

УДК 621.921.34–2:622.24.05

**Н. В. Новиков**, акад. НАН Украины; **Г. П. Богатырева**, докт. техн. наук;  
**Р. К. Богданов**, **Г. Д. Ильницкая**, **А. М. Исонкин**, **А. П. Загора**,  
**Г. Ф. Невструев**, кандидаты техн. наук; **О. В. Лещенко**, инж.

*Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев, Украина*

## **ВЛИЯНИЕ КАЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫСОКОПРОЧНЫХ АЛМАЗОВ НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ БУРОВОГО ИНСТРУМЕНТА**

*The results of operation of drilling bits are discussed and the effect of the uniformity of diamond powders in strength on the bit performance is considered. The performance characteristics of drilling bits are shown to increase if the bits are impregnated with diamond powders highly uniform in strength and with high thermostability.*

### **Введение**

Работоспособность любого алмазосодержащего инструмента в значительной мере определяется свойствами алмазов. Свойства алмазных порошков в свою очередь обуславливаются технологиями синтеза, извлечения, обработки, классификации по размерам и форме, сортировки по физико-химическим свойствам, обеспечивающими получение порошков с заданными свойствами.

Серийные алмазные порошки отечественного и зарубежного производства представляют собой совокупность зерен определенного размера, которые в значительной степени различаются по основным технологическим характеристикам качества. Как правило, величина той или иной качественной характеристики порошка (прочность, термостойкость, шероховатость и т.п.) является усредненной величиной по всему объему порошка. Известно, что в процессе синтеза образуются кристаллы различной формы, разной степени дефектности и, как следствие, разной прочности. Поэтому для получения алмазных порошков определенных марок нужна сортировка алмазов по прочности. Однако тесной зависимости прочности кристаллов от какого-либо одного свойства алмазов пока не обнаружено. Большинство исследователей считают, что прочность алмазов тесно связана со степенью совершенства структуры кристаллов, включая форму кристаллов и их изометричность, наличие и уровень внутри кристаллических и поверхностных дефектов. Очевидно, что эффективность сортировки алмазов по прочности тем выше, чем большее количество характеристик дефектности кристаллов будет положено в основу процессов сортировки.

В то же время многочисленными исследованиями установлено, что прочность хрупких кристаллов, в том числе и алмазов, в значительной степени зависит от степени дефектности поверхности. Представляется, что использование процессов разделения кристаллов по дефектности поверхности создает возможности дальнейшего совершенствования технологии сортировки алмазов с целью получения однородных по прочности шлифпорошков.

Однородность является важной характеристикой качества порошков сверхтвердых материалов, позволяющей объективно отражать состояние их качества. В настоящее время наблюдается тенденция повышения интереса к однородности порошков по различным технологическим характеристикам. В ИСМ НАН Украины разработано ряд нормативных документов [1–3], позволяющих оценивать однородность шлифпорошков по основным технологическим характеристикам качества и, прежде всего, по прочностным характеристикам. Проявляется тенденция более активного вовлечения этой характеристики в сферу практического использования. Это вызвано, прежде всего, необходимостью сравнительной оценки качества

порошков. Все актуальнее становится задача более дифференцированной градации шлифпорошков по этому параметру в условиях насыщенности рынка.

Развитие технологий получения шлифпорошков высокого качества ставит перед разработчиками инструмента новые задачи. Среди таких задач – разработка высокопроизводительного высокоэффективного бурового инструмента, позволяющего реализовать возможности концепции современных технологий получения шлифпорошков сверхтвердых материалов. Одним из методов решения этих задач – использование в инструменте шлифпорошков алмаза с высокими показателями однородности по определенным характеристикам. Ранее были выполнены исследования по разделению порошков алмаза марки АС80 зернистости 250/200 на ряд порошков и определению однородности зерен по прочности этих порошков [4]. Испытания буровых импрегнированных коронок, изготовленных с применением полученных после сортировки шлифпорошков алмаза марок АС65, АС80 и АС125 с высокой однородностью по прочности, показали увеличение стойкости коронок, оснащенных более прочными порошками.

В данной работе, по сравнению с предыдущей, диапазон исследований расширен. В качестве исходного материала для получения высокопрочных шлифпорошков алмаза однородных по прочности использованы алмазы марки АС200 зернистости 400/315 и 315/250.

### **Методика эксперимента и исходные материалы**

Методика эксперимента заключалась в следующем. Шлифпорошки алмазов двух зернистостей с помощью адгезионно-магнитной сортировки разделялись по дефектности поверхности на несколько продуктов [5, 6]. После разделения определялся выход этих продуктов. В полученных шлифпорошках определялись физико-механические характеристики в виде значений статической прочности ( $P$ ) [7, 8]. В порошках оценивалась дефектность поверхности по коэффициенту поверхностной активности ( $K_a$ ) [9]. Содержание объемных дефектов в зернах алмаза определялось по измеряемой величине удельной магнитной восприимчивости порошков ( $\chi$ ) [10]. Термостабильность оценивалась по коэффициенту термостабильности ( $K_{CT}$ ) [11]. Кроме того, определялся состав шлифпорошков по прочности единичных зерен и рассчитывались коэффициенты однородности по прочности ( $K_{одн пр}$ ) [1, 2].

### **Экспериментальные результаты и обсуждение**

В исходных и полученных после сортировки порошках на основании данных по измерению прочности единичных зерен определялся состав порошков по прочности, средневзвешенная прочность и рассчитывался коэффициент однородности по прочности по разработанной программе [2]. В качестве примера в табл. 1 представлен анализ порошка алмаза марки АС200 зернистости 400/315 по этим характеристикам. Из таблицы следует, что зерна шлифпорошка исходной марки АС200 400/315 со средневзвешенной прочностью 343,46 Н распределяются по прочности и маркам от АС65 до АС250. При этом однородность по прочности этого порошка составляет 14 %. В табл. 2 приведены результаты анализа состава порошка по прочности первого продукта сортировки. Как видно из таблицы, шлифпорошок алмаза со средневзвешенной прочностью 414, 2 Н, соответствующий марке АС250, имеет однородность по прочности 76 %.

Результаты разделения и исследования свойств шлифпорошков алмаза марки АС200 зернистостей 400/315 и 315/250 представлены соответственно в табл. 3 и табл. 4. Как видно, в результате сортировки получены шлифпорошки алмаза марок АС200 и АС250 с высокой однородностью по прочности.

Процесс адгезионно-магнитной сортировки обеспечивает разделение кристаллов алмазных порошков зернистости 400/315 на шесть продуктов, различающихся между собой по прочности, обусловленной различиями в степени поверхностной ( $K_a$ ) и объемной ( $\chi$ ) дефектности.

Так, с увеличением  $K_a$  в 4,6–6,0 раз и  $\chi$  в 8–5 раз, прочность снижается на 35 %, термопрочность на 78–64 %. Одновременно по мере снижения  $K_a$  наблюдается и уменьшение удельной магнитной восприимчивости от  $24,7 \cdot 10^{-8}$  м<sup>3</sup>/кг до  $3,2 \cdot 10^{-8}$  м<sup>3</sup>/кг, являющейся косвенной

характеристикой содержания объемных внутрикристаллических включений в зернах алмаза. Характеристики физико-механических свойств порошков алмаза в виде значений статической прочности ( $P$ , Н) как при комнатной температуре, так и после высокотемпературного воздействия при  $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$  в токе аргона порошков алмаза устойчиво снижаются от первого к шестому продукту. Эта же тенденция сохраняется и для коэффициента термостабильности алмазов. Следует отметить, что во всех полученных порошках коэффициент однородности по прочности увеличивается в 3,4–5,4 раза по сравнению с исходным порошком (рис. 1).

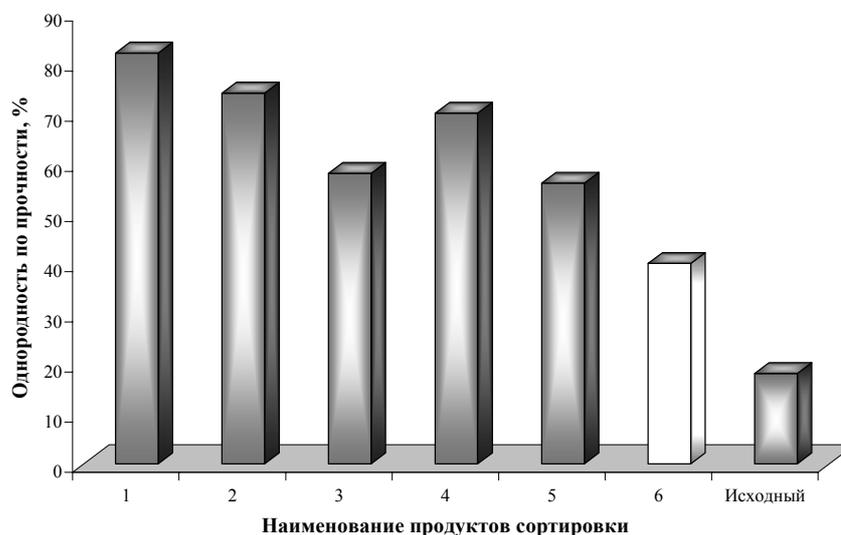


Рис. 1. Однородность по прочности высокопрочных шлифпорошков алмаза зернистостью 400/315: исходного и продуктов после адгезионно-магнитной сортировки.

Аналогичные результаты разделения шлифпорошков по дефектности поверхности получены при сортировке порошков алмаза зернистостью 315/250 (табл. 4). В результате сортировки все полученные продукты различной прочности от 349,4 Н до 259,0 Н обладают высокой однородностью по этому показателю.

На рис. 2 (кривая 1) графически проиллюстрирована зависимость прочности от поверхностной дефектности кристаллов шлифпорошков алмаза зернистостью 400/315. Отмечается устойчивая тенденция снижения прочности шлифпорошков по мере увеличения степени дефектности их поверхности. С увеличением удельной магнитной восприимчивости шлифпорошков алмаза их прочность снижается (кривая 2).

Анализ изменения свойств алмазных порошков зернистостью 400/315 и 315/250, полученных в процессе адгезионно-магнитной сортировки, показал, что разделение алмазных кристаллических частиц по дефектности поверхности сопровождается изменением основных характеристик алмазных порошков, таких как уровень объемных дефектов ( $\chi$ ) и прочностных характеристик. Полученные результаты подтверждают высказанное ранее предположение, что состояние поверхности кристаллов алмаза является одной из основных характеристик качества алмазного порошка.

Таблица 1. Результаты анализа порошка алмаза марки АС200 (исходного) зернистостью 400/315 по прочности

Марка	Прочность минимальная	Прочность максимальная	Количество зерен, %	Сумма ↑	Прочность ↑	Сумма ↓	Прочность ↓
АС65	102,00	125,00	2,00	100,00	343,46	2,00	113,50
АС80	125,00	156,00	4,00	98,00	348,15	6,00	131,50
АС100	156,00	195,00	8,00	94,00	356,99	14,00	156,64
АС125	195,00	249,00	10,00	86,00	373,87	24,00	183,88
АС160	249,00	310,00	14,00	76,00	393,86	38,00	219,11
АС200	310,00	390,00	14,00	62,00	419,68	52,00	254,35
АС250	390,00	490,00	48,00	48,00	440,00	100,00	343,46
Среднее значение прочности	343,46						
Однородность	14,0 %						

Таблица 2. Результаты анализа порошка алмаза продукта № 1 после адгезионно-магнитной сортировки зернистостью 400/315 по прочности

Марка	Прочность минимальная	Прочность максимальная	Количество зерен, %	Сумма ↑	Прочность ↑	Сумма ↓	Прочность ↓
АС125	195,00	249,00	2,00	100,00	414,20	2,00	222,00
АС160	249,00	310,00	8,00	98,00	418,12	10,00	268,00
АС200	310,00	390,00	12,00	90,00	430,44	22,00	312,73
АС250	390,00	490,00	76,00	78,00	442,82	98,00	411,43
АС300	490,00	610,00	2,00	2,00	550,00	100,00	414,20
Среднее значение прочности	414,20						
Однородность	76,0 %						

Таблица 3. Результаты адгезионно-магнитной сортировки высокопрочных (особопрочных) алмазов зернистостью 400/315

Продукты разделения	Выход, %	Характеристики шлифпорошков алмаза						
		$\chi \cdot 10^{-8}$ , м <sup>3</sup> /кг	K <sub>a</sub> , %	P, Н	P <sub>ГО</sub> , Н	K <sub>одн пр</sub> %	K <sub>СТ</sub> , у.е.	Марка
1	8,8	3,2	0,05	414,2	393,5	76	0,95	АС250
2	16,2	9,3	0,09	375,4	352,9	70	0,94	АС200
3	23,5	10,2	0,12	358,0	304,3	64	0,85	АС200
4	29,9	14,5	0,15	342,3	277,3	56	0,81	АС200
5	17,2	17,3	0,19	325,8	260,6	65	0,80	АС200
6	4,4	24,7	0,23	305,5	220,0	48	0,72	АС160
Исходный	100,0	17,9	–	343,5	281,7	14	0,82	АС200

Таблица 4. Результаты адгезионно-магнитной сортировки высокопрочных (особопрочных) алмазов зернистостью 300/250

Продукты разделения	Выход, %	Характеристики шлифпорошков алмаза						
		$\chi \cdot 10^{-8}$ , м <sup>3</sup> /кг	K <sub>a</sub> , %	P, Н	P <sub>ГО</sub> , Н	K <sub>одн пр</sub> %	K <sub>СТ</sub> , у.е.	Марка
1	2,0	1,6	0,04	349,4	335,4	82	0,96	АС250
2	11,2	3,5	0,10	336,1	319,3	74	0,95	АС250
3	30,6	4,9	0,14	312,4	281,2	58	0,90	АС200
4	33,5	6,6	0,16	288,4	248,0	70	0,86	АС200
5	10,7	7,2	0,20	276,0	234,6	56	0,85	АС200
6	12,0	7,9	0,25	259,0	204,6	40	0,79	АС200
Исходный	100,0	7,6	–	291,1	244,5	18	0,84	АС200

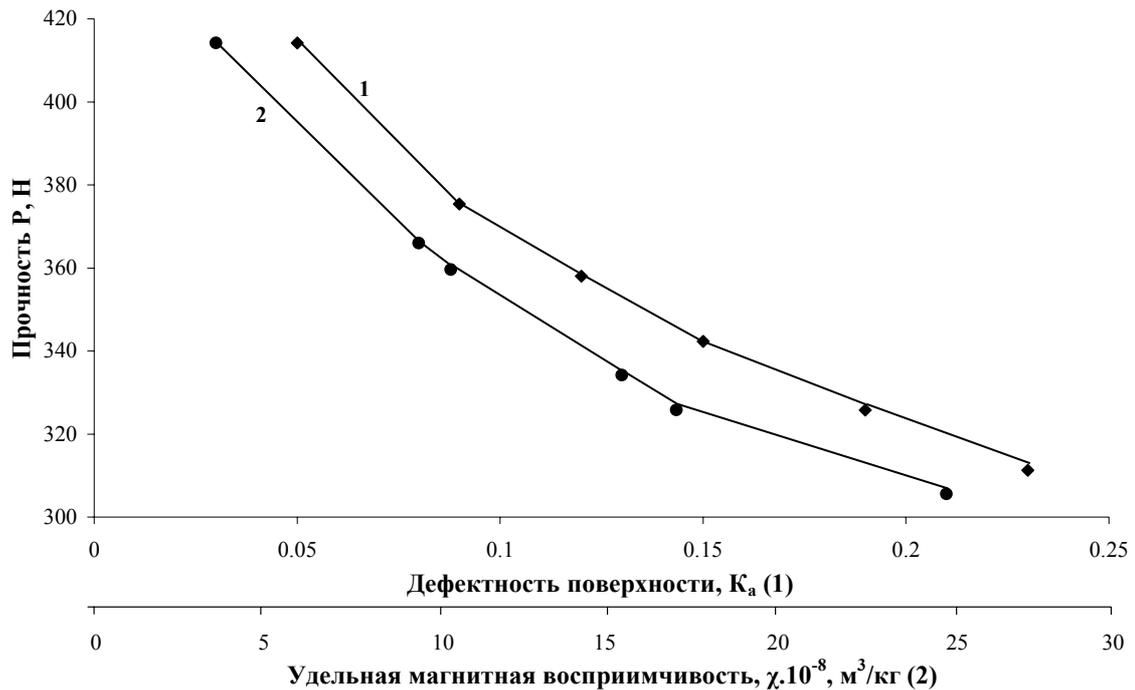


Рис. 2. Зависимость прочности от дефектности поверхности кристаллов (1) и удельной магнитной восприимчивости (2) высокопрочных шлифпорошков алмаза зернистостью 400/315.

Результаты лабораторных исследований бурения гранита импрегнированными коронками, изготовленными из различных по прочности и зернистости шлифпорошков, полученных после сортировки алмазов, представлены в табл. 5 и 6.

Как видим, с увеличением прочности шлифпорошков алмаза обеих зернистостей работоспособность бурового инструмента повышается. Так, с увеличением прочности алмазов мощность (N), затрачиваемая на разрушение породы, уменьшается. В свою очередь объемная работа разрушения породы ( $A_{об}$ ) с увеличением прочности алмазов также уменьшается, что свидетельствует о наличии более эффективного процесса разрушения породы таким инструментом. Такая же зависимость наблюдается и на усилиях резания породы ( $P_z$ ). Анализируя представленные результаты, можно отметить, что показатели работы бурового инструмента, изготовленного с использованием исходных шлифпорошков алмаза обеих зернистостей марки АС200, незначительно превышают показатели работы инструмента, оснащенного шлифпорошками алмаза низкопрочного (шестого) продукта сортировки с прочностью, соответствующей марке АС160 для зернистости 400/315 или АС200 на нижней границе интервала прочности для зернистости 315/250. При этом эксплуатационные характеристики буровых коронок, оснащенных высокопрочными порошками алмаза с высокой однородностью по прочности, по всем показателям на 20–30 % выше по сравнению с показателями работы бурового инструмента, оснащенного исходными высокопрочными порошками алмаза с однородностью по прочности на уровне 18–14 %.

Таблица 5. Результаты лабораторных испытаний буровых коронок, оснащенных алмазными шлифпорошками зернистостью 400/315 после адгезионно-магнитной сортировки

Технологические характеристики шлифпорошков			Эксплуатационные характеристики						
Марка	P, Н	K <sub>одн</sub> пр %	Частота вращения, мин <sup>-1</sup>	Углубление, мкм/об					
				40			60		
				Мощность, N, кВт	Объемная работа, A <sub>об</sub> , кДж/см <sup>3</sup>	Усилие, P <sub>z</sub> , Н	Мощность, N, кВт	Объемная работа, A <sub>об</sub> , кДж/см <sup>3</sup>	Усилие, P <sub>z</sub> , Н
АС200 исх.	343,5	14	750	0,49	1,54	431	1,74	2,74	1526
АС160	305,5	48		0,66	2,07	581	2,34	3,68	2057
АС200	325,8	65		0,54	1,70	476	1,92	3,03	1685
АС200	375,4	70		0,45	1,41	397	1,60	2,51	1405
АС250	414,2	76		0,38	1,19	335	1,35	2,12	1186
АС200 исх.	343,5	14	1180	0,57	1,17	324	1,93	1,98	1105
АС160	305,5	48		0,77	1,57	437	2,60	2,65	1490
АС200	325,8	65		0,64	1,29	358	2,16	2,18	1221
АС200	375,4	70		0,53	1,07	298	1,79	1,81	1016
АС250	414,2	76		0,45	0,90	252	1,55	1,52	859

Таблица 6. Результаты лабораторных испытаний буровых коронок, оснащенных алмазными шлифпорошками зернистостью 315/250 после адгезионно-магнитной сортировки

Технологические характеристики шлифпорошков			Эксплуатационные характеристики						
Марка	P, Н	K <sub>одн</sub> пр %	Частота вращения, мин <sup>-1</sup>	Углубление, мкм/об					
				40			60		
				Мощность, N, кВт	Объемная работа, A <sub>об</sub> , кДж/см <sup>3</sup>	Усилие, P <sub>z</sub> , Н	Мощность, N, кВт	Объемная работа, A <sub>об</sub> , кДж/см <sup>3</sup>	Усилие, P <sub>z</sub> , Н
АС200 исх.	291,1	18	750	0,48	1,51	432	1,30	2,01	1200
АС200	259,0	40		0,51	1,60	450	1,38	2,12	1251
АС200	312,4	58		0,44	1,38	388	1,19	1,84	1080
АС250	349,4	82		0,41	1,29	362	1,11	1,78	1018
АС200 исх.	291,1	18	1180	0,56	1,12	494	1,75	1,75	1542
АС200	259,0	40		0,60	1,19	530	1,87	1,86	1654
АС200	312,4	58		0,51	1,02	452	1,59	1,59	1410
АС250	349,4	82		0,48	0,96	434	1,50	1,50	1354

### Выводы

1. В результате адгезионно-магнитной сортировки высокопрочных порошков АС200 получены порошки алмаза, различающиеся между собой по степени дефектности их поверхности и, соответственно по прочности. Во всех полученных порошках коэффициент однородности по прочности увеличивается в 2,2–5,4 раза по сравнению с исходными порошками.

2. Показатели бурения гранита коронками, оснащенными шлифпорошками алмаза с высокой однородностью по прочности (более 50 %), полученными в результате сортировки, на 20–30 % превосходят аналогичные показатели работы бурового инструмента, оснащенного исходными порошками.

### Литература

1. Новиков Н. В., Невструев Г. Ф., Ильницкая Г. Д. и др. Оценка качества порошков сверхтвердых материалов. – Ч. 1. – Теоретические основы метода оценки характеристик качества // Сверхтв. материалы. – 2006. – № 5. – С. 74–83. – Ч. 2. – Практическое применение нового метода оценки характеристик качества // Сверхтв. материалы. – 2006. – № 6. – С. 58–67.
2. СТП 090.042–00. Метод определения коэффициента однородности шлифпорошков из синтетических алмазов по показателю статической прочности. Стандарт предприятия. – Впервые; Введ. 01.05.2000. – К.: ИСМ НАН Украины, 2000. – 9 с.
3. Новиков Н. В., Богатырева Г. П., Никитин Ю. И., Петасюк Г. А. Методика определения показателей однородности синтетических алмазных порошков на основе системно-критериального подхода / Инструментальний світ. – К.: 2006. – № 3 (31). – С. 4–6.
4. Новиков Н. В., Богатырева Г. П., Богданов Р. К., Невструев Г. Ф., Загора А. П., Ильницкая Г. Д., Исонкин А. М. Однородные термопрочные алмазные шлифпорошки для бурового импрегнированного инструмента // Сверхтв. материалы. – 2003. – № 4. – С. 73–80.
5. Ильницкая Г. Д., Богатырева Г. П., Невструев Г. Ф. Получение высококачественных алмазных шлифпорошков // Синтез, спекание и свойства сверхтвердых материалов: Сб. науч. тр. – К.: ИСМ НАН Украины, 2005. – С. 63–71.
6. Декларацийний пат. 20031211734 України, 69948 А, МКИ В 24 D 3/00. Шліфувальний порошок і спосіб його одержання / М. В. Новіков, Г. П. Богатирьова, Г. Ф. Невструев, Г. Д. Ільницька. – Заявл. 16.12.2003, Опубл. 15.09.2004, Бюл. № 9.
7. ДСТУ 3292–95. Порошки алмазные синтетические. Общие технические условия. Введ. 01.01.96. – К.: Госстандарт Украины, 1995. – 71 с.
8. ТУ У 28.4–05417344–2003. Шлифпорошки синтетических алмазов марок АС200, АС250, АС300, АС350, АС400. Технические условия. Введ. 01.09.03. – К.: Госстандарт Украины, 2003. – 10 с.
9. Пат. 65129 А України, МКИ G01N27/12. Спосіб оцінки дефектності зерен порошкового матеріалу / Г. Ф. Невструев, Г. Д. Ільницька. – № 2003065196; Заявл. 05.06.2003, Опубл. 15.03.2004, Бюл. № 3.
10. М88 Украины 90.256–2004. Методика определения удельной магнитной восприимчивости порошков сверхтвердых материалов (СТМ). – К.: ИСМ НАН Украины, 2004. – 9 с.
11. Новиков Н. В., Богатырева Г. П., Богданов Р. К., Невструев Г. Ф., Ильницкая Г. Д. Оценка однородности высокопрочных алмазных шлифпорошков по статической прочности и термостойкости // Материалы 3-й Междунар. КНФ. – Породоразрушающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения. – К.: ИСМ НАН Украины. – 2000. – С.17–18.

*Поступила 05.07.07.*