

<sup>1</sup>Федоренко М.А., д-р техн. наук, проф.,  
<sup>1</sup>Бондаренко Ю.А., д-р техн. наук, проф.,  
<sup>1</sup>Погонин А.А., д-р техн. наук, проф.,  
<sup>2</sup>Бестужева О.В., ст. препод.

<sup>1</sup>Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова  
<sup>2</sup>Белгородский государственный национальный исследовательский университет

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ ПРИ СВЕРЛЕНИИ ОТВЕРСТИЙ ВО ФЛАНЦЕВЫХ СОЕДИНЕНИЯХ

kdsm2002@mail.ru

Одной из причин потери работоспособности оборудования являются нарушения технологии сборки и монтажа и недостаточная точность стыковки узлов при установке этого оборудования в условиях эксплуатации. Эти нарушения при монтаже оборудования возникают в частности при необходимости использования ручного труда при выполнении различных подгоночных работ. В процессе эксплуатации в результате возможного нарушения технологии изготовления деталей и узлов, неточности монтажа, нарушения инструкций по эксплуатации, климатических условий и т.д., показатели надежности промышленного оборудования, такие как долговечность, безотказность снижаются. Для дальнейшей эксплуатации оборудования необходимо производить своевременное восстановление изношенных деталей и узлов, но для осуществления этой задачи промышленное предприятие должно иметь механизированный парк станков, которые обеспечивали бы ремонт деталей промышленного оборудования в условиях эксплуатации без остановки технологического процесса производства продукции.

**Ключевые слова:** станок, обработка, монтаж, отверстие, фланец, промышленное оборудование, точность, износ.

**Введение.** На многих промышленных предприятиях эксплуатируются вращающееся оборудование, имеющее крышки (фланцы). Крышки к корпусу закрепляются при помощи большого количества болтов. К таким агрегатам относятся помольные и сырьевые мельницы, сушильные барабаны, емкости в химической промышленности и т.д. Фланцевые соединения валов, крышек, цапф и т.д. имеют несколько отверстий, выполненных под призонные болты, диаметром до 60 мм. Разрушение отверстий происходит в результате ослабления соединения, частой разборки и сборки узла, вибраций оборудования и др. Например, разрушение отверстий вала конической дробилки может происходить в результате нагрузок, возникающих при передаче большого вращающего момента и постоянных вибраций, передающихся на вал, при дроблении твердых пород. При остановке или заклинивании узлов происходит срез или изгиб болтов промежуточных валов, что приводит к искажению формы отверстий [5–7, 9].

Во многих случаях, детали фланцевого типа, которые необходимо установить, заменив изношенные, поступают на предприятия без отверстий, и возникает необходимость просверлить отверстия, совпадающие со старыми.

**Основная часть.** При восстановлении диаметра изношенных отверстий во фланцевых соединениях узлов больших размеров и массы, заменяемый фланец крепится к фланцу, который установлен в узле, этот фланец будет выполнять роль кондуктора при обработке отверстий в новом фланце и который также используется для расположения на нем приставного станка [4, 8].

В связи с тем, что при обработке отверстий во фланце возникают погрешности, вызванные неточностью базирования станка, на которые влияет непараллельность торцов фланцев, неточность изготовления и сборки деталей станка, неточность установки крепежного кронштейна, недостаточная жесткость станка.

Крепежный кронштейн станка сложно установить с высокой точностью относительно фланца. В результате базирования может возникнуть перекося в вертикальной и горизонтальной плоскостях, на величину которого влияет форма фиксатора и отверстия, расположенного на исходном фланце. Такая погрешность установки может привести к уходу сверла, а также к неточности обработки отверстия. Погрешность формы сверла, неравенство углов при его вершине и биение шпинделя при обработке, приводят к образованию погрешности формы отверстия и разбивке диаметра.

Допустим, что левая режущая кромка режущей части инструмента больше правой, (рис. 1) в этом случае сила резания  $P_{y_2} > P_{y_1}$ . Известно, если изменение угла достигает  $2^\circ$ , то разница радиальных сил определяется по формуле  $\Delta P = P_{y_2} - P_{y_1}$ , которую можно представить в следующем виде [2]:

$$\Delta P = 0,0153(1 - f)P_0 \quad (1)$$

где  $f$  - величина, которая зависит от отношения сил: осевой и подачи.

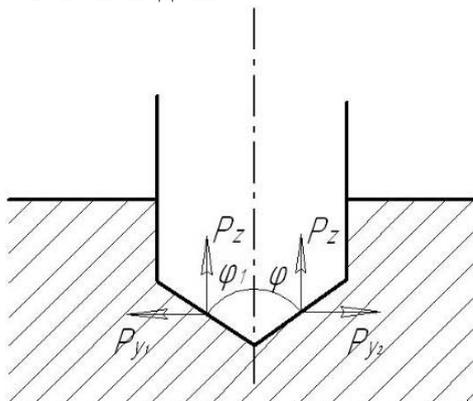


Рис. 1. Силы резания, возникающие при сверлении

Изменение диаметра от неуравновешенной радиальной силы можно представить:

$$\Delta D = \frac{2\Delta PL^3}{3EI}, \quad (2)$$

где  $L$  - длина инструмента;  $I$  - минимальный момент инерции, рассчитанный в поперечном сечении инструмента.

На разбивку диаметра отверстия влияет искажение оси по длине сверла, т.е. отклонение от вертикальной оси, несоосность рабочей части инструмента с хвостовиком (рис. 2).

В том случае, когда при обработке сверла используют в качестве приспособлений кондукторы, а отверстия в них получены неточно, возникают дефекты расположения центров отверстий. Даже при относительно точном расположении центров отверстий в кондукторных втулках

встречается разбивка отверстий. Разбивка наблюдается в связи с погрешностью направления инструмента в процессе сверления, в том случае, если втулка имеет недостаточную высоту, нежесткого закрепления, при наличии зазора между втулкой и инструментом и от гироскопического эффекта. При качественном и точном изготовлении станка, его деталей и узлов, и режущих инструментов многие погрешности возможно минимизировать или исключить совсем. Гироскопический момент, который наблюдается при сверлении влияет на смещение оси шпиндельного узла и сверла.

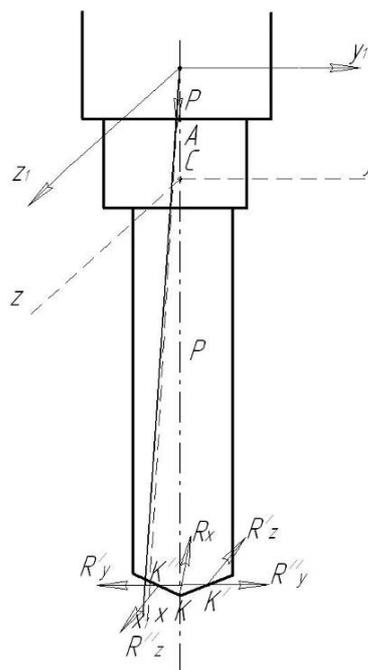


Рис. 2. Схема сил, влияющих на сверло при обработке

При определении значения действующего гироскопического момента имеется две системы отсчёта: неподвижная  $OX_1, Y_1Z_1$ , ось  $X$ , в которой направлена вдоль оси сверла в положении равновесия [3], и подвижная  $CXYZ$  с началом координат в центре тяжести.

$$z = -\sqrt{\frac{I_y k_1^2 + a_y}{I_y k_1^2 + a_z}} A_1 \cos(k_1 t + \alpha_1) - \sqrt{\frac{I_y k_2^2 + a_y}{I_y k_2^2 + a_z}} B_1 \cos(k_2 t + \alpha_2) + B_2 \sin \omega t. \quad (3)$$

Произвольные постоянные интегрирования системы  $A_1, B_1, \alpha_1, \alpha_2, B_2$  устанавливаются заданными условиями.

Частоты  $k_1$  и  $k_2$  собственных колебаний системы находят по следующим зависимостям:

$$k = \frac{1}{I_y} \sqrt{\frac{a+b}{2}}; \quad k_2 = \frac{1}{I_y} \sqrt{\frac{a-b}{2}}, \quad (4)$$

где

$$a = I_x^2 \omega^2 - I_y (a_y + a_z) > 0; \quad (5)$$

$$b = \sqrt{[I_x^2 \omega^2 - I_y (a_y + a_z)]^2 - 4I_y^2 a_y a_z} \geq 0; \quad (6)$$

$$a_y = Pl + I_y l_2 l_3; \quad a_z = Pl + I_z l_2 l_3 \quad (7)$$

Амплитуды вынужденных колебаний  $A_2$  и  $B_2$  системы определяются по формулам:

$$\left. \begin{aligned} A_2 &= \frac{l_1 l_{\Delta} k_y [(I_x + I_y)\omega^2 + Pl + I_z l_2 l_3]}{I_x^2 \omega^4 - (I_y \omega^2 + Pl + I_y l_2 l_3)(I_y \omega^2 + Pl + I_z l_2 l_3)}; \\ B_2 &= \frac{l_1 l_{\Delta} k_y [(I_x + I_y)\omega^2 + Pl + I_y l_2 l_3]}{I_x^2 \omega^4 + (I_y \omega^2 + Pl + I_y l_2 l_3)(I_y \omega^2 + Pl + I_z l_2 l_3)} \end{aligned} \right\} (8)$$

Исходя из вышеприведенных зависимостей, вытекает, что при повышении значения угловой скорости  $\omega$  будет происходить уменьшение  $y$  и  $z$ , а, значит, колебания шпинделя и сверла. В этом случае будет снижаться погрешность при сверлении.

Конструкция сверло – шпиндельный узел осуществляет вращение вокруг оси инструмента с постоянной угловой скоростью  $\omega$  и моментами инерции относительно осей  $x, y, z - I_x, I_y, I_z$ , при равенстве моментов инерции  $I_y = I_z$ . В вышеприведённых формулах обозначим  $l_1$  как расстояние от поперечной режущей кромки  $K$  инструмента до центра тяжести  $C$  узла;  $l_2$  - расстояние от центра тяжести  $C$  до точки  $A$ , расположенной на оси вращения инструмента, полученное на пересечении оси и плоскости, которую провели через нижнюю грань шпинделя, перпендикулярно к ней;  $l_3$  - расстояние от точки  $A$  до неподвижной точки  $O$ . Введем обозначение  $\gamma$  угла поворота оси сверла (вокруг оси  $z$ ), заданный от оси  $x$  в плоскости  $xy$ ; и  $\beta$  - угла поворота оси сверла, определяемый от оси  $x$  в плоскости  $xz$ .

Введем обозначения  $(x, y, z)$  и  $(x', y', z')$  координат точки  $K$  относительно подвижной и неподвижной системы отсчёта. Таким образом, с учетом того, что величины углов  $\beta$  и  $\gamma$  малы, можно записать:

$$\beta = \frac{y}{l} = \frac{y'}{l'}; \quad \gamma = \frac{z}{l} = \frac{z'}{l'}; \quad x = l; \quad x' = l_1 \quad (9)$$

где  $l = l_1 + l_2 + l_3$ .

На конструкцию инструмент – шпиндельный узел оказывает влияние  $P$  – сила подачи,  $M_{кр}$  – крутящий момент, обозначим  $F_y$  и  $F_z$  проекции на оси  $y$  и  $z$  горизонтальных упругих реакций, которые прикладывают к шпиндельному узлу в точке  $A$ ,  $P_1$  – масса конструкции,  $R_x$  – равнодействующая вертикальной силы,  $R'_y$  и  $R''_y$  – радиальные составляющие,  $R'_z$  и  $R''_z$  – тангенциальные составляющие поперечной и главной режущей кромок инструмента. Принимаем,

что  $R_x$  и неуравновешенная радиальная сила  $\Delta R_y = R_y'' - R_y'$  приложены к точке  $K$  поперечной кромки, лежащей на оси инструмента и  $R'_z = R_z'' = R_z$ .

Используя теорему об изменении момента количества движения относительно центра масс, приведем систему дифференциальных уравнений колебаний конструкции сверло – шпиндельный узел вокруг осей, параллельных осям  $y$  и  $z$ , которые проходят через центр тяжести конструкции. Тогда система дифференциальных уравнений с точностью до величин первого порядка малости с учётом влияния гироскопического эффекта будет следующей [3]:

$$\left. \begin{aligned} I_y z - I_x \omega y - a_z z &= a_x \sin \omega t \\ I_y y + I_x \omega z - a_y y &= a_x \cos \omega t \end{aligned} \right\} (10)$$

где

$$a_z = Pl = j_z l_2 l_3; \quad a_x = l_1 l \Delta R_y; \quad a_y = Pl + j_y l_2 l_3;$$

$j_y, j_z$  - жесткость шпинделя по направлениям осей  $y$  и  $z$ .

Тогда получим:

$$y = A_1 \sin(k_1 t + \alpha_1) + B_1 \sin(k_1 t + \alpha_2) + A_2 \cos \omega t; \quad (11)$$

Величина изменения диаметра увеличивается при увеличении подачи. При увеличении частоты вращения разбивка уменьшается. На точность обработки отверстий влияет также и увеличение глубины сверления.

Фланцы, входящие в конструкцию узлов большой массы и размеров, характеризуются большой жесткостью, поэтому инструмент, применяемый для обработки, может разрушиться под действием продольной силы вызывающей его изгиб. На рис. 3. приведены основные схемы положения сверла в процессе работы.

Критическая сила, которая допустима исходя из условий прочности инструмента, определяется по формуле [2]

$$P_{кр} = \sigma_{кр} F_{CB} = \frac{KEI_{\min}}{l^2}, \quad (12)$$

где  $k$  – коэффициент устойчивости, на который оказывает влияние характер закрепления сверла;  $F_{CB}$  – площадь поперечного сечения инструмента.

При обработке отверстий с применением нестационарных станков (рис. 4) их устанавливают по отверстию в ответном фланце. Таким образом, возможно возникновение отклонения соосности отверстий из-за неточности базирования, а в процессе сверления ось инструмента не совпадёт с осью базового отверстия.

Построим измерительную размерную цепь  $\Delta A = A_1 + A_2 + A_3$ . Если левое отверстие, при сверлении смежных фланцев, используется как базовое, то погрешность может образоваться в результате параллельного смещения или перекоса осей.

При применении левого отверстия в качестве базового с координатами  $O_1 X_1 Y_1 Z_1$ , относительно которой имеется смещение и поворот обрабатываемого отверстия с координатами  $O_2 X_2 Y_2 Z_2$  находимые по векторам  $K$  линейного смещения и углового поворота, то отклонение от соосности на длине  $L$  определим по формуле:

$$\Delta_A = \sqrt{\Delta_C^2 + \Delta_D^2} + L\sqrt{\Delta_\beta^2 + \Delta_\gamma^2}, \quad (13)$$

где  $\Delta_C, \Delta_D, \Delta_\beta, \Delta_\gamma$  - отклонения соответствующих параметров смещения и относительного поворота. Наибольшее отклонение от соосности ( $\Delta_C^B = \Delta_C^H, \Delta_\beta^H = \Delta_\beta^B$ ) может быть:

$$\Delta_A^B = \sqrt{2}(\Delta_C^B + L\Delta_\beta^B).$$

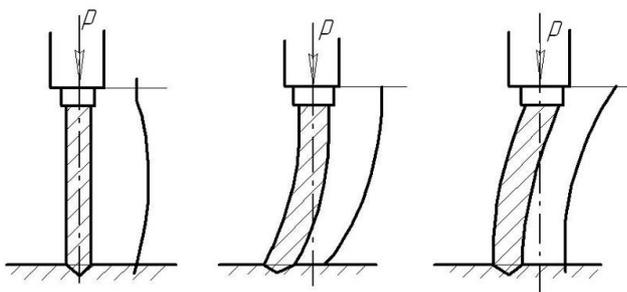


Рис. 3. Варианты расположения инструмента при сверлении

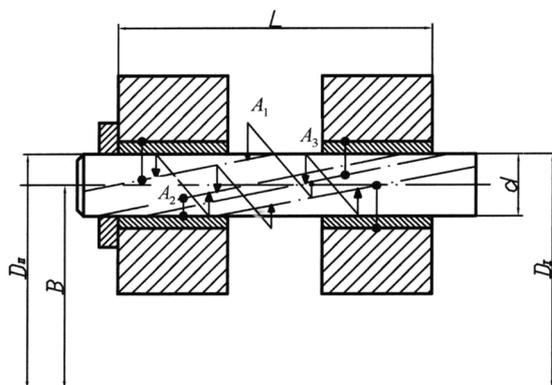


Рис. 4. Схема определения погрешности при сверлении

Для решения назначаем:  $B$  - расстояние средней оси до оси вала;  $C$  - расстояние между смежными отверстиями;  $L$  - расстояние между торцами фланцев, если известны отклонения

$\Delta A_1$  и  $\Delta A_2$  то максимальная погрешность (отклонение от соосности) на участке  $L$  определяется по формуле:

$$\Delta A = \Delta A_1 + \frac{\Delta A_2 - \Delta A_1}{L - x}(L_i - x), \quad (14)$$

где  $X$  - расстояние, на котором выполнятся замер перекоса оси правого отверстия.

Таким образом, среднее отклонение оси отверстия от оси вала появляется вследствие неточного монтажа и установки нестационарного станка и увода сверла, его можно рассчитать по формуле:

$$B_{CP} = \frac{D_1 + D_2}{2} - \frac{d}{2} \quad (15)$$

**Вывод.** Отклонение оси отверстия при обработке его на новом фланце с использованием исходного фланца в качестве сопрягаемого копира, зависит от точности исполнения отверстий этого фланца и параллельности торцов фланцев.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Решетников Д.Н., Портман В.Т. Точность металлорежущих станков, М.: Машиностроение, 1986. 336 с.
2. Кацев П.Г. Статистические методы исследования режущего инструмента. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1974, 239 с.
3. Кобалаев Ю.Ж., Гукьямухов М.Б. Влияние гироскопического момента на точность обработки при сверлении. Труды СКГМИ Орджоникидзе. Вып. 27. 1970, 30 с.
4. Федоренко М.А., Бондаренко Ю.А., Рыбак Л.А., Бестужева О.В. Разработка станка для сверления и растачивания отверстий в крупногабаритных фланцевых соединениях // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. № 5. С. 106–109.
5. Албагачиев А.Ю., Амбросимов С.К., Бавыкин О.Б., Большаков А.Н., Бондаренко Ю.А., Вячеславова О.Ф., Еременко Ю.И., Забельян Д.М., Зайцев С.А., Козлова М.А., Крупеня Е.Ю., Лебедев В.А., Лобанов И.Е., Морозова А.В., Пелипенко Н.А., Пухальский В.А., Рыбак Л.А., Санин С.Н., Санина Т.М., Серебренникова А.Г. Прогрессивные машиностроительные технологии, оборудование и инструменты. Москва, 2015. Том VI, 59–103 с.
6. Федоренко М.А., Бондаренко Ю.А., Санина Т.М. Энергосберегающие методы восстановления работоспособности оборудования промышленности строительных материалов. Белгород, 2011, 162 с.

7. Федоренко М.А., Санина Т.М., Бондаренко Ю.А., Погонин А.А., Схиртладзе А.Г. Бездемонتاжное восстановление крупногабаритных агрегатов // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2009. № 11. С. 11–14.

8. Федоренко М.А., Бондаренко Ю.А. Приставной сверлильный станок для сверления и рас-

тачивания отверстий в крупногабаритных фланцевых соединениях патент на полезную модель RUS 67907 17.05.2007.

9. Бондаренко Ю.А. Технологические методы и способы восстановления работоспособности крупногабаритного промышленного оборудования без его демонтажа приставными станочными модулями. Белгород, 2005, 231 с.

#### Информация об авторах

**Федоренко Михаил Алексеевич**, доктор технических наук, профессор кафедры технологии машиностроения.  
E-mail: kdms2002@mail.ru.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.  
Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Бондаренко Юлия Анатольевна**, доктор технических наук, профессор кафедры технологии машиностроения.  
E-mail: kdms2002@mail.ru.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.  
Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Погонин Анатолий Алексеевич**, доктор технических наук, профессор кафедры технологии машиностроения.  
E-mail: kdms2002@mail.ru.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.  
Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Бестужева Ольга Васильевна**, старший преподаватель кафедры прикладной информатики и информационных технологий.

E-mail: kdms2002@mail.ru.

Белгородский государственный национальный исследовательский университет.  
Россия, 308015, Белгородская область, г. Белгород, ул. Победы, 85.

Поступила в декабре 2017 г.

© Федоренко М.А., Бондаренко Ю.А., Погонин А.А., Бестужева О.В., 2018

**M.A. Fedorenko, J.A. Bondarenko, A.A. Pogonin, O.V. Bestuzhev**

#### **ENSURING ACCURACY WHEN DRILLING HOLES FOR FLANGE CONNECTIONS**

*One of the reasons for the efficiency loss of equipment working capacity are violations of technology of assembly and installation and the lack of precision of docking nodes when installing this equipment in conditions. These irregularities in the installation of equipment arise particularly when you need to use manual labor in the performance of various fitting works. In the process of operation due to possible violation of manufacturing technology of parts and components, inaccuracies of installation, violation of the operating procedures, climatic conditions etc., the reliability of industrial equipment, such as durability, reliability decrease, further operation of equipment necessary to make timely restoration durability and reliability are reduced, further operation of equipment necessary to make timely restoration of worn parts and assemblies, but for this purpose, an industrial enterprise should have mechanized machinery that would ensure repair of the industrial equipment in operation without stopping the technological process of production.*

**Keywords:** machine, processing, mounting, hole, flange, industrial equipment, precision, wear.

#### **REFERENCES**

1. Reshetnikov D.N., Portman V.T. Precision of metal-cutting machines, M.: Mashinostroenie, 1986. 336 p.

2. Katsev P.G. Statistical methods of studying the cutting tool. Ed. 2 nd, revised. and additional. M.: Mechanical Engineering, 1974, 239 p.

3. Kobalaev Yu.Z., Gukyamukhov M.B. The influence of the gyroscopic moment on the accuracy of

machining during drilling. Proceedings of SKGMI Ordzhonikidze. Vyp. 27. 1970, 30 p.

4. Fedorenko M.A., Bondarenko Yu.A., Rybak L.A., Bestuzheva O.V. Development of a machine for drilling and boring holes in large-sized flanged connections. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2016, no. 5, pp. 106–109.

5. Albagachiev A.Yu., Ambrosimov S.K., Bavykin O.B., Bolshakov A.N., Bondarenko Yu.A., Vyacheslavova O.F., Eremenko Yu.I., Zabelian D.M,

Zaitsev S.A, Kozlova M.A, Krupenya E.Yu., Lebedev V.A, Lobanov I.E, Morozova A.V, Pelipenko N.A, Puhalsky V.A, Rybak L.A., Sanin S.N, Sanina T.M, Serebrennikova A.G Progressive engineering technologies, equipment and tools. Moscow, 2015. Volume VI, 59–103 p.

6. Fedorenko M.A., Bondarenko Yu.A., Sanina T.M. Energy-saving methods of repairing the equipment in the building materials industry. Belgorod, 2011, 162 p.

7. Fedorenko M.A., Sanina T.M., Bondarenko Yu.A., Pogonin A.A., Shhirtladze A.G. The undo-re-

building of the restoration of the clustered aggregates. Repair. Recovery. Modernization, 2009, no. 11, pp. 11–14.

8. Fedorenko M.A., Bondarenko Yu.A. Accessory drilling machine for drilling and boring holes in large flanged connections patent for utility model RUS 67907 17.05.2007

9. Bondarenko Yu.A. Technological methods and ways to restore the performance of large-scale industrial equipment without dismantling them with attached machine modules. Belgorod, 2005, 231 p.

#### *Information about the author*

**Mikhail A. Fedorenko**, PhD, Assistant professor.

E-mail: kdms2002@mail.ru

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.  
Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Julia A. Bondarenko**, PhD, Assistant professor.

E-mail: kdms2002@mail.ru

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.  
Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Anatoly A. Pogonin**, PhD., Assistant professor.

E-mail: kdms2002@mail.ru

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.  
Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

**Olga V. Bestuzheva**, Senior lecturer.

E-mail: kdms2002@mail.ru

Belgorod state national research University.  
Russia, 308015, Belgorod oblast, Belgorod, Pobeda st. 85.

---

*Received in December 2017*