

**В.В. ПРОЦИВ**, д-р техн. наук,

**С.Т. ПАЦЕРА**, канд. техн. наук,

**А.Ю. ЖУРАВЕЛЬ**

(Украина, Днепр, НТУ «Днепровская политехника»),

**А.Г. НЕДЕЛЬСКИЙ**, канд. техн. наук

(Украина, Желтые Воды)

## **ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ ПРИ ОТРАБОТКЕ СЛОЖНО-СТРУКТУРНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ ПОДЗЕМНЫМ СПОСОБОМ**

*Введение.* Ядерная энергетика Украины, которая использует в качестве энергоносителя уран, является одной из важнейших отраслей экономики страны, вырабатывающей свыше 50% всей электроэнергии для нужд народного хозяйства и обеспечивает энергобезопасность страны.

Государственное предприятие ВостГок осуществляет добычу урановой руды, ее переработку по заводской технологии, превращая в концентрат природного урана.

Отрабатываемые месторождения урановых руд залегают на глубинах от 300 м и ниже и представлены различными горно-геологическими характеристиками, включающими рудные залежи мощностью от 15÷20 м до 40÷70 м, углом падения от 5° до 90°.

Крепость руд и вмещающих пород по шкале проф. М.М. Протодяконова составляет  $\varphi=12\div 20$ . На урановых рудниках применяются камерные системы разработки (подэтажных штреков и ортов).

Рудоносность рудных залежей может резко изменяться друг от друга из-за включения в них пустых пород, что в свою очередь создает сложности в их отработки и резко ухудшает технико-экономические и стоимостные показатели в целом, отражающимися на цене и конкурентоспособности конечного продукта.

Поэтому проблема повышения содержания металла в добытой товарной руде является актуальной и требует своего решения.

*Целью работы* является определение факторов и возможностей повышения качества минерального сырья при отработки сложноструктурных урановых месторождений подземным способом в пределах выемочного участка: заходка, панель.

Для достижения поставленной цели в данной работе использовались следующие *методы исследований*:

1) аналитические методы на основе изучения, обобщения научно-технической информации по данному вопросу;

2) теоретические исследования, основанные на закономерностях разрушения горных пород.

3) опытно-промышленные исследования в производственных условиях

## **Загальні питання технологій збагачення**

действующего предприятия.

*Результаты и материалы исследования.* На рудниках, где ведётся добыча радиоактивных руд, для определения рудоносности и оконтуривания рудной залежи применяются радиометрические методы контроля. Для этих целей бурят контрольные веера скважин из подэтажных выработок, по которым по определённой методике рассчитываются нормативы потерь и разубоживания по очистному блоку, а в дальнейшем такую же работу проводят по всем веерам скважин при системе разработки подэтажных штреков (ортов).

Полученная таким образом информация с помощью радиометрических методов является завершённой при определении контуров рудных тел и количеством пустых пород, содержащихся в отбываемом объёме. Причём информация, полученная по рудоносности на ранних стадиях разведочного бурения (контрольные веера скважин) может служить основанием для перехода с камерной системы разработки на другую систему разработки, например, слоевую.

Применение слоевой системы разработки с мощной буровой и погрузочно-доставочной техники обеспечивает добычу руды с гораздо низкими показателями потерь и разубоживания, а, следовательно, и более низкой себестоимостью конечной продукции.

Опыт зарубежных рудников, перешедших с камерных систем разработки на слоевую систему разработки наглядное этому подтверждение.

Положительный опыт применения слоевых систем разработки при добыче ценных руд накоплен на шахте Фунтана Рамоса (Италия), рудник Керритен (Финляндия), рудник CSA (Австрия), рудник Грейхон (Канада), рудник Ларгентер (Франция).

Наилучшим примером может служить опыт компании «Болиден» (Швеция), внедрившая слоевую систему разработки на 13 полиметаллических рудниках, снизивших потери и разубоживание в таблице 1. Распределение разубоживания и потерь руды по применяемым системам разработки [1] и получившую прибыль от реализации своей продукции в размере 66%.

Успех компании основан на снижении как стоимости добычи, так и обогащения и отнесения этих затрат по минимуму на единицу извлекаемого металла, а не на тонну руды [1].

*Таблица 1*

Системы разработки	Разубоживание пород, %	Потери руды, %
Блоковое обрушение	16-35	15-27
Камерно-столбовая	3	30
Восходящие слои с твердеющей закладкой	5-16	5-16

Отечественный опыт отработки слоевой системой разработки получен при эксплуатации блока 39 – 49 залежи 2Б – 2В Мичуринского месторождения Ингульского рудника пониженной рудоносностью (0,60÷0,65) на первом слое. Руды, межрудные породные прослойки весьма устойчивые, имеют коэффициент

крепости по шкале проф. М.М. Протодьяконова  $\varphi=12\div 16$ , вмещающее породы (мигматиты, гнейсы, сиениты, альбититы) тоже крепкие  $\varphi=12\div 16$  и устойчивые.

Выемку запасов производили горизонтальными заходками шириной 3,4–4 м первой и второй очереди и высотой 3 м. Запасы следующего слоя отрабатывали панелями шириной 8–9 м, максимальный пролет панели составлял 20 м, переход самоходного оборудования с одного слоя на другой осуществляли по наклонному съезду, который проходят под углом  $10\text{--}12^\circ$  вблизи слоя (рудного тела) по пустой породе, а при большой протяженности рудного тела и его угла наклона до  $16^\circ$  по руде. Рудную массу доставляют до рудоспуска, который выходит на откаточный горизонт, высота слоя выбирается в зависимости от крепости руд и вмещающих пород и может изменяться от 3 до 7,5 – 8,0 м. При высоте слоя более 4 м необходимо дополнительное средство для оборки кровли заходок (панелей).

По результатам проведения опытно-промышленных работ по испытанию системы разработки горизонтальными слоями с твердеющей закладкой и самоходным оборудованием были сделаны следующие выводы [1]:

- система может быть рекомендована для отработки рудных тел сложной конфигурации с коэффициентом рудоносности 0,7 и ниже при работе без РОФ, и с коэффициентом 0,6 и ниже с РОФ;

- для горно-геологических условий блока 39-49 (рудоносность ниже 0,65-0,6) при этой системе разубоживание составляло 11,5%, потери 5,2%, в целом по шахте при системе поэтажных ортов (штреков) на это время разубоживание и потери соответственно равны 24% и 3,5%;

- наиболее рациональным вариантом слоевой системы в условиях Мичуринского месторождения является отработка слоев панелями (участками) шириной 8 м;

- панельный вариант в сравнении с заходками позволил поднять производительность труда в бригаде в  $1,35\div 1,5$  раза и довести до  $8,8\text{--}9,4$  м<sup>3</sup>/чел.см., а производительность по слою до 2000 м<sup>3</sup> в месяц;

- дальнейший рост производительности труда (более 10 м<sup>3</sup>/чел.см.) может быть достигнут за счёт повышения надёжности и технической производительности самоходного оборудования;

- система горизонтальных слоев с закладкой требует четкой организации труда, связанной с эксплуатацией и обеспечением фронта работ для самоходных машин, планомерной подготовки и нарезкой слоя и рудоспусков, своевременным строительством закладочных перемычек и заполнением пустот.

Вместе с тем отработка месторождений камерными системами разработки, представленных системами поэтажных штреков (ортов) обеспечивают более высокую производительность очистного блока, достигающие до 5– 10 тыс.м<sup>3</sup> горной массы в месяц, но с показателями разубоживания и потерь соответственно равным в среднем  $28\div 30\%$  и  $3,5\div 5,3\%$ , что явно снижают качественные показатели руды и повышают стоимость переработки её в дальнейшей технологической линии как на РОФ, так и на ГМЗ (горно–металлургический завод).

При этом также увеличиваются как транспортные расходы доставки части пустой породы в руде (разубоживание), так и повышаются энергетические затраты по всей технологической цепочки вплоть до получения готового концентрата урана на ГМЗ.

Для достижения высокого качества добываемой урановой руды на действующих урановых рудниках созданы специальные службы из числа геолого-геофизических и маркшейдерских специалистов, контролирующих уровень потерь и разубоживания на всех стадиях процесса добычи руды. Но даже при жёстком выполнении своих инструкций при отработке месторождений камерными системами разработки подэтажных штреков (ортов) наблюдается высокий уровень потерь и разубоживания, что естественно требует разработки определённых технических решений снижающих уровень потерь и разубоживание на основании проведения комплекса научно-исследовательских работ на всех стадиях процесса добычи руды.

Исходя из изложенного, учитывая низкое содержание урана в руде, высокую себестоимость получения конечного продукта, её конкурентоспособности на мировом рынке урана одним из путей решения данной проблемы в пределах подземного рудника является переход на слоевую систему отработки месторождений с применением высокопроизводительного как бурового, так и самоходного оборудования.

Решение части проблем, касающейся применения высокопроизводительного бурового и самоходного оборудования при селективной выемки урановых месторождений представлены в работе [2].

Для отработки селективных рудных залежей рекомендованы следующие комплексы самоходной буровой и погрузочно-доставочной техники:

– для Центрального месторождения Ингульского рудника буровая каретка Boomer и погрузочно-доставочной машины TORO-400Ec электрическим приводом;

– для Ватутинского месторождения Смолинского рудника буровая каретка Boomer H252 и погрузочно-транспортная машина типа TORO-006 или TORO-301 с автономным дизельным приводом или буровой станок BoomerL2D (фирмы Atlas Copco) и погрузочно-доставочная машина ST710 фирмы Atlas Copco Wagner 1 пс.

Заявленная высокопроизводительная буровая погрузочно-доставочная техника с набором высокоэффективных методов управления качеством дробления крепких трудно взрывааемых руд, наработанных ранее схем организации проходческих работ, позволит сократить существенный разрыв в производительности очистной единицы в 2-3 раза и соответственно в стоимости работ на данном участке по сравнению с применением систем разработки подэтажных штреков (ортов).

Успех высокопроизводительной техники объясняется не только параметрами систем самой буровой техники (перфоратор, податчик, стреломанипулятор, гидравлическая система, воздушная система, водяная система,

шасси, электрическая система), но и применением высококачественной буровой коронки, позволяющей в полной мере реализовать все преимущества этой системы на контакте буровая коронка – забой шпура.

Доказательством ведущей роли буровой коронки на фоне непосредственно буровой установки является тот факт, например, что применение этой импортной буровой коронки на буровой установке с пневмоприводом увеличилась скорость бурения шпуров в 1,5-2 раза, увеличилась скорость проходки, производительность труда возросла в 1,5 раза в условиях Запорожского железорудного комбината [2].

Это обстоятельство подтверждает тот факт, что даже применяя буровую установку с пневмоприводом эксплуатирующуюся длительное время, но с новой импортной буровой коронкой, может на 30-40% улучшить технико-экономические показатели на проходке горных выработок и снизить стоимостные затраты на 1 п.м. выработки.

Другим доказательством ведущей роли буровой коронки является тот факт насколько эффективно изготовлена буровая коронка на примере испытаний буровых коронок в условиях комбината «Печенганикель» ОАО «Кольская ГМК»трёх изготовителей: 1) «Mitsubishi material corporation» (ММС); 2) «Робит»; 3) «Стальтрест» Россия.

Бурение велось коронками диаметром 43 мм по диабазам средней трещиноватости коэффициентом крепости по шкале проф. М.М. Протодьяконова  $\varphi=16\div 18$ .

Время бурения 10 шпуров по 3,7 м составило: коронкой «ММС» – 30 минут, коронкой «Робит» – 46 минут, коронкой «Стальтрест» – 48 минут. Бурение шпуров велось одной и той же буровой установкой Boomer-282 [3].

Проводя анализ исследований [2, 3] следует отметить некоторые особенности:

1) Потенциальный запас всех параметров действующих буровых установок (с пневмоприводом, гидроприводом), включающих усилие подачи, крутящий момент, число ударов, число оборотов и т.д. намного превышает возможности действующих характеристик буровых коронок соответствовать высоким параметрам буровых установок (в технической литературе о таком факте сведений не обнаружено), что в свою очередь предопределяет поиск технических решений, направленных на создание новых, более совершенных буровых коронок для такого паритета.

2) При использовании буровых коронок, представленных разными производителями, в одних и тех же горно-геологических условиях, при одном и том же буровом оборудовании и их параметров, скорость бурения шпуров зависит не столько и не только от этих параметров, но и от качества этих коронок, и тех технологических решений и технологий на основе новейших достижений в науке и технике (известных только фирме производителю), которые они применили при создании новой буровой коронки и способные конкурировать как на внутреннем, так и мировом рынке бурового оборудования.

Недооценка ведущей роли буровой коронки в технологическом процессе бурения шпуров при проходке горных выработок, низкое их качества, отсутствие финансирования на государственном уровне создания высокоэффективных буровых коронок приводит к значительному удорожанию конечной продукции всей горнодобывающей промышленности Украины.

Одним из материалов, наиболее убедительно раскрывающих эту тему о направлениях и возможностях применения высококачественных буровых коронок в технологических процессах добычи полезных ископаемых изложена в материале [4].

Не менее важная роль высококачественной буровой коронки при отработке слоевой системой рудной залежи кроме высоких скоростей бурения шпуров, повышения производительности труда на проходке горных выработок буровая коронка рассматривается как фактор, влияющий на объем шпуров для размещения в них взрывчатых веществ, служащих для отделения руды от горного массива. А это, в свою очередь, позволяет регулировать качество дробления руды через удельный расход взрывчатых веществ на  $1 \text{ м}^3$  отбитой руды путём определённых способов взрывания. Например, при увеличении удельного расхода взрывчатых веществ (в крепких монолитных породах с коэффициентом крепости по шкале проф. М.М. Протодяконова  $\varphi=12\div 20$ ) с  $2,3 \text{ кг/м}^3$  до  $2,7 \text{ кг/м}^3$  средний размер куска снизился  $d_{\text{ср}}=15 \text{ см}$  до  $d_{\text{ср}}=10 \text{ см}$  [5], что хорошо согласуется не только с содержанием урана от среднего диаметра куса раздробленной взрывом руды в гранитах рис.1 [5], но и с процентным извлечением урана в зависимости также от среднего диаметра куса рис.2 [5].

Как видно из рисунка рис.1 содержание полезного компонента по фракциям  $+200 \text{ мм}$  в  $2\div 3$  раза меньше, чем в классе  $0\div 100 \text{ мм}$ . Это обстоятельство имеет важное практическое значение, так как удельный вес потерь полезного компонента в негабаритах оказывается незначительным, хотя и степень их проработки выщелачиваемыми растворами является минимальной. Поэтому потери в них полезного компонента не будут заметно ухудшать показатели полноты выщелачивания металла, следовательно, процессу рудоподготовки рудной массы необходимо уделять не только должное внимание, но и разрабатывать определённые технические решения, позволяющие снизить себестоимость конечной продукции.

Процессом рудоподготовки горной массы включающие отбойку, дробление и измельчение предназначенных для обогащения занимают ряд ведущих научных организаций в Украине и за её пределами. Идею объединения в одну систему рудоподготовки: «взрыв – дробление – измельчение (самоизмельчение)» выдвинул известный учёный проф., д.т.н. Баранов Е.Г. (ДГУ), в результате которой, как он утверждает, весь процесс рудоподготовки по фактическим энергозатратам рассматриваемой системе «взрыв – дробление – измельчение» как бы сдвинуть вправо, т.е. в сторону дробления и измельчения материала механическими средствами, которые, требуют огромных финансовых ресурсов. Проф. д.т.н. Баранов Е.Г. предлагает основную задачу технологической стадии

«средние и мелкое дробление», а возможно, и стадии «измельчение» (при шаровых мельницах) частично перенести на стадию «взрывное разрушение», т.е. сдвинуть систему энергозатрат влево. Перед взрывным разрушением в этом случае следует поставить задачу максимального увеличения выхода материала готового класса, при одновременном повышении удельных энергозатрат взрыва до 35÷40% от общих затрат на дробление [6].

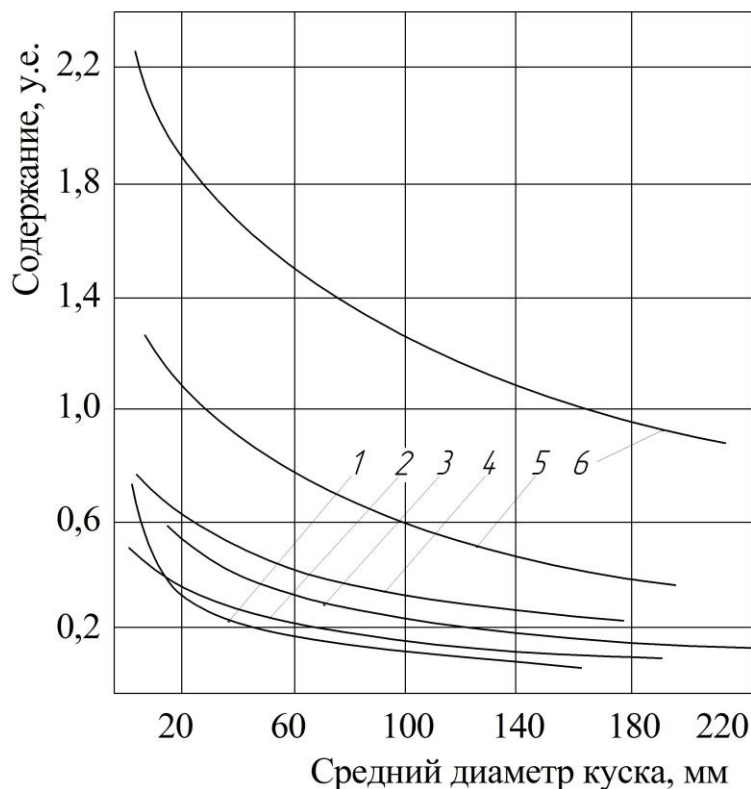


Рис. 1. Залежність вмістів корисних компонентів на різних родовищах від середнього діаметра роздробленої взривом руди:  
 1,6 – фельзити; 2 – граніти; 3 – аргилліти;  
 4 – трахідацити; 5 – фельзити-порфіти

Реалізація цієї ідеї за счёт определённых методов управления энергией взрыва для получения качественного дробления крепких крупноблочных массивов была осуществлена в условиях Смолинского, Ингульского рудника, шахты «Новая «ВостГОКа» рис. 3 [7].

В работе [7] определены размеры зон мелкого дробления и размеры зон трещинообразования (табл.2 Размеры зон мелкого дробления, табл.3 Размеры зон трещинообразования) шпуровых зарядов для различных горных пород, которые могут служить основой при составлении паспортов буровзрывных работ и получении надёжного качества дробления руды машинных классов и эффективной её переработки в дальнейшей технологической линии с учётом опыта управления качеством дробления различными техническими решениями ведения взрывных работ.

Таким образом, прослеживается конкретная и обоснованная логическая

## Загальні питання технологій збагачення

схема применения слоевой системы разработки на участке заходка, панель подземного рудника, направленная на снижение потерь и разубоживания товарной руды, и снижения себестоимости конечной продукции.

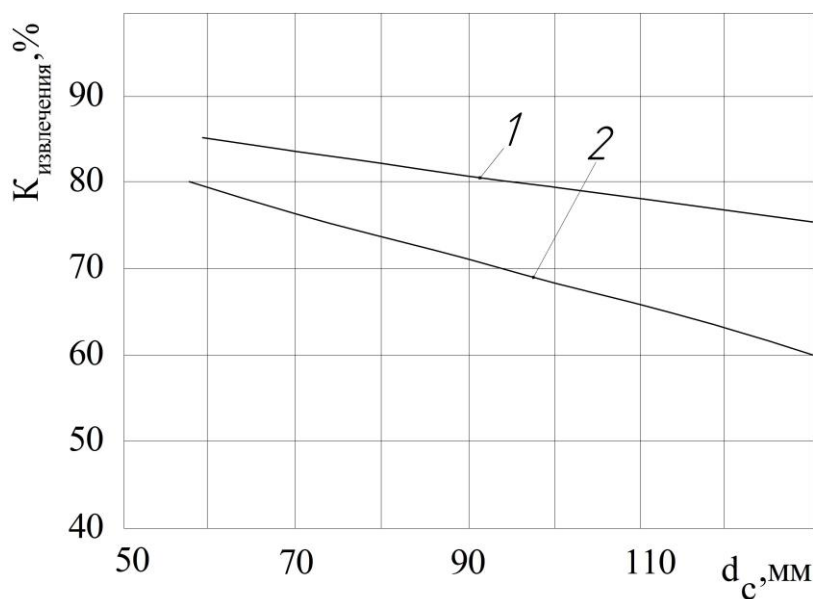


Рис. 2. Зависимость извлечения полезных компонентов от средневзвешенного диаметра выщелачиваемых кусков взорванной горно-рудной массы:

- 1 – при фактическом распределении полезных компонентов по гранулометрическим классам крупности;
- 2 – при условно-равномерном распределении полезных компонентов по классам крупности

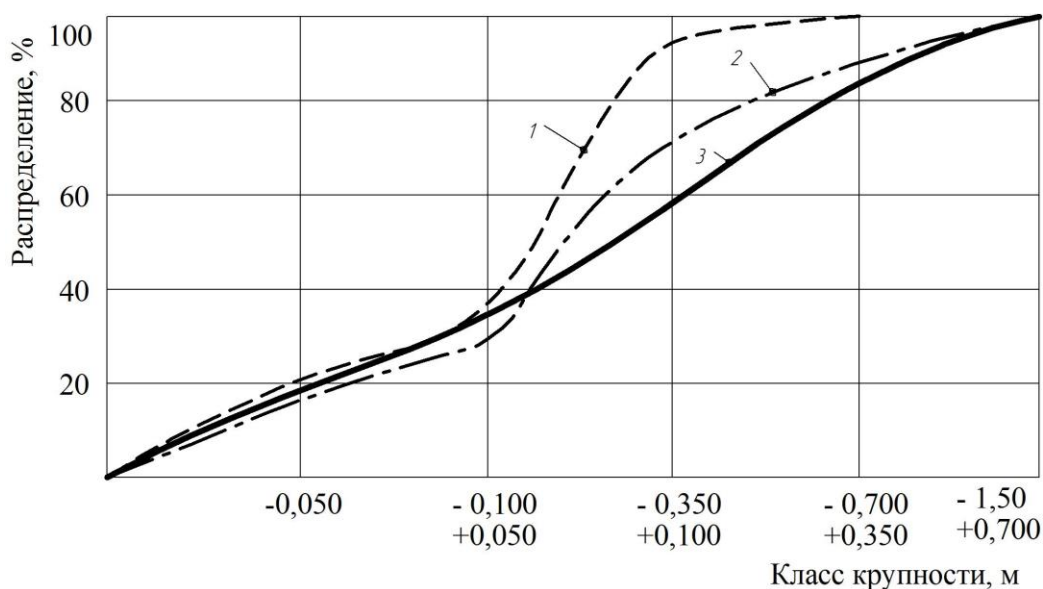


Рис. 3. Грансостав отбитой горной массы при разных способах отбойки:

- 1 – требуемый по СТП 2203-80;
- 2 – при групповом КЗВ;
- 3 – при иницировании одного веера на одну степень замедления



## **Загальні питання технологій збагачення**

История успеха начинается с применения мощной буровой техники с использованием высокоэффективной буровой коронки, создающей условия для успешного внедрения апробированных паспортов буровзрывных работ и достижения максимальной производительности выемочного участка заходка, панель.

В свою очередь, паспорта буровзрывных работ обеспечат гранулометрический состав отбиваемой горной массы машинного класса для дальнейшей её переработки на РОФ, а, следовательно, и снижение стоимости её переработки.

*Таблица 2*

Тип пород	Тип ВВ	Диаметр зоны мелкого дробления, мм			
		эксперим. значения, мм	среднее эксперим. значения, мм	теоретич. расчит. значение, мм	среднее теоретич. расчит. значение, мм
Альбититы	Ам. 6ЖВ	176	173,3	192	190,5
		174		186	
		171		195	
		172		189	
Мигматиты	Ам. 6ЖВ	179	180	213	203,7
		184		201	
		176		204	
		181		197	
Гнейсы	Ам. 6ЖВ	203	205	226	220,7
		207		216	
		204		219	
		206		222	

*Таблица 3*

Тип пород	Тип ВВ	Диаметр зоны трещинообразования, мм			
		эксперим. значения, мм	среднее эксперим. значения, мм	теоретич. расчит. значение, мм	среднее теоретич. расчит. значение, мм
Альбититы	Ам. 6ЖВ	370	375	412	409
		373		399	
		379		419	
		381		406	
Мигматиты	Ам. 6ЖВ	346	350	322	329
		353		315	
		355		336	
		349		340	
Гнейсы	Ам. 6ЖВ	409	402	377	360
		398		360	
		406		376	
		396		364	

Учитывая все вышеизложенное можно сделать следующие выводы.

### *Выводы*

1. Применяемая на рудниках ВостГОКа системы разработки подэтажных штреков (ортов) характеризуются высокой производительностью, но вместе с тем имеют существенный недостаток – высокое разубоживание. Данное обстоятельство весьма влияет на себестоимость продукции и делает ее слабо конкурентной на мировом рынке урана.

2. Для повышения конкурентоспособности конечной продукции на мировом рынке урана необходимо разработать Программу широкомасштабных научно-исследовательских работ на всей технологической линии, начиная от выемочной единицы (заходка, панель) подземного рудника до переработки её на горно-металлургическом заводе.

3. Первым этапом научно-исследовательских работ должны быть исследования на выемочной единицы (заходка, панель) при применении слоевой системы разработки, где в основном формируется потери и разубоживание.

4. В связи с применением слоевой системы разработки приотработки сложно-структурных месторождений урана необходимо переходить на мощную буровую и доставочную технику, способную реализовать результаты апробированных параметров буровзрывных работ и управления качеством дробления, гранулометрический состав которого отвечает требованиям СТП-2203-80 и максимальному содержанию металла по классам крупности.

5. Для реализации потенциальных возможностей новой буровой техники при отработки урановых руд слоевыми системами разработки необходимо создать новую отечественную высокоэффективную буровую коронку на основе новейших достижений в области науки и техники, которая сыграет решающую роль в снижении стоимости конечного продукта и может быть конкурентоспособным буровым инструментом как на внутреннем, так и мировом рынке буровой техники.

6. Под научно-техническими достижениями в области науки и техники в данном материале понимается анализ, выбор, обоснование таких технических решений, которые лягут в основу разработки конструкторско-технологических параметров деталей (например, буровой коронки) и технологических процессов, отвечающим требованиям по качественным, ценовым и экологическим показателям.

7. На основании опыта работы специальной службы контроля за уровнем потерь и разубоживания необходимо внести изменения в должностную инструкцию о расширении обязанностей персонально по контролю результатов научно-исследовательских работ на всех их стадиях выполнения начиная от выемочной единицы (заходка, панель) подземного рудника до переработки добытой руды на РОФ.

8. Внедрение результатов научно-исследовательских работ в производство позволит значительно повысить качество добываемой товарной урановой руды, поднять производительность труда, и технико-экономические показатели на всех стадиях добычи, что приведёт к существенному снижению себестоимости уранового концентрата и возможности его конкурировать на мировом рынке урана.

### Список літератури

1. А.Х. Дудченко, А.Г. Недельский, Ю.Я. Савельев и др. Совершенствование технологий подземной добычи урвновых руд из месторождений Украины (часть 2) научный вестник НГУ, 2003, №11 с.15÷18 5 авторов
2. Недельский А.Г., Дудченко А.Х., Савельев Ю.Я. и др. Отчет о научно-исследовательской работе: «Исследование и разработка параметров селективной выемки урановых месторождений с технико-экономическим обоснованием нетрадиционных систем разработки (селективное выемка).» Заключительный. Украинский научно-исследовательский и проектно-изыскательный институт промышленной технологии. укрНИПИпромтехнологии инв.№ 288 нил. Желтые Воды 2003. с.83. 6 или 8 авторов
3. Акт о проведении эксплуатационного анализа (устойчивости инструмента и скорости бурения) буровых коронок производства фирмы «Мицубиси» на руднике «Северный» в комбинате «Печенганикель» ОАО «Кольский ГМК» 2005г. Фонды ОАО «Кольский ГМК»
4. А.Ю. Журавель, В.В. Процив, С.А. Федоряченко От качественного бурового инструмента к эффективной отработки месторождений полезных ископаемых подземным способом. Збірник наукових праць Національного гірничого університету №52. Дніпро 2017 с.186÷191.
5. В.И. Мосинец, Д.П. Лобанов, М.Н. Тедеев и др. Строительство и эксплуатация рудников подземного выщелачивания. М. «Недра»1987 с.153, 193, 195. 7 авторов
6. Е.Г. Баронов Пути интенсификации процессов отбойки, дробления и измельчения железных руд. Горный журнал №8, 1982 с.40÷42.
7. Недельский А.Г. Обоснование технологических параметров и внедрение методов управления качеством дробления при отбойке крепких крупноблочных массивов скважинными зарядами. Диссертация на соискание ученой степени к.т.н. ДГУ, Днепропетровск 1988 с.50, 47, 123.

© Процив В.В., Пацера С.Т., Журавель А.Ю., Недельский А.Г., 2019

*Надійшла до редколегії 08.09.2019 р.*

*Рекомендовано до публікації к.т.н. К.А. Зиборовим*

УДК 549.61

<http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.23748.78728>

## УКРАЇНСЬКИЙ ЦИРКОНІЙ<sup>1</sup>

**Л.В. ШПИЛЬОВИЙ**, канд. техн. наук

(Україна, Донське, ТОВ «Азов-Мінеральна техніка»),

**В.С. БІЛЕЦЬКИЙ**, д-р техн. наук

(Україна, Харків, НТУ «Харківський політехнічний інститут»)

*Постановка проблеми та стан її дослідження.* Цирконій – рідкісний метал, широке застосування якого у різних галузях промисловості розпочалося в ХХ столітті. Основним промисловим мінералом – носієм цирконію, – є циркон – силікат цирконію з домішками гафнію. Цирконові руди переробляються

---

<sup>1</sup> Друкується в плані виконання дослідного проекту НТШ «Історія гірництва в Україні: від первісних спільнот до здобутків індустріальної епохи»