

Ф.В. НОВИКОВ, Р.М. МИНЧЕВ

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ ОТВЕРСТИЙ

Произведен расчет шероховатости поверхности при абразивной обработке на основе теории вероятностей и анализ закономерностей изменения шероховатости поверхности при шлифовании отверстия. Установлено, что шероховатость поверхности однозначно определяется суммарным количеством зерен, участвующих в формировании шероховатости поверхности. Обоснованы преимущества хонингования по сравнению с внутренним шлифованием. Показана возможность уменьшения шероховатости поверхности при шлифовании кругом, ось которого расположена перпендикулярно оси вращения обрабатываемой детали.

Ключевые слова: абразивная обработка, шлифование, хонингование, отверстие, шероховатость поверхности.

Введение. При изготовлении гидро- и пневмоцилиндров предусмотрены высокие требования к точности и качеству обрабатываемых поверхностей отверстий. В особой мере это относится к обеспечению шероховатости поверхности ($R_a \leq 0,05$ мкм). Однако, как показывает практика, выполнить эти требования на операциях лезвийной обработки и внутреннего шлифования сложно. В связи с этим актуальна проблема определения новых более эффективных технологических решений, направленных на обеспечение заданной шероховатости обрабатываемых поверхностей отверстий в гидро- и пневмоцилиндрах, что требует проведения дальнейших исследований закономерностей изменения шероховатости поверхности при абразивной обработке, включая процессы внутреннего шлифования, хонингования и обработки отверстий свободным абразивом.

Анализ последних исследований. Многочисленными исследованиями [1–3] установлено, что добиться высоких показателей шероховатости обрабатываемых поверхностей отверстий можно применением методов хонингования и обработки свободным абразивом. Однако при этом значительно увеличивается трудоемкость обработки, например, по сравнению с внутренним шлифованием, что снижает эффективность обработки. Поэтому в настоящее время проводятся теоретические исследования параметров шероховатости поверхности при абразивной обработке с позиции теории вероятностей [4, 5] с целью научно обоснованного выбора оптимальных условий обработки. В связи с этим актуально применение данного теоретического подхода к определению оптимальных условий абразивной обработки отверстий с учетом высоких требований, предъявляемых к шероховатости обрабатываемых поверхностей.

Постановка задачи. В работе [6] предложено новое теоретическое решение задачи определения параметров шероховатости поверхности при абразивной обработке. Однако при этом недостаточно полно обоснована возможность перехода от бинома Ньютона к экспонентной функции при вычислениях. Поэтому необходимо, во-первых, уточнить данное решение, во-вторых, применить его для теоретического анализа условий уменьшения шероховатости поверхности при абразивной обработке отверстий в гидро- и пневмоцилиндрах.

Математическая модель. Рассмотрим схему образования шероховатости поверхности на прямолинейном образце при его обработке абразивным инструментом с одновысотным выступанием режущих зерен над уровнем связки инструмента (рис. 1). Предположим, что инструмент совершает движение перпендикулярно плоскости обрабатываемого образца. Для упрощения расчетов рабочую поверхность абразивного инструмента целесообразно разбить на n_1 элементарных слоев, параллельных плоскости обрабатываемого образца, в каждом из которых находится по одному абразивному зерну. Ширина элементарного слоя равна ширине рабочей части абразивного инструмента B , а его высота равна высоте выступа абразивного зерна b .

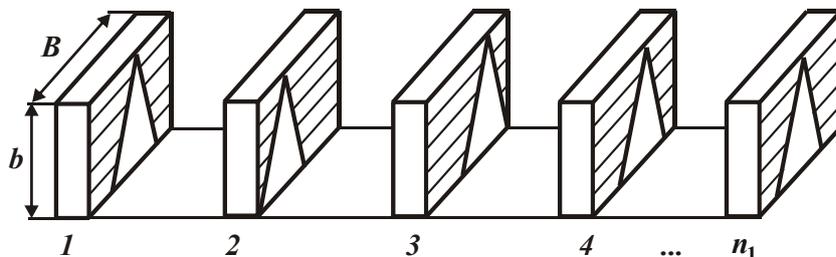


Рис. 1. Схема расположения n_1 элементарных слоев абразивных зерен

Тогда относительная полнота профиля режущего абразивного зерна, спроектированного на поверхность обрабатываемого образца, опишется:

$$\varepsilon_i(y) = \frac{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot y}{B}, \tag{1}$$

где 2γ – угол при вершине конусообразного режущего зерна; y – координата, отсчитываемая от вершины зерна, м.

Противоположная вероятностная функция $\Phi_i(y)$ примет вид:

$$\Phi_i(y) = 1 - \varepsilon_i(y) = 1 - \frac{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot y}{B}. \tag{2}$$

Функция $\Phi_j(y)$, которая учитывает наложение проекций n_1 зерен, расположенных в n_1 элементарных слоях рабочей поверхности инструмента, согласно теоремы умножения независимых случайных величин [7], выразится:

$$\Phi_j(y) = \prod_{i=1}^{n_1} \Phi_i(y) = \left(1 - \frac{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot y}{B}\right)^{n_1} = (1-x)^{n_1}, \tag{3}$$

где $x = \varepsilon_i(y) = \frac{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot y}{B} \ll 1$.

Очевидно, по мере наложения проекций n_1 зерен на плоскость обрабатываемого образца функция $\Phi_j(y)$ будет уменьшаться, уменьшая тем самым шероховатость обрабатываемой поверхности.

Выражение (3) является биномом Ньютона:

$$(1-x)^{n_1} = 1 - n_1 \cdot x + \frac{n_1 \cdot (n_1 - 1)}{1 \cdot 2} \cdot x^2 - \frac{n_1 \cdot (n_1 - 1) \cdot (n_1 - 2)}{1 \cdot 2 \cdot 3} \cdot x^3 + \dots \tag{4}$$

С учетом того, что величина $x \ll 1$, а n_1 – относительно небольшая величина, например, равная 10 ... 20, очевидно, в разложении (4) преобладают первые слагаемые. В результате можно ограничиться двумя первыми слагаемыми. А это означает, что разложение (4) с достаточной для практики точностью в первом приближении можно представить разложением экспонентной функции $e^{-n_1 x}$ в ряд:

$$(1-x)^{n_1} \approx 1 - n_1 \cdot x + \frac{n_1^2}{1 \cdot 2} \cdot x^2 - \frac{n_1^3}{1 \cdot 2 \cdot 3} \cdot x^3 + \dots = e^{-n_1 x}, \tag{5}$$

в котором два первых (наибольших) слагаемых такие же, как и в разложении (4). Следовательно, с учетом определяющего влияния в разложении (4) величины $x = \varepsilon_i(y) = \frac{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot y}{B} \ll 1$ вероятностная функция $\Phi_j(y)$ принимает упрощенный вид:

$$\Phi_j(y) = e^{-n_1 x} = e^{-\frac{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot n_1 \cdot y}{B}}, \tag{6}$$

чрезвычайно удобный для выполнения расчетов параметров шероховатости поверхности при абразивной обработке.

Таким образом, научно обоснована возможность перехода от бинома Ньютона к экспонентной функции при расчете шероховатости обрабатываемой поверхности, что позволило существенно упростить расчеты без снижения их точности.

Необходимо отметить, что зависимость (6) справедлива для n_1 элементарных слоев рабочей поверхности абразивного инструмента, в которых содержится по одному абразивному зерну. Если в формировании шероховатости поверхности участвует в $j = n/n_1$ раз больше элементарных слоев, то в результате наложения всех этих элементарных слоев на плоскость обрабатываемого образца суммарная вероятностная функция $\Phi(y)$ аналитически опишется:

$$\Phi(y) = \prod_{j=n_1}^n \Phi_j(y) = e^{-j \cdot n_1 \cdot x} = e^{-\frac{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot n \cdot y}{B}}, \tag{7}$$

где n – суммарное количество абразивных зерен, участвующих в формировании шероховатости обрабатываемой поверхности.

Относительная полнота профиля абразивного инструмента, являющаяся противоположной функции $\Phi(y)$, выразится:

$$\varepsilon(y) = 1 - e^{-\frac{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot n \cdot y}{B}}. \tag{8}$$

График вероятностной функции $\varepsilon(y)$ показан на рис. 2. По физической сути $\varepsilon(y)$ соответствует стандартному параметру шероховатости поверхности – относительной опорной длине микропрофиля обрабатываемой поверхности, рассматривая координату y в противоположном направлении.

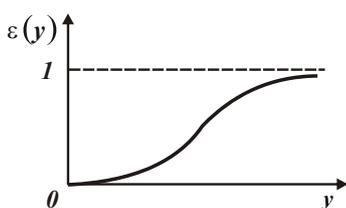


Рис. 2. График вероятностной функции $\varepsilon(y)$

Поскольку функции $\Phi(y)$ и $\varepsilon(y)$ являются вероятностными функциями распределения, изменяющимися в пределах $0 \dots 1$, то определить параметр шероховатости поверхности R_{max} (максимальную высоту микронеровностей на обрабатываемой поверхности) можно только с заданной степенью точности, например, для $\Phi(y) = \Phi_0 = 0,1; 0,05; 0,01$ и т. д. Тогда при условии

$$\Phi(y = R_{max}) = \Phi_0 \quad (9)$$

с учетом зависимости (7) и потенцирования зависимости (9) получено:

$$R_{max} = -\frac{\ln \Phi_0 \cdot B}{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot n} \quad (10)$$

Величина $\ln \Phi_0$ отрицательна (табл. 1). Поэтому параметр шероховатости поверхности R_{max} принимает положительные значения. Как видно, с уменьшением функции Φ_0 величина $-\ln \Phi_0$ увеличивается, однако не столь значительно по сравнению с уменьшением функции Φ_0 .

Таблица 1. Расчетные значения величины $-\ln \Phi_0$

Φ_0	0,15	0,1	0,01	0,001	0,0001	0,00001	0,000001
$1 - \Phi_0$	0,85	0,9	0,99	0,999	0,9999	0,99999	0,999999
$-\ln \Phi_0$	1,897	2,3	2,995	4,6	6,907	11,5	13,81

Результаты расчетов. Исходя из зависимости (10), основным условием уменьшения параметра шероховатости поверхности R_{max} является увеличение суммарного количества абразивных зерен n , участвующих в формировании шероховатости обрабатываемой поверхности. При внутреннем шлифовании (рис. 3,а): $n = k \cdot B \cdot V_{кр} \cdot \tau$, где k – поверхностная концентрация зерен, шт./м²; B – ширина шлифования, м; $V_{кр}$ – скорость вращения круга, м/с; $\tau = l / V_{дет}$ – время контакта фиксированного сечения обрабатываемой поверхности детали с шлифовальным кругом, с; l – длина дуги контакта круга с обрабатываемой поверхностью детали, м; $V_{дет}$ – скорость вращения детали, м/с. Тогда

$$n = k \cdot B \cdot l \cdot \frac{V_{кр}}{V_{дет}} \quad (11)$$

Как видно, увеличить n можно увеличением параметров l , $V_{кр}$ и уменьшением скорости вращения детали $V_{дет}$. Этим объясняется эффективность применения на практике на операциях плоского и круглого наружного шлифования схемы глубинного шлифования, характеризующейся увеличенными значениями длины дуги контакта круга с обрабатываемой поверхностью детали l и небольшими значениями скорости вращения детали $V_{дет} = 0,5 \dots 5$ м/мин, с точки зрения уменьшения шероховатости поверхности при одновременном увеличении производительности обработки.

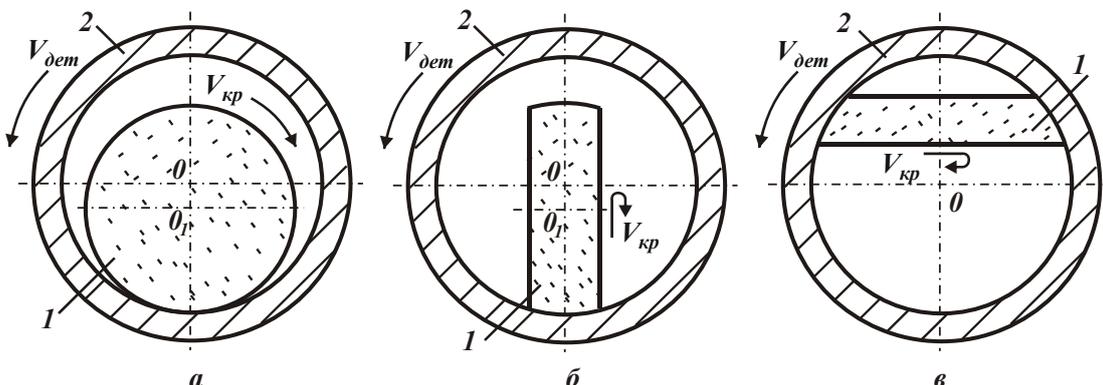


Рис. 3. Схемы шлифования отверстия при параллельном (а) и перпендикулярном (б, в) расположении осей вращения круга и детали.

В пределе параметр l равен длине окружности обрабатываемого отверстия $l = \pi \cdot d$, где d – диаметр обрабатываемого отверстия, м. Это имеет место при хонинговании отверстия. Следовательно, в этом случае параметр n принимает наибольшее значение, а параметр шероховатости поверхности R_{max} – в соответствии с зависимостью (10) – наименьшее значение, что указывает на эффективность применения метода хонингования отверстия по сравнению с внутренним шлифованием.

Заслуживает внимания схема шлифования внутренней поверхности кругом с осью вращения, перпендикулярной оси вращения обрабатываемой детали (рис. 3,б). При этом круг совершает прямолинейное движение вдоль обрабатываемого отверстия. Тогда

$$n = k \cdot B \cdot V_{кр} \cdot \tau = k \cdot B^2 \cdot \frac{V_{кр}}{V_{дет}}, \tag{12}$$

где $\tau = B / V_{дет}$.

Поскольку справедливо условие $l < B$, то, очевидно, использование данной схемы шлифования по сравнению с традиционной схемой внутреннего шлифования, показанной на рис. 3,а, позволяет увеличить суммарное количество абразивных зерен n , участвующих в формировании шероховатости обрабатываемой поверхности, а соответственно уменьшить параметр шероховатости поверхности R_{max} . Кроме того, при внутреннем шлифовании по традиционной схеме глубины внедрения абразивных зерен в обрабатываемый материал переменны и могут изменяться от нуля до глубины шлифования t , тогда как по предложенной схеме они одинаковы, а это фактически приводит к увеличению суммарного количества абразивных зерен n , участвующих в формировании шероховатости обрабатываемой поверхности, и соответственно уменьшению параметра шероховатости поверхности R_{max} . Следовательно, предлагаемая новая схема внутреннего шлифования обладает значительно большими технологическими возможностями с точки зрения уменьшения параметра шероховатости поверхности R_{max} при обработке отверстия.

Важным фактором увеличения суммарного количества абразивных зерен n , участвующих в формировании шероховатости обрабатываемой поверхности, для данной схемы шлифования является также увеличение ширины шлифования за счет осуществления контакта двух сторон периферии круга с обрабатываемой внутренней поверхностью детали (рис. 3,в). При этом наибольший эффект обработки достигается при шлифовании торцевой

поверхностью круга, имеющей форму окружности и обеспечивающей наибольшую площадь контакта с обрабатываемой внутренней поверхностью детали.

Следует отметить, что данная схема внутреннего шлифования впервые использована Брижан Т.М. при исследовании возможности уменьшения шероховатости поверхности при абразивной обработке отверстий в гидро- и пневмоцилиндрах. В результате удалось обеспечить требуемую шероховатость поверхности на уровне $Ra = 0,04$ мкм, чего не удавалось добиться другими методами абразивной обработки. Для осуществления предложенной схемы внутреннего шлифования отверстия необходимо обеспечить примерно одновысотное расположение абразивных зерен на рабочей поверхности круга, в противном случае в резании будут участвовать лишь наиболее выступающие зерна (т.е. небольшое количество зерен), что приведет к образованию отдельных рисок-царапин на обрабатываемой поверхности и не позволит добиться существенного уменьшения шероховатости поверхности. В связи с этим следует процесс шлифования производить, например, кругом с наклеенным на его рабочую поверхность слоем абразивных

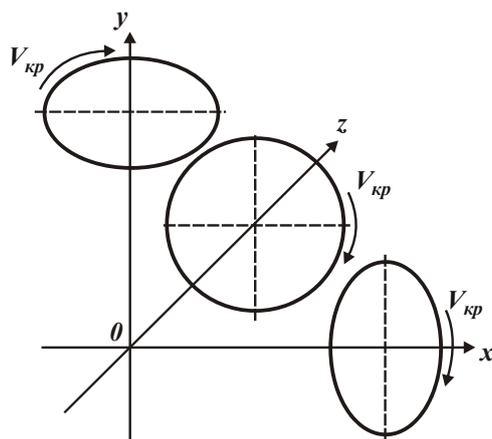


Рис. 4. Расположение круга при шлифовании отверстия в трехмерной системе координат

зерен, характеризующимся фактически одновысотным выступанием зерен.

При разновысотном расположении абразивных зерен на рабочей поверхности шлифовального круга функция $\Phi(y)$ выразится [6]:

$$\Phi(y) = e^{-\frac{2 \cdot \text{tg} \gamma \cdot n \cdot y^2}{B \cdot 2b}}, \tag{13}$$

где b – максимальная высота выступания вершин зерен над уровнем связки круга, м.

Зависимость (13) отличается от аналогичной зависимости (7) множителем $y / 2b$, который входит в показатель степени. Этот множитель всегда меньше единицы. Поэтому значение функции $\Phi(y)$, рассчитанное по зависимости (13) для заданного значения y , будет всегда большим. Это связано с уменьшением суммарного количества абразивных зерен n , участвующих в формировании шероховатости обрабатываемой поверхности, и соответственно с увеличением шероховатости поверхности.

При условии $y = b$ зависимости (7) и (13) упрощаются и принимают вид:

$$\Phi(y) = e^{-\frac{2 \cdot \text{tg} \gamma \cdot n \cdot b}{B}}; \tag{14}$$

$$\Phi(y) = e^{-\frac{2 \cdot \text{tg} \gamma \cdot n \cdot b}{B \cdot 2}}. \tag{15}$$

Полученные зависимости (14) и (15) отличаются друг от друга лишь постоянными множителями показатель степени, что связано с различным количеством абразивных зерен, участвующих в съеме металла и формировании шероховатости поверхности. Так, в первом случае, согласно зависимости (14), функция $\Phi(y=b)$ принимает наименьшие значения, а во втором случае, согласно зависимости (15), наибольшие значения. Следовательно, разновысотное расположение абразивных зерен на рабочей поверхности круга приводит к уменьшению количества абразивных зерен, участвующих в съеме металла и формировании шероховатости обрабатываемой поверхности. Однако данные закономерности справедливы при одинаковом значении безразмерной величины $\frac{2 \cdot \text{tg} \gamma \cdot n \cdot b}{B}$. В действительности, для рассмотренных выше случаев общее количество абразивных зерен n , участвующих в съеме металла и формировании шероховатости обрабатываемой поверхности, будет различным. Поэтому будут существенно отличаться значения функции $\Phi(y)$ и параметра шероховатости обрабатываемой поверхности R_{max} .

Рассмотренные в работе три схемы шлифования отверстия в детали, по сути, сводятся к осуществлению вращения круга вокруг трех координатных осей – x , y , z (рис. 4). Первая схема (рис. 3,а) осуществляется путем вращения круга вокруг оси z , вторая схема (рис. 3,б) – вокруг оси x , а третья схема (рис. 3,в) – вокруг оси y . На основе этих трех принципиальных схем шлифования отверстия можно предложить и другие схемы, являющиеся различными комбинациями данных схем.

Перспективы дальнейших исследований. Авторы считают перспективными направления исследований, связанные с разработкой эффективного технологического процесса шлифования отверстия кругом, расположенным перпендикулярно направлению вращения обрабатываемой детали. Это позволит существенно увеличить количество абразивных зерен, участвующих в формировании шероховатости поверхности, и добиться уменьшения шероховатости поверхности.

Выводы. В работе произведен расчет шероховатости поверхности при абразивной обработке на основе положений теории вероятностей. Проведен теоретический анализ закономерностей изменения шероховатости поверхности при шлифовании отверстия и установлено, что достигаемый уровень шероховатости поверхности вполне однозначно определяется суммарным количеством абразивных зерен, участвующих в формировании шероховатости обрабатываемой поверхности. Исходя из этого, обоснованы преимущества хонингования по сравнению с внутренним шлифованием. Показана возможность существенного уменьшения шероховатости поверхности при шлифовании кругом, ось которого расположена перпендикулярно оси вращения обрабатываемой детали. При этом наибольший эффект обработки достигается при шлифовании торцевой поверхностью круга, имеющей форму окружности и обеспечивающей наибольшую площадь контакта с обрабатываемой внутренней поверхностью детали.

Список литературы: 1. Алмазно-абразивная обработка материалов: справочник / Под ред. проф. А.Н. Резникова. – М.: Машиностроение, 1977. – 390 с. **2.** Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования / А.В. Якимов. – М.: Машиностроение, 1975. – 175 с. **3.** Евсеев Д. Г. Физические основы процесса шлифования / Д. Г. Евсеев, А. И. Сальников. – Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 1978. – 128 с. **4.** Королев А.В. Теоретико-вероятностные основы абразивной обработки / А.В. Королев, Ю.К. Новоселов. – Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 1989. – 320 с. **5.** Хусу А.П. Шероховатость поверхностей (теоретико-вероятностный подход) / А.П. Хусу, Ю.Р. Витенберг, В.А. Пальмов. – М. : Изд-во “Наука”, 1975. – 343 с. **6.** Новиков Ф.В. Исследования шероховатости поверхности при алмазно-абразивной обработке методами теории вероятности / Ф.В. Новиков, В.Г. Шкурупий // Вісник НТУ “ХПІ”. – Х. : НТУ “ХПІ”, 2004. – № 44. – С. 140–149. **7.** Вентцель Е.С. Теория вероятностей / Е.С. Вентцель. – М. : Наука, 1969. – 576 с.

Bibliography (transliterated): 1. Almazno-abrazivnaya obrabotka materialov: spravothnik / Pod red. prof. A.N. Reznikova. – M.: Mashinostroenie, 1977. – 390 s. **2.** Yakimov A.V. Optimizatsiya protsessy shlifovaniya / A.V. Yakimov. – M.: Mashinostroenie, 1975. – 175 s. **3.** Evseev D.G. Fizicheskie osnovy protsessy shlifovaniya / D.G. Evseev, A.I. Salnikov. – Saratov: Izd-vo Sarat. un-ta, 1978. – 128 s. **4.** Korolev A.V. Teoretiko-veroyatnostnye osnovy abrazivnoy obrabotki / A.V. Korolev, Y.K. Novoselov. – Saratov: Izd-vo Sarat. un-ta, 1989. – 320 s. **5.** Khusu A.P. Sherokhovatost poverkhnostey (teoretiko-veroyatnostnyi podkhod) / A.P. Khusu, Y.R. Vitenberg, V.A. Palmov. – M.: Nauka, 1975. – 343 s. **6.** Novikov F.V. Issledovaniya sherokhovatosti poverkhnosti pri almazno-abrazivnoy obrabotke metodami teorii veroyatnosti / F.V. Novikov, V.G. Shkurupiy // Visnyk NTU “KPI”. – Kh.: NTU “KPI”, 2004. – № 44. – S. 140–149. **7.** Venttsel E.S. Teoriya veroyatnostey / E.S. Venttsel. – M. : Nauka, 1969. – 576 s.

Поступила (received) 30.09.2015

Новиков Федор Васильевич – доктор технических наук, профессор, Харьковский национальный экономический университет имени С. Кузнеця; тел.: (067) 6890342; e-mail: fokusnic1@rambler.ru.

Novikov Fedor Vasilevith – doctor of technical sciences, professor, Kharkiv National Economic University named after S. Kuznets; tel.: (067) 6890342; e-mail: fokusnic1@rambler.ru.

Минчев Роман Михайлович - Харьковский национальный экономический университет; тел.: (067) 6890342; e-mail: fokusnic1@rambler.ru.

Minchev Roman Mikhaylovith - Kharkiv National Economic University named after S. Kuznets; tel.: (067) 6890342; e-mail: fokusnic1@rambler.ru.