

УДК 622.24.05: 621.921.34-419

**А. П. Загора, Е. П. Виноградова**, кандидаты технических наук;  
**А. А. Шульженко**, чл.-корр. НАН Украины; **В. Г. Гаргин, А. Н. Соколов**, кандидаты  
технических наук; **Е. А. Загора**

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

## **ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ ТВЕРДЫХ ГОРНЫХ ПОРОД БУРОВЫМИ КОРОНКАМИ, ОСНАЩЕННЫМИ СИНТЕТИЧЕСКИМИ АЛМАЗАМИ И ВСТАВКАМИ АПКМ+**

*Целью данной работы была оценка эффективности разрушения твердых горных пород буровыми коронками с алмазосодержащей комбинированной матрицей, объемный слой которой оснащен синтетическими алмазами и вставками из АПКМ+, а также влияния оснащения комбинированной матрицы на энергоемкость процесса разрушения горной породы путем изучения размера шлама, образовавшегося при бурении. Применение породоразрушающих вставок из АПКМ+ в буровых коронках с алмазосодержащей комбинированной матрицей приводит к повышению шероховатости микропрофиля поверхности забоя скважины от 1,26 до 1,46 раз, снижению износа комбинированной матрицы коронки по высоте в 2,1 раза благодаря высокой износостойкости материала АПКМ+ и повышению средней механической скорости бурения в 1,25 раза. Благодаря высокой износостойкости материала АПКМ+ обеспечивается преимущественное выступание породоразрушающей вставки над телом алмазосодержащей матрицы, позволяющее поддерживать в процессе бурения соответствующий вылет алмазов и способствуя высокоэффективной работе коронки в целом при низкой энергоемкости процесса бурения.*

**Ключевые слова:** *буровая коронка, синтетические алмазы, алмазосодержащая комбинированная матрица, породоразрушающая вставка, эффективность разрушения горных пород, износостойкость, шероховатость микропрофиля забоя, энергоемкость разрушения горной породы*

Алмазные поликристаллические сверхтвердые материалы нашли широкое применение в качестве рабочих элементов в буровом инструменте. В Институте сверхтвердых материалов НАН Украины (ИСМ) разработан целый ряд бурового инструмента из синтетических монокристаллических алмазов типа БС, который в породах IX – XI категорий превосходит по работоспособности импрегнированный инструмент типа 02ИЗ из природных алмазов. Наряду с этим, в ИСМ ведутся работы по повышению работоспособности бурового инструмента не только за счет новых конструктивных его особенностей, но также и за счет комбинированного оснащения его синтетическими алмазами и поликристаллическими материалами на его основе. Так, на основе вставок из алмазного композиционного термостойкого материала (АКТМ) для бурения скважин в породах средней твердости были созданы буровые коронки БТ19 резцового типа, а для пород более высокой категории – импрегнированные буровые коронки с комбинированной матрицей БТ20 [1].

В Институте сверхтвердых материалов Украины выполнен комплекс исследований по изучению влияния вставок композиционных алмазосодержащих материалов на работоспособность буровых импрегнированных коронок [2–3], однако детального исследования эффективности разрушения ими горных пород не было. В данном случае под эффективностью разрушения горных пород принимаем сочетание высокой механической скорости бурения инструментом с максимальной шероховатостью микропрофиля забоя

скважины [4] при одновременном снижении энергоемкости. В ИСМ разработана технология получения нового алмазного поликристаллического композиционного материала АПКМ+ с помощью активированного НРНТ-спекания алмазных порошков с добавкой *n*-слоя графена марки N002- PDR, не содержащего свободного кремния и обладающего высокой прочностью и износостойкостью [5].

**Цель настоящей работы** – оценить эффективность разрушения твердых горных пород буровыми коронками с алмазосодержащей комбинированной матрицей, объемный слой которой оснащен синтетическими алмазами (СА) и вставками из АПКМ+, а также влияние оснащения комбинированной матрицы на энергоемкость процесса разрушения горной породы путем изучения размера шлама, образовавшегося при бурении.

#### **Материалы и методы исследований**

Для проведения исследований были изготовлены два образца опытных коронок типа БТ22 диаметром 76 мм и различным оснащением объемного слоя рабочего торца комбинированной алмазосодержащей матрицы (рис.1):



Рис. 1. Опытные буровые коронки типа БТ22

– в центральной части сектора (через 2 сектора) устанавливали вставку АКММ Ø 3,5 мм и высотой 4 мм (№ 1);

– в центральной части сектора (через 2 сектора) устанавливали вставку из АПКМ+ Ø 3,5 мм и высотой 4 мм (№ 2).

Для оснащения объемного слоя применяли синтетические алмазы марки АС160Т зернистостью 400/315 мкм.

Сравнительные испытания проводили на специальном буровом стенде, представляющем собой модернизированный радиально-сверлильный станок модели 2Н58 с двигателем

основного привода мощностью 13 кВт, дополнительно оснащенный гидравлической системой подачи и системой промывки скважины. Износ коронок по высоте измеряли после бурения специальным приспособлением – измерительной стойкой с индикаторной головкой DIGICO10, позволяющей производить измерения с точностью до 1 мкм.

Фиксируемые параметры: осевая нагрузка – с точностью до 50 даН; мощность потребляемой энергии – с точностью до 0,1 кВт; углубка при бурении – с точностью до 1 мм; продолжительность бурения – с точностью до 0,1 с.

В качестве горной породы для испытания износостойкости комбинированной матрицы буровых коронок выбрали коростышевский гранит X категории по буримости.

Режимы бурения коронками были выбраны близкими к используемым на практике, а именно: частота вращения – 500 мин<sup>-1</sup>; осевая нагрузка – 1250 даН. Проходка для каждого образца коронки – 1,2 м.

Параллельно с изучением износостойкости комбинированной матрицы буровых коронок проводилась оценка эффективности разрушения твердой горной породы по

разработанной в ИСМ методике изучения микропрофиля поверхности забоя, сформированного при алмазном бурении [6].

Все основные и дополнительные высотные параметры шероховатости микропрофиля поверхности забоя, а также статистические параметры профиля рассчитывали согласно ГОСТ 2789-82.

Результаты исследования износостойкости комбинированной матрицы, параметров шероховатости микропрофиля поверхности забоя и средней механической скорости бурения опытными коронками приведены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты исследования износостойкости комбинированной матрицы, шероховатости микропрофиля поверхности забоя и средней механической скорости опытными коронками

№ коронки	Вариант оснащения рабочего торца комбинированной матрицы коронки	$R_a$ , мкм	$R_z$ , мкм	$R_{max}$ , мкм	$S_m$ , мкм	$V_{ср.мех}$ , м/ч	Износ матрицы по высоте $\Delta h_{ср}$ , мкм
1	Со вставками АКТМ	1,977	6,599	11,277	503,64	2,4	25
2	Со вставками АПКМ+	2,860	8,345	16,488	750,30	3,0	12

Анализируя представленные в табл. 1 данные, отметим, что использование породоразрушающих вставок из АПКМ+ (№ 2) в комбинированной матрице буровой коронки способствует повышению параметров шероховатости микропрофиля поверхности забоя по сравнению с использованием вставок из АКТМ (№1) от 1,26 до 1,46 раз и снижению износа комбинированной матрицы коронки по высоте в 2,1 раза. При этом средняя механическая скорость бурения коронками, оснащенными вставками из АПКМ+ (№ 2) ( $V_{мех} = 3,0$  м/ч), превышала аналогичный показатель у коронок, оснащенных вставками АКТМ № 1 ( $V_{мех} = 2,4$  м/ч) в 1,25 раза, что свидетельствует о повышении эффективности разрушающей способности буровой коронки, оснащенной вставками из АПКМ+, по сравнению с буровой коронкой, оснащенной вставками АКТМ.

На следующем этапе исследований с помощью микроскопа Ломо Метам Р-1, оснащенного ССD видеокамерой Digital КОСОМ, согласно методике [7], изучали состояние поверхности рабочего торца сектора комбинированной матрицы коронок после бурения (рис. 2) и проводили детальный анализ шлама.

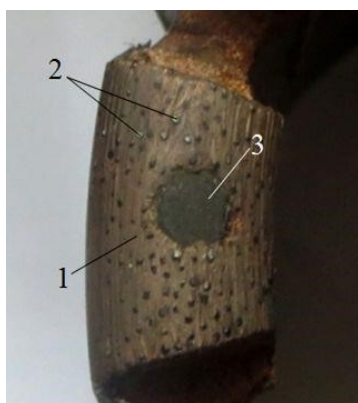


Рис. 2. Общий вид рабочего торца комбинированной матрицы: 1 – материал матрицы, 2 – алмазные зерна, 3 – породоразрушающая вставка

В таблице 2 представлены результаты замера высоты выступания породоразрушающей вставки над уровнем матрицы секторов экспериментальных буровых коронок.

Таблица 2. Высота выступания породоразрушающей вставки над уровнем матрицы секторов экспериментальных буровых коронок

Название части сектора буровой коронки	Выступание вставки над матрицей, мкм	
	Коронка со вставками АПКМ+	Коронка со вставками АКТМ
Задняя	40	-200
Передняя	100	-100
Кернообразующая	300	200
Скважинообразующая	300	100

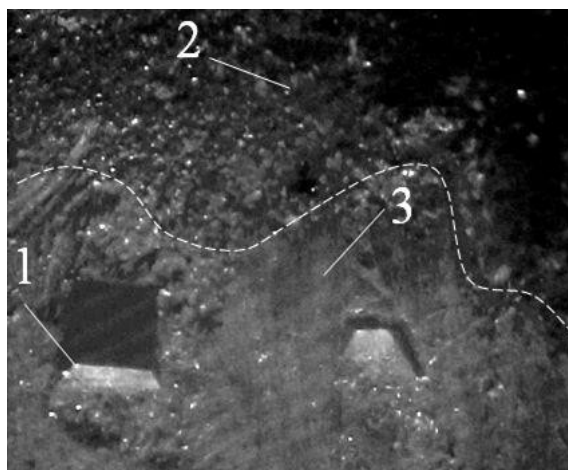


Рис. 3. Набегающая часть сектора коронки с комбинированной матрицей в зоне соприкосновения с породоразрушающей вставкой АПКМ+: 1 – вершина алмазного зерна, 2 – рабочая поверхность вставки, 3 – поверхность матрицы

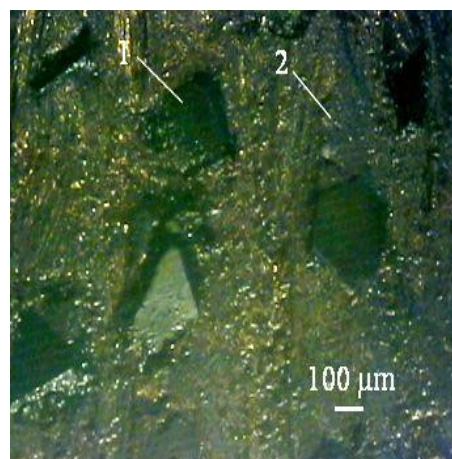


Рис. 4. Рабочая поверхность коронки: 1 – алмазное зерно, 2 – матрица

Совпадающие уровни вершины алмаза 1 и высоты подавляющей части рабочей поверхности породоразрушающей вставки из АПКМ+ 2 в секторе комбинированной матрицы коронки и превышающие высоту матрицы на 100 мкм представлен на рис. 3. Непосредственно в зоне соприкосновения фронтальной части породоразрушающей вставки из АПКМ+ с матрицей уровни их высот выравниваются, поэтому граница соприкосновения зрительно не воспринимается (на рис. 3 показана пунктиром). Затем измеряли высоту выступания (вылет) над матрицей выборочно определенных 30 зерен СА, находящихся в плоскостях, наиболее приближенных к плоскости рабочей поверхности породоразрушающих вставок во всех секторах каждой экспериментальной буровой коронки (рис.4).

Графики изменения количества исследуемых алмазов  $n$  (шт.) в зависимости от их высоты выступания  $b$  (мкм) из матрицы экспериментальных буровых коронок представлены на рис.5.

Максимальное количество алмазных зерен на рабочей поверхности комбинированной матрицы коронки со вставками АПКМ+ имеет вылет 100 мкм, тогда как соответствующая

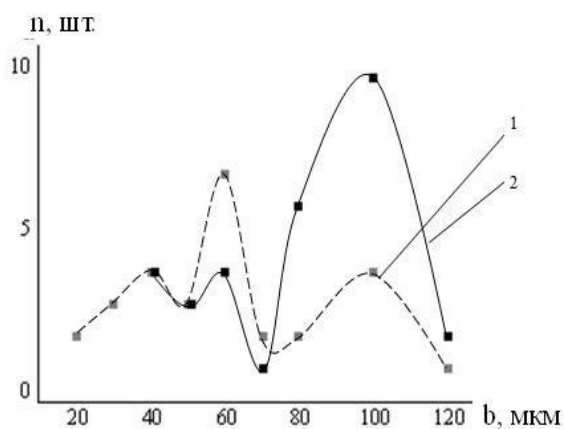


Рис. 5. Высота выступания алмазных зерен из матрицы: 1 – коронка, оснащенная вставками АКМ, 2 – коронка, оснащенная вставками АПКМ+

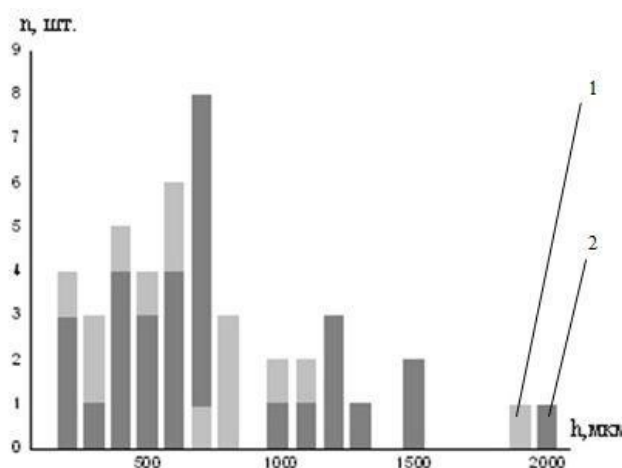


Рис. 6. Сравнительное распределение толщины частиц шлама, полученного в результате обработки коронок: 1 – со вставками АКМ; 2 – со вставками АПКМ+

величина, касающаяся коронки со вставками АКМ составляет 60 мкм. Небольшое количество алмазных зерен с высоким вылетом алмазов (80–120 мкм) в коронке со вставками АКМ создает менее эффективные условия работы бурового инструмента по сравнению с условиями работы коронкой со вставками АПКМ+.

Высокий процент алмазных зерен с вылетом 100 мкм и выше в коронке со вставками АПКМ+, а также преимущественное выступание вставки над телом матрицы (при этом уровни вставок и вершин алмазных зерен совпадают), позволяют удерживать соответствующий вылет алмазов благодаря высокой износостойкости материала породоразрушающей вставки из АПКМ+. Это, в свою очередь, способствует высокоэффективной работе коронки в целом, которая работает в более комфортном режиме, чем коронка со вставками АКМ.

В процессе исследований был проведен анализ шлама, отделившегося при разрушении породы в процессе бурения коронками с различным оснащением комбинированной матрицы. Определяли основной размер частиц шлама коростышевского гранита – их толщину  $h$ .

Согласно методике [8], с целью обнаружения высокогабаритных частиц,

мелкогабаритные частицы (от 0 до 199 мкм) во внимание не принимались.

Частотограмма изменения количества частиц шлама  $n$  (шт.), в зависимости от их толщины  $h$  (мкм), полученных при бурения коронками с различным оснащением комбинированной матрицы, представлена на рис. 6.

Анализируя приведенную частотограмму (рис. 6.), следует обратить внимание на более широкий диапазон толщины  $h$  частиц шлама, полученного в результате отработки коронкой со вставками АПКМ+, а также количество частиц смодальной толщиной (700 мкм), полученной той же коронкой по сравнению с количеством частиц соответствующей толщины (600 мкм), полученных коронкой со вставками АКТМ.

Общее количество высокогабаритных частиц шлама толщиной 1000, 1100 мкм и более, полученного в результате отработки коронкой со вставками АКТМ, уступает количеству частиц, полученных в результате отработки коронкой со вставками АПКМ+ (5 против 9 шт.). Приведенные данные позволяют сделать вывод о том, что менее энергоемким является процесс бурения коронкой, оснащенной вставками АПКМ+.

### Выводы

1. Применение породоразрушающих вставок из АПКМ+ в буровых коронках с комбинированной алмазосодержащей матрицей приводит к повышению шероховатости микропрофиля поверхности забоя скважины от 1,26 до 1,46 раз и снижению износа комбинированной матрицы коронки по высоте в 2,1 раза благодаря высокой износостойкости материала АПКМ+.

2. Средняя механическая скорость бурения коронками, оснащенными вставками из АПКМ+, превышает в 1,25 раза аналогичный показатель у коронок, оснащенных вставками АКТМ.

3. Благодаря высокой износостойкости материала породоразрушающей вставки АПКМ+ обеспечивается преимущественное выступание вставки над телом алмазосодержащей матрицы, позволяющее поддерживать в процессе бурения соответствующий вылет алмазов и способствуя высокоэффективной работе коронки в целом.

4. Бурение коронкой с комбинированной алмазосодержащей матрицей, оснащенной вставками из АПКМ+ является менее энергоемким и более эффективным по сравнению с работой аналогичной коронкой, оснащенной вставками из АКТМ, т.к. сопровождается отделением от разрушаемого блока твердой горной породы более крупных частиц шлама (700 мкм и более).

*Метою даної роботи була оцінка ефективності руйнування твердих гірських порід буровими коронками з алмазовмісною комбінованої матрицею, об'ємний шар якої оснащений синтетичними алмазами і вставками з АПКМ+, а також впливу оснащення комбінованої матриці на енергоємність процесу руйнування гірської породи шляхом вивчення розміру шламу, що утворився при бурінні. Застосування породоруйнівних вставок з АПКМ+ в бурових коронках з алмазовмісною комбінованої матрицею призводить до підвищення шорсткості мікропрофілю поверхні вибою свердловини від 1,26 до 1,46 разів, зниження зносу комбінованої матриці коронки по висоті в 2,1 рази завдяки високій зносостійкості матеріалу АПКМ+ і підвищенню середньої механічної швидкості буріння в 1,25 рази. Завдяки високій зносостійкості матеріалу АПКМ+ забезпечується переважний виступ породоруйнівної вставки над тілом алмазовмісної матриці, що дозволяє підтримувати в процесі буріння відповідний виліт алмазів і сприяє високоефективній роботі коронки в цілому при низькій енергоємності процесу буріння.*

**Ключові слова:** бурова коронка, синтетичні алмази, алмазовмісна комбінована матриця, породоруйнівна вставка, ефективність руйнування гірських порід, зносостійкість, шорсткість мікропрофілю вибою, енергоємність руйнування гірської породи

A. P. Zakora, O. P. Vynohradova, A. A. Shul'zhenko, V. G. Gargin,  
A. N. Sokolov, I. A. Zakora

**EVALUATION OF EFFICIENCY OF DESTRUCTION OF SOLID ROCKS BY DRILLING  
CROWNS, EQUIPPED WITH SYNTHETIC DIAMONDS AND INSERTIONS DPCM+**

*The purpose of this work was to evaluate the effectiveness of fracture of solid rock by drill bits with a diamond-containing combined matrix, the volume layer of which is equipped with synthetic diamonds and inserts from DPCM+, as well as the effect of equipping the combined matrix on the energy intensity of the rock destruction process by studying the size of the sludge formed during drilling. The use of rock-cutting inserts from DPCM+ in drill bits with a combined diamond-containing matrix results in an increase in the roughness of the microfilm of the bottomhole surface from 1,26 to 1,46, reducing the wear of the combined matrix of the crown by a factor of 2,1 due to the high wear resistance of the DPCM+ material and an increase in the average mechanical drilling speed to 1,25. Due to the high wear resistance of the DPCM+ material, the protrusion of the rock insertion insert over the body of the diamond-containing matrix is provided, which allows to maintain during the drilling the corresponding outflow of diamonds and contributing to the high efficiency of the crown as a whole with low energy consumption of the drilling process.*

**Key words:** *drill bit, synthetic diamonds, diamond-bearing composite matrix, rock-breaking insert, rock destruction efficiency, wear resistance, roughness of the face microfilm, energy intensity of rock destruction*

**Литература**

1. Богданов Р. К., Загора А. П., Исонкин А. М. и др. Поликристаллический материал на основе алмаза в инструменте для бурения скважин в твердых породах // Науковий вісник НГУ, Дніпропетровськ, 2006, № 11.–С.13–16.
2. Загора А. П. Влияние вставки твесала, размещенной в торце матрицы импрегнированной коронки, на процесс разрушения горных пород //Синтетические сверхтвердые материалы в буровом инструменте /Сб. науч. тр. – К.: Изд-во ИСМ АН УССР, 1988, – С. 65–70.
3. Богданов Р. К., Шульженко А. А., Загора А. П. и др. Новый сверхтвердый материал в буровом инструменте // Сверхтвердые материалы. – 2007. - № 1. – С. 73–82.
4. Загора А. П., Богданов Р. К., Исонкин А. М. и др. Оценка эффективности разрушения горных пород алмазными поликристаллическими композиционными материалами при бурении// Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения /Сб. науч. тр. – Вып. 11, – Киев: ИСМ им. В.Н. Бакуля, 2008, –С. 79–84.
5. Шульженко А. А., Яворска Л., Соколов А. Н. и др. Новый износостойкий сверхтвердый алмазный композиционный поликристаллический материал // Сверхтвердые материалы. – 2018. – № 1. – С. 3–11.
6. Соловьев Н. В., Чихоткин В. Ф., Богданов Р. К., Загора А. П. Ресурсосберегающая технология алмазного бурения в сложных геологических условиях: моногр. – М.: ВНИИОЭНГ, 1997. – 332 с.
7. Виноградова О. П. Характер взаємного руйнування гірської породи та алмазного породоруйнівного інструменту // Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва / Науково-виробничий журнал – Вип.16(2), – Кременчук: КрНУ, 2015, С.49–57.
8. Виноградова О. П. Руйнування гірських порід інструментом з функціональними елементами із композиційних алмазовмісних матеріалів: дис. робота на здобуття вченого ступеня канд. техн. наук: 05.15.09– Київ, 2015.–195 с.

*Поступила 04.07.18*

## References

1. Bogdanov, R. K., Zakora, A. P., Isonkin, A. M., et al. (2006). Polikristallicheskiy material na osnove almaza v instrumente dlia bureniia skvazhin v tverdykh porodakh [Polycrystalline material based on diamond in a tool for drilling wells in hard rocks]. *Naukovyi visnyk NGU. – Scientific bulletin of NMU, Dnipropetrovsk, 11*, 13–16 [in Russian].
2. Zakora, A. P. (1988). Vliianie vstavki tvesala, razmeshchennoi v tortse matritsy impregnirovannoikoronki, na protsess razrusheniia gornykh porod [Influence of the insert of a weaver located at the end of the matrix of the impregnated crown on the process of destruction of rocks]. *Sinteticheskie sverkhтвердые материалы v burovom instrumente. – Synthetic superhard materials in a drilling tool*, 65–70 [in Russian].
3. Bogdanov, R. K., Shulzhenko, A. A., Zakora, A. P., et al. (2007). Novyi sverkhтвердый material v burovom instrumente [New superhard material in a drilling tool]. *Sverkhтвердые материалы. – Superhard materials, 1*, 73– 82 [in Russian].
4. Bogdanov, R. K., Zakora, A. P., Isonkin, A. M., et al. (2008). Otsenka effektivnosti razrusheniia gornykh porod almaznymi polikristallicheskimi kompozitsionnymi materialami pri burenii [Estimation of the efficiency of rocks destruction with diamond polycrystalline composite materials during drilling]. *Porodorazrushaiushchii i metalloobrabatyvaiushchii instrument – tekhnika i tekhnologiya ego izgotovleniia i primeneniia – Rock Destruction and Metal-Working Tools – Techniques and Technology of the Tool Production and Applications, 11*, 79–84. [in Russian].
5. Shulzhenko, A. A., Jaworska, L., Sokolov, A. N., et al. (2018). Novyi iznosostoykiy sverkhтвердый almaznyi kompozitsionnyi polikristallicheskiy material [New wear-resistant superhard diamond composite polycrystalline material]. *Sverkhтвердые материалы. – Journal of Superhard Materials, 1*, 3– 11 [in Russian].
6. Soloviev, N. V., Chikhotkin, V. F., Bogdanov, R. K., & Zakora, A. P. (1997). *Resursosberegaiushchaia tekhnologiya almaznogo bureniia v slozhnykh geologicheskikh usloviakh [Resource-saving technology of diamond drilling in difficult geological conditions]*. Moscow: VNIIOENG [in Russian].
7. Vynohradova, O. P. (2015). Harakter vzaemnogo ruinovannia girskoi porody ta almaznogo porodoruinivnogo instrumentu [The character of the mutual breaking of rocks and a diamond rock destruction tool]. *Suchasni resursoenerhozberihaiuchi tekhnologii hirnychogo vyrobnytstva. – Up-to-date resource- and energy- saving technologies in mining industry. - Scientific and production journal: Mykhaylo Ostrogradsky Kremenchuk National University. - Kremenchuk: KrnU, 16 (2)*, 49–57 [in Ukrainian].
8. Vynohradova, O. P. (2015). Ruinovannia girskykh porid instrumentom z funktsionalnymi elementami iz kompozytsiinykh almazovmisnykh materialiv [Destruction of rocks by the tool with functional elements from composite diamond-bearing materials]. *Candidate's thesis*. Kyiv [in Ukrainian].