями геометрии алмазов разных марок друг от друга (различаются прежде всего прочностными характеристиками).

#### Список литературы

1. **Маслов, Е. Н.** Теория шлифования металлов / Е. Н. Маслов. – М. : Машиностроение, 1974. – 320 с.
2. **Байкалов, А. К.** Введение в теорию шлифования материалов / А. К. Байкалов. – Киев : Наукова думка, 1978. – 207 с.
3. **Королев, А. В.** Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке / А. В. Королев. – Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 1975. – 189 с.
4. **Соколов, В. О.** Комплексное обеспечение точности профильной алмазно-абразивной обработки : автореферат дис. ... докт. техн. наук: 05.03.01, 05.02.08 / Соколов В. О. – Саратов, 2000. – 30 с.
5. **Щиголев, А. Г.** Определение количества зерен по глубине рабочего поверхностного слоя алмазного инструмента / А. Г. Щиголев, Б. И. Полупан, В. В. Коломиец // Синтетические алмазы, 1979. – № 3. – С. 19–25.

6. **Бакуль, В. Н.** Число зерен в одном карате – одна из важнейших характеристик алмазного порошка / В. Н. Бакуль // Синтетические алмазы. – 1976. – № 4. – С. 22–27.

### References

1. **Maslov, Ye. N.** Teoriya shlifovaniya metallov / Ye. N. Maslov. – M. : Mashinostroyeniye, 1974. – 320 s.
2. **Baykalov, A. K.** Vvedeniye v teoriyu shlifovaniya materialov / A. K. Baykalov. – Kiyev : Naukova dumka, 1978. – 207 s.
3. **Korolev, A. V.** Issledovaniye protsessov obrazovaniya poverkhnostey instrumenta i detali pri abrazivnoy obrabotke / A. V. Korolev. – Saratov : Izd-vo Sa-rat. un-ta, 1975. – 189 s.
4. **Sokolov, V. O.** Kompleksnoye obespecheniye tochnosti profil'noy almazno-abrazivnoy obrabotki : avtoreferat dis. ... dokt. tekhn. nauk: 05.03.01, 05.02.08 / Sokolov V. O. – Saratov, 2000. – 30 s.
5. **Shchigolev, A. G.** Opredeleniye kolichestva zeren po glubine rabochego poverkhnostnogo sloya almaznogo instrumenta / A. G. Shchigolev, B. I. Polupan, V. V. Kolomiyets // Sinteticheskiye almazy, 1979. – № 3. – S. 19–25.
6. **Bakul', V. N.** Chislo zeren v odnom karate – odna iz vazhneyshikh kharakteristik almaznogo poroshka / V. N. Bakul' // Sinteticheskiye almazy. – 1976. – № 4. – S. 22–27.

---

#### **Воячек Игорь Иванович**

доктор технических наук, профессор,  
кафедра технология машиностроения,  
Пензенский государственный  
университет (г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: Voyachek@list.ru

#### **Voyachek Igor Ivanovich**

Doctor of engineering sciences, professor,  
sub-department of machine building,  
Penza State University  
(Penza, 40 Kransaya str.)

#### **Кошелева Юлия Николаевна**

аспирант, Пензенский государственный  
университет (г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: j231@mail.ru

#### **Kosheleva Yuliya Nikolaevna**

Postgraduate student, Penza State  
University (Penza, 40 Kransaya str.)

#### **Муземнек Александр Юрьевич**

доктор технических наук, профессор,  
кафедра транспортных машин,  
Пензенский государственный  
университет (г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: muzemnek@yandex.ru

#### **Muземnek Alexander Yuryevich**

Doctor of engineering sciences, professor,  
sub-department of transport machines,  
Penza State University  
(Penza, 40 Kransaya str.)

---

УДК 621.923

#### **Воячек, И. И.**

**Выбор режимов алмазного глубинного шлифования труднообрабатываемых материалов из условия сохранения режущей способности круга / И. И. Воячек, Ю. Н. Кошелева, А. Ю. Муземнек // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2013. – № 1 (25). – С. 94–101.**