

НАУКОВИЙ  
ВІСНИК  
НАЦІОНАЛЬНОГО  
ГІРНИЧОГО  
УНІВЕРСИТЕТУ

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЖУРНАЛ

*ШАХТНЕ ТА ПІДЗЕМНЕ БУДІВНИЦТВО  
РОЗРОБКА РОДОВИЩ КОРИСНИХ КОПАЛИН  
АЕРОЛОГІЯ ТА ОХОРОНА ПРАЦІ  
ГЕОЛОГІЯ  
ГІРНИЧА МЕХАНІКА ТА МАШИНИ  
ЕНЕРГЕТИКА ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ  
ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСІВ  
ЕКОНОМІКА*

**3** 2009

ДНІПРОПЕТРОВСЬК

# НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЖУРНАЛ

Засновник та видавець

## НАЦІОНАЛЬНИЙ ГІРНИЧИЙ УНІВЕРСИТЕТ

### РЕДАКЦІЯ:

*Головний редактор –*

Г.Г. Півняк

*Заступники головного редактора –*

О.С. Бешта, П.І. Пілов, О.М. Шашенко

*Відповідальний секретар –*

Л.С. Шломіна

### РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:

А.Д. Алексеєв, І.В. Багрова, С.Є. Блохін,  
В.І. Бондаренко, А.Ф. Булат, Б.С. Бусигін,  
Б.В. Виноградов, О.С. Галушко, В.І. Голінько,  
А.І. Горова, С.С. Гребьонкін, Б.А. Грядущий,  
І.Л. Гуменик, Р.П. Дідик, М.О. Доброгорський,  
А.О. Задоя, Є.П. Захаров, М.О. Ільяшов,  
Г.О. Козлакова, Є.В. Кочура, Г.В. Кузнецов,  
О.М. Кузьменко, В.В. Лукінов, Л.В. Новикова,  
Ю.Є. Петруня, В.Ф. Приходченко, В.В. Приходько,  
В.Ю. Пушкін, В.В. Радченко, Т.Б. Решетілова,  
А.М. Роєнко, І.О. Садовенко, В.І. Саллі, В.О. Салов,  
В.І. Самуся, В.В. Слесарєв, М.С. Сургай,  
В.В. Ткачов, О.М. Туркенич, К.Ф. Тяпкін,  
В.П. Франчук, Ю.М. Халимендик, Ю.Т. Хоменко,  
Л.Н. Ширін, Ф.П. Шкрабець

### ЗАКОРДОННІ ЧЛЕНИ

#### РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ:

І.В. Дементьєв (Росія), Л. Вільке (Німеччина),  
А. Земба (Польща), Н. Іліас (Румунія),  
М.І. Кучерський (Узбекистан), Н. Мартенс (Німеччина),  
Гюнхан Пашамехметоглу (Туреччина),  
Л.А. Пучков (Росія), Я. Семек (Польща),  
В. Страхош (Чехія), М. Шмідт (Німеччина)

Верстка та редагування: С.П. Іванов

Журнал підписано до друку за рекомендацією вченої ради Національного гірничого університету  
(протокол № 2 від 17.03.2009 року)

---

Поштова адреса редакції:

49000, м. Дніпропетровськ, просп. К. Маркса, 19, корпус 4, к. 49

Тел.: 8 (056) 3730702

e-mail: [HomenkoO@nmu.org.ua](mailto:HomenkoO@nmu.org.ua)

Журнал зареєстровано у Державному комітеті інформаційної політики, телебачення та радіомовлення України. Реєстраційний номер КВ № 6875 від 20.01.03.

Підписано до друку 27.03.09. Формат 30×42/2.

Ум. друк. арк. 10. Папір Ballet Universal.

Наклад 400 прим. Зам. № 55.

Віддруковано у Національному гірничому університеті.

49000, м. Дніпропетровськ, просп. К. Маркса, 19.

© НГУ, 2009

УДК 622.272:624.191.5

С.А. Харин

## УРОВНЕВЫЙ АНАЛИЗ ТЕМПОВ СООРУЖЕНИЯ ПРОТЯЖЕННЫХ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ВЫРАБОТОК В КРЕПКИХ ПОРОДАХ

Проведено аналіз зміни величин чинників, що впливають на швидкість проходки виробок.

Проведен анализ изменения величин факторов, влияющих на скорость проходки выработок.

The evaluation of change of extents of factors, influencing on speed of deepening of generations is conducted.

Для проектирования строительства глубоких горизонтов шахт важное значение имеет правильное определение продолжительности ведения работ. В этой связи представляет интерес уровневый анализ темпов сооружения протяженных горизонтальных выработок, заключающийся в определении параметров совокупности факторов, формирующих тот или иной уровень скорости проходки выработок. Необходимо рассмотреть картину изменения сочетаний значений, в частности, таких факторов, как крепость горных пород, параметры буровзрывных работ, производительность бурового, погрузочного оборудования.

Очевидно, что, по крайней мере, в определенном диапазоне уровней скоростей проходки выработки одну и ту же скорость можно достичь различным сочетанием формирующих факторов. Но, по мере возрастания скорости проходки выработки, будут доминировать определяющие факторы и возможность воздействия на нее других факторов будет снижаться, а затем практически сведется к нулю.

Для условий строительства глубоких горизонтов шахт Кривбасса характерно проведение выработок в крепких и весьма крепких породах, что является существенным фактором, влияющим на скорость ведения работ. Так, например, расчетная месячная скорость проходки горизонтальной горной выработки площадью поперечного сечения  $16 \text{ м}^2$  при пересечении ею пород с различным коэффициентом крепости  $f$  по шкале проф. М.М. Протоdjeяконова (рис. 1) меняется, при прочих равных условиях, от 36,4 (при  $f=6$ ) до 20,1 м/мес. (при  $f=18$ ), при этом в последнем случае интенсивность проведения выработки снижается до 55% первоначальной.

В связи с этим, учитывая условия глубоких горизонтов шахт Кривбасса проведем уровневые исследования темпов сооружения протяженных горизонтальных выработок в крепких породах, рассматривая сочетания таких, формирующих факторов как эксплуатационная производительность бурового оборудования для бурения шпуров в забое выработки ( $P_0$ ), эксплуатационная производительность погрузочного оборудования ( $P_n$ ), коэффициент работоспособности ВВ ( $e$ ), коэффициент заполнения шпуров ( $\kappa_3$ ) в выработках с разной площадью поперечного сечения ( $S$ ).

Представим полученные результаты на рис. 2 и 3. Для выработки с  $S = 16 \text{ м}^2$  анализ эксплуатационной

производительности бурового оборудования, используемого при бурении шпуров в забое, соответствующей (с некоторой степенью приближения) определенному уровню скорости проходки выработки, показывает следующее. При  $f = 12$ ,  $P_n = 5 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $e = 1$ ,  $\kappa_3 = 0,7$  для обеспечения скорости 20 м/мес. достаточно эксплуатационной производительности бурового оборудования 8 м/ч. При неизменных прочих условиях и возрастании  $f$  до 16 и 18 отвечающая данной скорости проходки эксплуатационная производительность бурового оборудования возрастет соответственно до 10 и 12 м/ч.

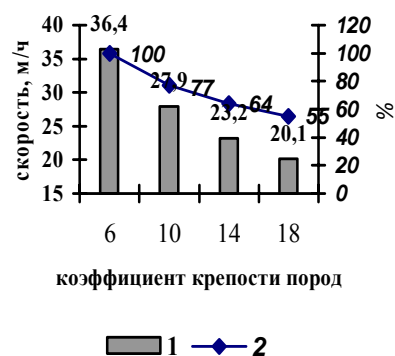


Рис. 1. Зависимость скорости проходки выработки от  $f$ : 1 – скорость проходки; 2 – процентное отношение к базовой величине

Изменив условия до  $e = 0,8$ , получим: при  $f = 16$  производительность бурового оборудования составит 8 м/ч, при  $f = 18$  – она слегка возрастет – до 9 м/ч. Еще несколько изменив условия (увеличив  $\kappa_3$  до 0,8), получим: при  $f = 16$  и  $f = 18$  эксплуатационная производительность бурового оборудования составит соответственно 7 и 8 м/ч. Очевидно, что, управляя различными рассмотренными выше факторами, можно обеспечить скорость проходки выработки 20 м/мес. при эксплуатационной производительности бурового оборудования от 7 до 12 м/ч.

Аналогичным образом выполним анализ для скорости проходки выработки 25 м/мес. В этом случае, например, при  $f = 12$  и  $\kappa_3 = 0,7$ , а также прочих принятых ранее неизменными условиях эксплуатационная производительность бурового оборудования составит 12 м/ч, при  $f = 16$  – 16 м/ч,  $f = 18$  – 18 м/ч.

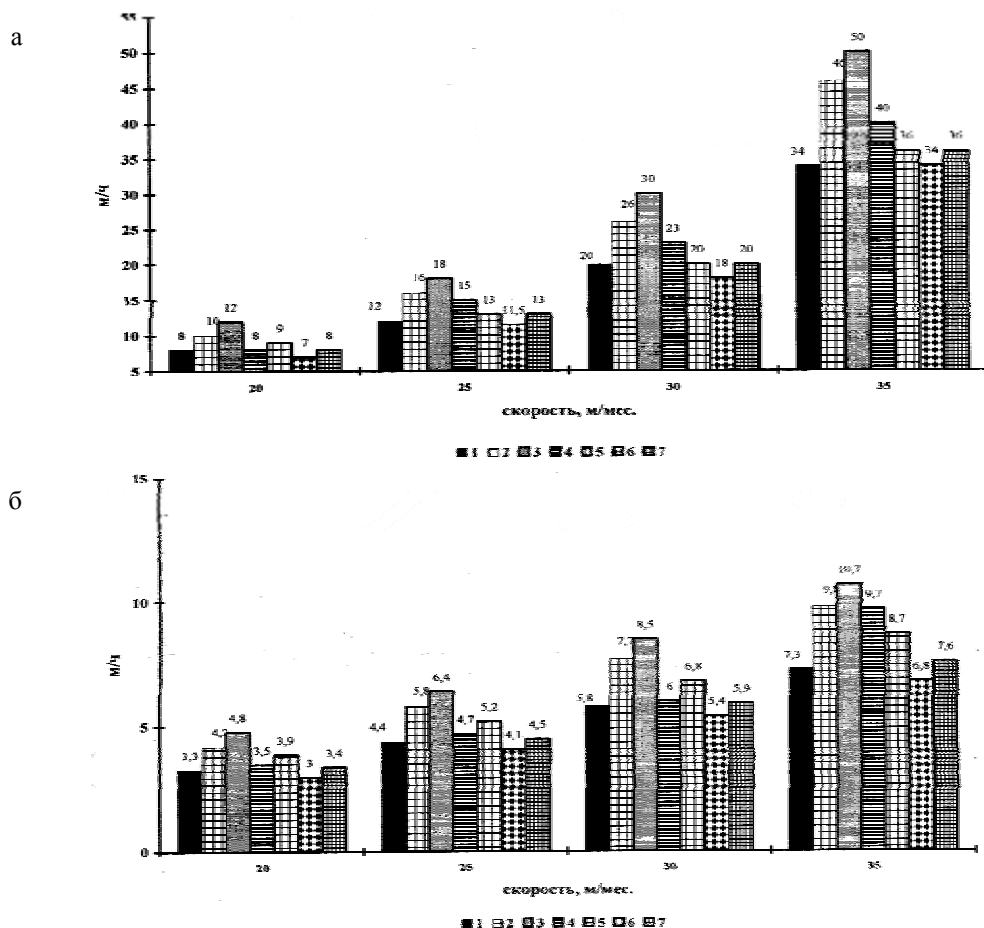


Рис. 2. Уровни скорости проходки выработки при различных условиях: а – при  $S=16\text{ м}^2$ ; б – при  $S=8\text{ м}^2$ ; 1 – при  $f=12$ ,  $P_n=5\text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $e=1$ ,  $\kappa_3=0,7$ ; 2 – при  $f=16$ ,  $P_n=5\text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $e=1$ ,  $\kappa_3=0,7$ ; 3 – при  $f=18$ ,  $P_n=5\text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $e=1$ ,  $\kappa_3=0,7$ ; 4 – при  $f=16$ ,  $P_n=5\text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $e=0,8$ ,  $\kappa_3=0,7$ ; 5 – при  $f=18$ ,  $P_n=5\text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $e=0,8$ ,  $\kappa_3=0,7$ ; 6 – при  $f=16$ ,  $P_n=5\text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $e=0,8$ ,  $\kappa_3=0,8$ ; 7 – при  $f=18$ ,  $P_n=5\text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $e=0,8$ ,  $\kappa_3=0,8$

Изменение же  $e$  и  $\kappa_3$  обеспечивает такие уровни эксплуатационной производительности бурового оборудования: при  $f=16$ ,  $e=0,8$  и  $\kappa_3=0,7$  – 15 м/ч, при  $f=16$ ,  $e=0,8$  и  $\kappa_3=0,8$  – только 11,5 м/ч, но уже при  $f=18$  и других аналогичных показателях требуется производительность 13 м/ч.

Таким образом, при скорости проходки выработки 25 м/мес. требуется поддержание эксплуатационной производительности бурового оборудования, для различных условий на уровне 11,5-18, что примерно в 1,5 раза больше, чем при скорости 20 м/мес.

Для обеспечения скорости проходки 30 м/мес. требуются уже значительно более высокие значения эксплуатационной производительности бурового оборудования. Например, при  $f=12$ ,  $P_n=5\text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $e=1$ ,  $\kappa_3=0,7$  для обеспечения требуемой скорости необходима производительность 20 м/ч (что в 2,5 раза больше, чем при скорости проходки 20 м/мес.).

Изменив условия до  $f=18$ , установим, что необходимая производительность бурового оборудования составит 30 м/ч. В то же время при  $e=0,8$  и аналогичном значении  $f$ , производительность снизится до 20 м/ч. Дополнительно увеличив  $\kappa_3$  до 0,8, получим эксплуатационную производительность бурового оборудования также при-

близительно 8 м/ч, что свидетельствует об отсутствии сколько-нибудь заметного (по крайней мере, в пределах принятой нами точности расчетов) влияния  $\kappa_3$  на скорость проходки выработки при данных условиях.

Как установлено, в рамках рассмотренных условий скорость проходки выработки 30 м/мес. может достигаться при эксплуатационной производительности бурового оборудования в разных случаях от 18 до 30 м/ч.

Наиболее высокие значения эксплуатационной производительности бурового оборудования будут иметь место при скорости проходки выработки 35 м/мес. Даже при  $f=12$ ,  $P_n=5\text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $e=1$ ,  $\kappa_3=0,7$  для обеспечения такой скорости необходимо значение эксплуатационной производительности бурового оборудования 34 м/ч.: в 4,25 раза больше, чем при скорости 20 м/мес., в то время, как скорость проходки выработки увеличивается только в 1,75 раза. При неизменных прочих условиях и возрастании  $f$  до 16 и 18 отвечающие данной скорости проходки эксплуатационные производительности бурового оборудования возрастут соответственно до 46 и 50 м/ч.

Изменение условий позволяет достичь данной скорости и при меньшем значении эксплуатационной производительности бурового оборудования, например, при  $f=18$ ,  $P_n=5\text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $e=0,8$ ,  $\kappa_3=0,8$  такая производительность составит 36 м/ч.

В целом же, рассматривая значения эксплуатационной производительности бурового оборудования, необходимые для обеспечения скорости проходки выработки 35 м/мес. следует, для различных условий ограничить их диапазоном от 34 до 50 м/ч.

Обозначив базовую (в каждом случае соответствующую скорости проходки выработки 20 м/мес.) эксплуатационную производительность бурового оборудования как  $P_0^{03}$  и любую другую как  $P_0^i$ , рассмотрим отношение этих параметров (рис. 3).

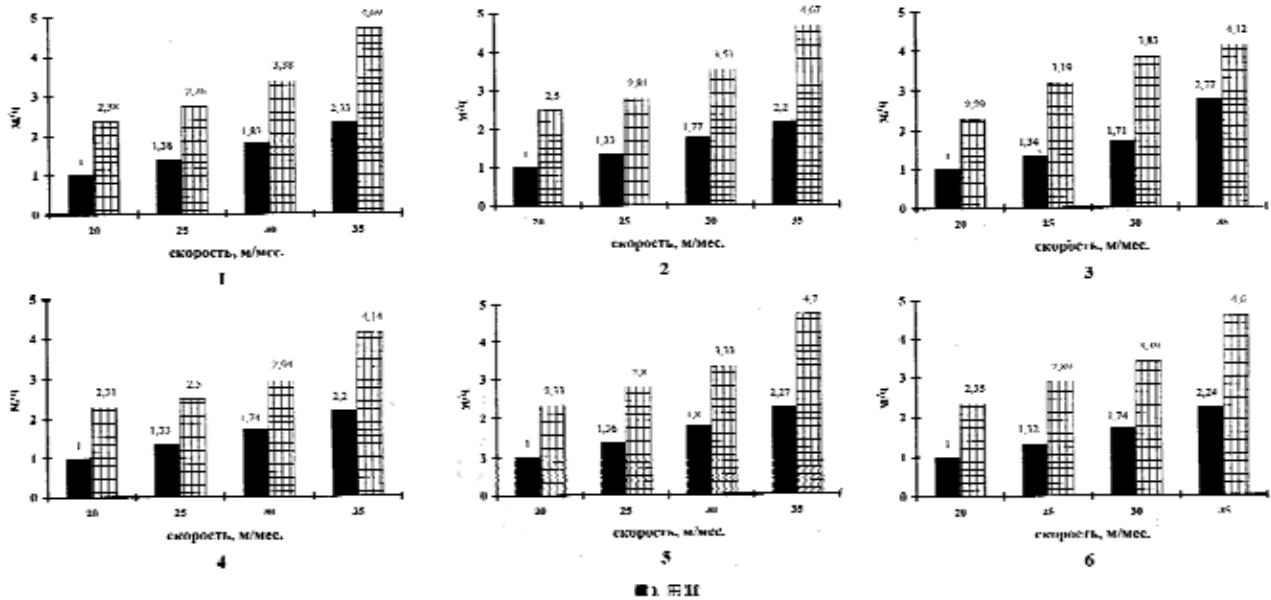


Рис. 3. Динамика индексов эксплуатационной производительности бурового оборудования: I –  $P_0^1/P_0^{03}$ ; II –  $P_0^{16}/P_0^8$ ; 1 – при  $f = 16$ ,  $P_n = 5 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $e = 1$ ,  $\kappa_3 = 0,7$ ; 2 – при  $f = 18$ ,  $P_n = 5 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $e = 1$ ,  $\kappa_3 = 0,7$ ; 3 – при  $f = 16$ ,  $P_n = 5 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $e = 0,8$ ,  $\kappa_3 = 0,7$ ; 4 – при  $f = 18$ ,  $P_n = 5 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $e = 0,8$ ,  $\kappa_3 = 0,7$ ; 5 – при  $f = 16$ ,  $P_n = 5 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $e = 0,8$ ,  $\kappa_3 = 0,8$ ; 6 – при  $f = 18$ ,  $P_n = 5 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $e = 0,8$ ,  $\kappa_3 = 0,8$

При увеличении коэффициента крепости пород отношение эксплуатационной производительности бурового оборудования при изменении скорости проходки выработки площадью поперечного сечения  $8 \text{ м}^2$  к базовому значению будет несколько снижаться, например, при скорости проходки выработки 35 м/мес. и  $P_n = 5 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $e = 1$ ,  $\kappa_3 = 0,7$  такое отношение составит при  $f = 16 - 2,33$ , в то время как при  $f = 18$  только 2,2.

Для разных условий и скоростей проходки выработки в пределах 20-35 м/мес. отношение эксплуатационной производительности бурового оборудования к ее базовому уровню будет ограничиваться величинами 1-2,77. Это отношение, в частности, будет большим по величине при изменении  $e$  от 1 до 0,8.

При переходе от проведения выработки площадью поперечного сечения  $16 \text{ м}^2$  к проведению выработки сечением  $8 \text{ м}^2$  соответствующие определенным нами уровнем скоростям эксплуатационные производительности бурового оборудования (соответственно,  $P_0^{16}$  и  $P_0^8$ ) изменяются следующим образом (рис. 3): при коэффициенте крепости пород 16 по шкале проф. М.М. Протодяконова и  $e = 1$ ,  $\kappa_3 = 0,7$ ,  $P_0^{16}/P_0^8$  составляет от 2,38 (при скорости 20 м/мес.) до 4,69 (при 35 м/мес.), а с увеличением коэффициента крепости пород до 18 соотношение  $P_0^{16}/P_0^8$  будет, почти во всех соответствующих случаях, несколько большим и составит 2,5 (при скорости 20 м/мес.), но лишь 4,67 (при 35 м/мес.). Подобная картина будет наблюдаться и при других значениях  $e$  и  $\kappa_3$ . Очевидно, что уменьшение площади сечения выработки в два

раза позволяет поддерживать требуемые уровневые скорости проходки при существенно более низкой эксплуатационной производительности бурового оборудования и, по мере возрастания этих уровневых скоростей, степень снижения эксплуатационной производительности будет возрастать.

**Выводы.** Таким образом, уровневый анализ темпов сооружения протяженных горизонтальных выработок показал следующее: наиболее важными из формирующих величину скорости проходки выработки факторов являются коэффициент крепости пород и эксплуатационная производительность бурового оборудования для бурения шпуров в забое; определенную скорость проходки выработки, по крайней мере, до некоторого ее уровня, можно достичь различным сочетанием формирующих факторов; увеличение скорости проходки выработки с 20 до 35 м/мес. (в 1,75 раза) требует роста производительности бурового оборудования для выработок с  $S = 16 \text{ м}^2$  в 4-4,8 раза, в зависимости от конкретных условий, а выработок с  $S = 8 \text{ м}^2$  в 2,2-2,77 раза; при переходе от проведения выработки площадью поперечного сечения  $16 \text{ м}^2$  к сечению  $8 \text{ м}^2$  соответствующие уровневые скоростям эксплуатационная производительность бурового оборудования снижается в 2,3-4,7 раза, причем с увеличением скорости наблюдается тенденция роста этого отношения.

Рекомендовано до публікації д.т.н. О.С. Зеленським 16.01.09

## **СПОСІБ РОЗРОБКИ РОДОВИЩ КОРИСНИХ КОПАЛИН З ВИКОРИСТАННЯМ СВЕРДЛОВИН ВЕЛИКОГО ДІАМЕТРА**

Запропоновано спосіб розробки родовищ корисних копалин з використанням свердловин великого діаметра.

Предложен способ разработки месторождений полезных ископаемых с использованием скважин большого диаметра.

The method of development of deposits of minerals is offered with the use of mining holes of large-break.

Надра України і, зокрема, Рівненської області перспективні для пошуків корінних родовищ алмазів, міді та інших корисних копалин [1]. За даними фахівців Рівненської геологорозвідувальної партії сумарні витрати для пошуків алмазоносних трубок на вказаній площі оцінюються в 1 млн. дол. США [1-4].

Пропонується для промислового використання спосіб розробки родовищ корисних копалин, представлених алмазоносними трубками, і суперструктуру для його здійснення, синтез яких дозволить вести відпрацювання складноструктурних родовищ, які залягають в складних гірничо-геологічних умовах з високою ефективністю за рахунок скорочення втрат корисної копалини в надрах до мінімально допустимого рівня без нанесення еколого-економічного збитку навколишньому середовищу, адже пропонувані технологічні схеми проведення підземних гірничих виробок і очисного виймання не потребують створення депресійної воронки.

Розробка родовищ включає: розкриття родовища підземними гірничими виробками і системою вертикальних свердловин, пройдених із земної поверхні; підготовку родовища до експлуатації з поділом на поверхи; виймання корисної копалини у дві стадії; формування суперструктури на першій стадії; створення в налягаючих породах несучого цілика; гідравлічне виймання корисної копалини на другій стадії; видачу пульпи через свердловину великого діаметра (СВД) на земну поверхню [1].

У процесі підготовки родовища до експлуатації його розбивають на поверхи із залишенням в кратерній частині родовища запобіжного цілика. Здійснюють проходку в основі верхнього поверху системи коаксіально розташованих штреків і радіально направлених ортів. Зовнішній штрек розташовують безпосередньо біля контакту родовища з вмшуючими породами. Проводять виймання корисної копалини розбурюванням пілот-свердловин, вибої яких розташовані в покрівлі штреків і ортів, у напрямку до запобіжного цілика буровими установками, розташованими на земній поверхні. Далі здійснюють спуск обсадних колон в утворені циліндричні порожнини та бетонування затрубного простору колон, штреків і ортів з утворенням в межах висоти поверху секцій суперструктури у вигляді кільцевих циліндрів, з'єднаних між собою пілонами. Після створення в

межах висоти верхнього поверху секцій суперструктури у вигляді кільцевих циліндрів, з'єднаних між собою пілонами, в налягаючих породах створюють несучий цілик, основу якого розташовують на поверхні запобіжного цілика. Несучий цілик виконують у вигляді бетонних циліндрів, дотичних між собою твірними. Утворення бетонних циліндрів ведуть в процесі розмиву порожнин цементним молоком з винесенням глинистої фракції пульпи по методу прямої промивки.

На завершальній стадії створення суперструктури в основі нижнього поверху проходять коаксіально розташовані штреки і радіально направлені орти, причому розташування штреків і ортів співпадає з горизонтальними проєкціями аналогічних раніше пройдених гірничих виробок, при цьому зовнішній штрек розташовують у вмшуючих породах. Проводять виймання корисної копалини розбурюванням пілот-свердловин, пробурених по висоті нижнього поверху з розміщенням їх вибоїв у покрівлі штреків і ортів з використанням свердловин, розміщених у створених секціях кільцевих циліндрів і пілонів, у напрямку основ секцій і пілонів верхнього поверху буровими станками, встановленими на земній поверхні. Потім проводять бетонування утворених циліндричних порожнин, штреків і ортів із залишенням випускних вікон у нижніх торцевих частинах секцій, крім зовнішньої секції.

Суперструктура для здійснення способу розробки включає кільцеві циліндричні бетонні конструкції (КЦБК). КЦБК виконані у вигляді секцій кільцевих циліндрів, основи яких жорстко з'єднані між собою кільцевими поясами. КЦБК встановлені коаксіально і по радіальних напрямках жорстко з'єднані між собою пілонами. Секції кільцевих циліндрів і пілони конструктивно оформлені з бетонних труб, крім нижніх секцій кільцевих циліндрів, утворених круговими прямими циліндрами, дотичними між собою твірними.

Нижні торцеві частини нижніх секцій кільцевих циліндрів, крім зовнішньої секції, оснащені випускними вікнами, розташованими радіально, висота яких збільшується від центральної до зовнішньої секції.

Опори торцевих частин нижніх секцій кільцевих циліндрів, розташовані між випускними вікнами, виконані у вигляді прямих циліндрів, встановлених на

п'яту у формі клинів, бічні грані яких звернені до напрямку руху потоку пульпи. Запобіжний цілик, що залишається в кратерній частині родовища, запобігає надходженню в очисний простір води і налягаючих порід, представлених пливунами, в очисний простір між бетонними циліндрами несучого цілика при зведенні якого зберігається вірогідність залишення пор, які знижують його монолітність.

Проходка зовнішнього штреку у вміщуючих породах при відпрацюванні нижнього поверху на першій стадії дозволяє скоротити втрати корисної копалини в надрах і, крім того, запобігти значним водотокам води в гірничі виробки верхніх поверхів внаслідок сильної обводненості вміщуючих порід верхніх геологічних горизонтів. Залишений в надрах кільцевий циліндр з корисної копалини, руда якого представлена глинами, є водопором.

Виймання корисної копалини на першій стадії через свердловини буровими агрегатами, встановленими на земній поверхні, дозволяє підвищити продуктивність праці при збереженні її безпеки. Крім того, значно скорочуються витрати на закладку виробленого простору за рахунок подачі закладного матеріалу через експлуатаційні свердловини з земної поверхні.

Створення в налягаючих породах несучого цілика дозволяє запобігти їх обваленню при гідравлічному вийманні корисної копалини на другій стадії, тим самим проводити відпрацювання родовища на глибину висоти поверхів. При цьому тривалість відпрацювання родовища на другій стадії не залежить від стійкості налягаючих порід і зниження їх характеристик міцності в часі.

Виконання суперструктури у вигляді КЦБК, з'єднаних між собою пілонами, дозволяє створити міцну і жорстку конструкцію, що запобігає обваленню налягаючих і вміщуючих порід на весь період відпрацювання родовища, виключаючи тим самим катастрофічні екологічні наслідки.

Створення опор торцевих частин нижніх секцій кільцевих циліндрів, розташованих між випускними вікнами, у вигляді прямих циліндрів, встановлених на п'яту у формі клинів, запобігає втратам алмазів на днищах камер виймання при самотічному гідротранспортуванні пульпи до свердловини великого діаметра, оскільки опори не є перешкодою на шляху руху потоку пульпи, в якому не відбувається осадження алмазів.

Промислове освоєння родовища розглядається на прикладі розробки алмазонасної трубки, складеної ксенотуфобрекчіями, з коефіцієнтом міцності за шкалою професора М.М. Протодьяконова рівним одиниці. Налягаючі породи представлені четвертинними відкладами і сильно обводнені. Вміщуючі породи складені пісковиками і до горизонту з абсолютною відміткою рівною 250 м сильно обводнені. Відбиті від масиву ксенотуфобрекчії у водному середовищі схильні до довільної дезінтеграції.

Технічне і технологічне рішення ілюструються графічним матеріалом (рис. 1-10).

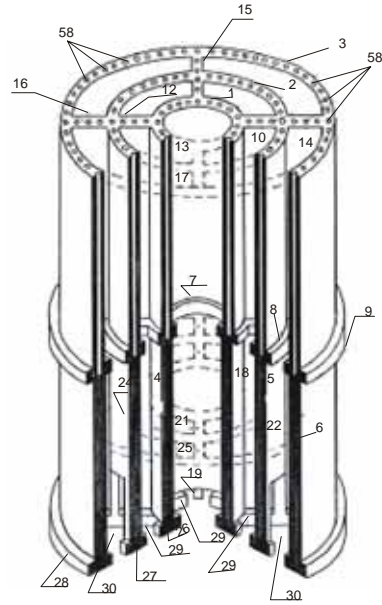


Рис. 1. Суперструктура в ізометрії: 1-6 – центральна, проміжна і зовнішня секції кільцевих циліндрів верхнього і нижнього поверхів; 7-9 і 26-28 – кільцеві пояси; 10-25 – пілони; 29,30 – випускні вікна; 31 – торцева частина опори; 32 – циліндри; 58 – пілот-свердловини

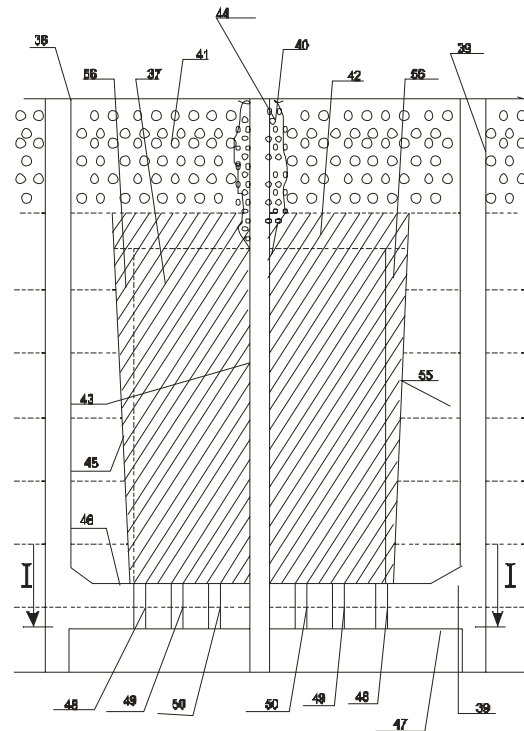


Рис. 2. Розкриття і підготовка верхнього поверху трубки до експлуатації в розрізі: 37 – алмазонасна трубка; 38,39 – шахтні стовбури; 40 – СВД; 41 – налягаючі породи; 42 – запобіжний цілик; 43 – колона труб; 44 – затрубний простір; 45 – верхній поверх; 46,47 – квершлага; 48-50 – штреки; 51-54 – орти; 55 – вміщуючі породи; 56 – запобіжний кільцевий циліндр

Суперструктура для здійснення способу розробки алмазонасних трубок включає КЦБК центральну, проміжну і зовнішню секції кільцевих циліндрів верхнього поверху, центральну, проміжну і зовнішню секції кільцевих циліндрів нижнього поверху.

Суперструктура може складатися з більшої кількості секцій по висоті, якщо відпрацювання трубки ведуть трьома і більшою кількістю поверхів. Секції кільцевих циліндрів жорстко з'єднані з секціями кільцевими поясами.

I - I

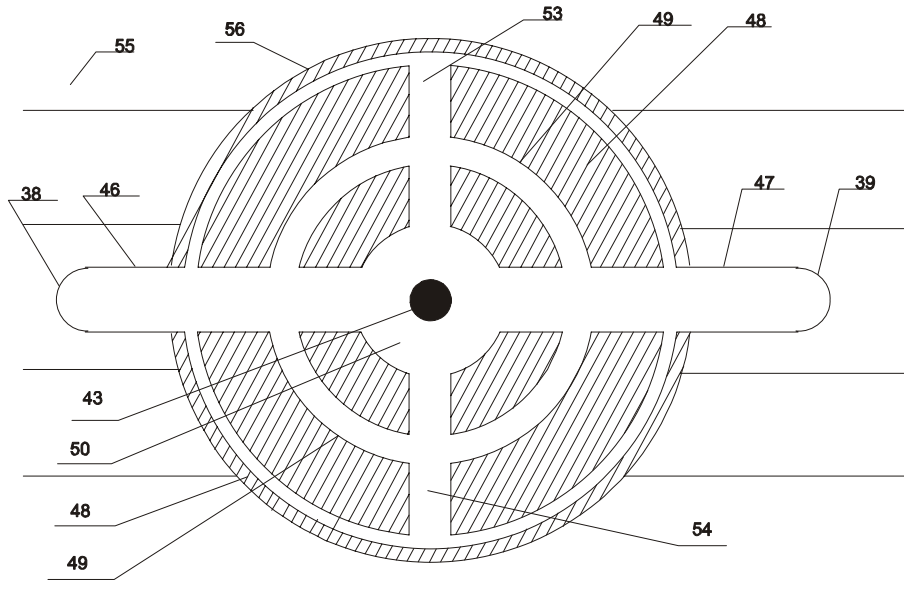


Рис. 3. Розріз і підготовка верхнього поверху трубки до експлуатації в плані (розріз I-I)

Секції верхнього поверху жорстко з'єднані між собою радіально пілонами. Секції нижнього поверху також жорстко з'єднані між собою пілонами і встановлені на кільцеві пояси. Таким чином, секції разом з поясами є самостійними кільцевими циліндричними конструкціями, а разом з пілонами утворюють мі-

цну і жорстку суперструктуру. В поясі конструктивно виконані випускні вікна. Опори торцевих частин секцій розташовані між випускними вікнами і виконані у вигляді прямих циліндрів, встановлених на п'яту у формі клинів, бічні грані яких звернені до на-пряму руху потоку пульпи.

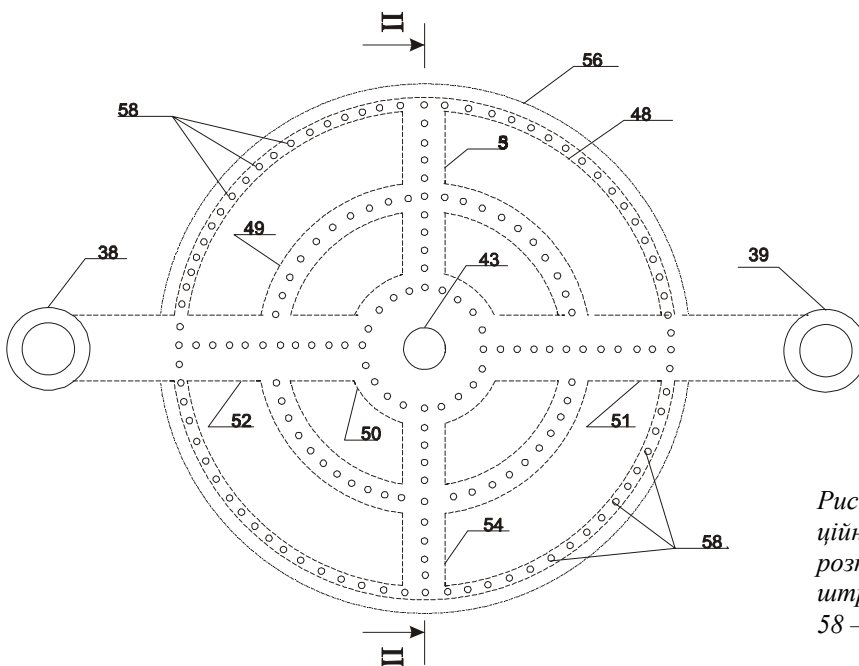


Рис. 4. Розташування вустя експлуатаційних свердловин на земній поверхні та розташування їх вибоїв у покрівлі штреків і ортів: 57 – бурові установки; 58 – експлуатаційні свердловини



Секції кільцевих циліндрів і пілони конструктивно виконані у вигляді прямих циліндрів, які дотикаються твірними.

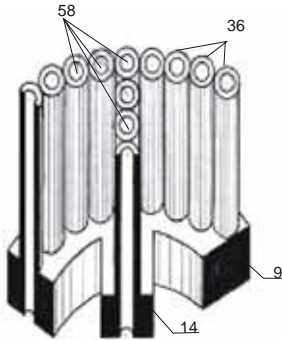


Рис. 5. Елемент секції кільцевого циліндра і пілона

На стадії проектування копальні залежно від гірничо-геологічних умов залягання трубки, вмісту алмазів по глибині, балансових запасів встановлюють:

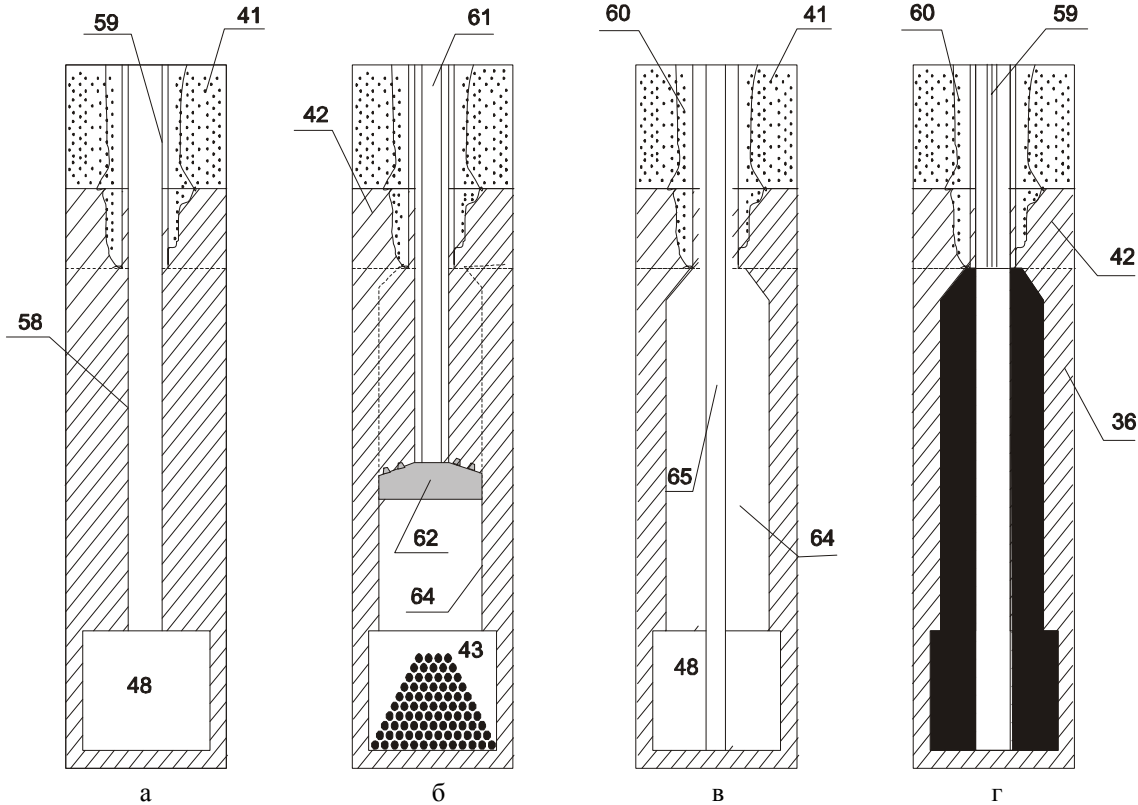


Рис. 6. Процес створення кільцевих циліндрів

На рівні основи верхнього поверху з шахтних стовбурів проходять квершлагги. Потім здійснюють проходку штреків, а також ортів. Штреки в межах перерізу трубки розташовують коаксіально, а орти проходять по радіальних напрямках. Зовнішній штрек розташовують безпосередньо біля контакту трубки з вмшуючими породами із залишенням по висоті поверху запобіжного кільцевого циліндра.

Із земної поверхні буровими установками проходять систему експлуатаційних пілот-свердловин, ви-

економічно-доцільну глибину розробки; висоту поверху і загальну кількість поверхів; річну продуктивність копальні; термін відпрацювання запасів; характеристики міцності КЦБК, їх геометричні розміри і радіальні відстані між ними; значення центральних кутів добувних блоків і загальну кількість блоків; характеристики міцності пілонів і їх геометричні розміри; висоту запобіжного цілика; висоту несучого цілика і його конструктивне виконання; розмір запобіжного кільцевого циліндра, розташованого між зовнішніми секціями кільцевих циліндрів і вмшуючими породами на обводненому інтервалі.

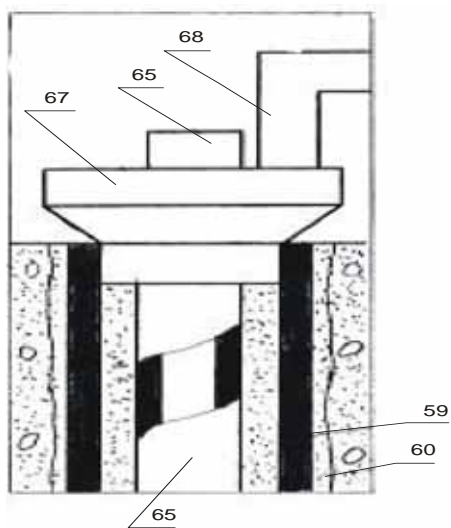
Потім проводять розріз трубки шахтними стовбурами. В центрі трубки проходять СВД. Вибір СВД розміщують нижче межі економічно доцільної глибини розробки, яка проходить в основі нижнього поверху. СВД в межах потужності налягаючих порід і висоті запобіжного цілика обсаджують колоною труб з цементациєю затрубного простору.

бої яких розташовують в покрівлі штреків і ортів. Відрізки свердловин, розташовані в межах потужності налягаючих порід і висоті запобіжного цілика, обсаджують колонами труб, а їх затрубні простори цементують.

Після цього здійснюють виймання корисної копалини на першій стадії з верхнього поверху. Буровими установками (наприклад, НГ330SP) в свердловини опускають бурові штанги, на які в штреках, а також ортах навішують породоруйнівальні інструменти. За

допомогою обертання й осьового переміщення породоруйнівних інструментів розбурюють пілот-свердловини в напрямку запобіжного цілика. Відбиту від масиву корисну копалину за допомогою машин транспортують до шахтних стовбурів, а потім видають на поверхню.

Розбурювання експлуатаційних свердловин починають з перерізу штреку з ортами у напрямку до шахтних стовбурів і до СВД з умов безпеки. Аналогічним чином розбурюють експлуатаційні свердловини при перерізі ортами штреку. На завершальній стадії виймання корисної копалини розбурюють експлуатаційні свердловини, вибої яких розташовані в покрівлі ортів.

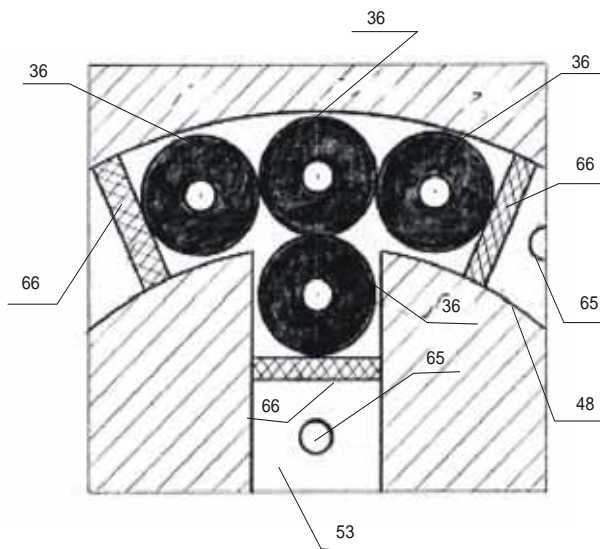


*Рис. 7. Процес подачі цементного розчину через експлуатаційну свердловину в утворену порожнину: 65 – колона; 66 – водонепроникні перемички; 67 – завантажувальні апарати; 68 – трубопровід*

Після утворення циліндричної порожнини в останню опускають колону труб, зовнішню поверхню якої покривають нафтою або пінополіуретаном. Покриття колони запобігає адгезії зовнішньої поверхні колони до цементного розчину. В штреці та орті встановлюють водонепроникні перемички. На вустя обсадних колон встановлюють завантажувальні апарати, в які по трубопроводу від закладного комплексу подають бетон. Бетон надходить по міжтрубному простору, утвореному колонами, заповнює частину штреку та орта, а потім і циліндричну порожнину. Після тверднення бетону колону вилучають. Таким чином створюють конструкцію у вигляді бетонних труб, які дотикаються між собою твірними. Порожнини труб є свердловини.

Після повного виймання корисної копалини з експлуатаційних пілот-свердловин і заповнення циліндричних порожнин бетоном утворюється суперструктура верхнього поверху, яка складається з секцій кільцевих циліндрів і пілонів, жорстко з'єднаних між собою, з необхідними характеристиками міцності.

Потім в квершлагах встановлюють водонепроникні перемички. На рівні основи нижнього поверху з шахтних стовбурів проходять квершлагги. Після цього здійснюють проходку штреків, а також ортів. Розташування штреків і ортів співпадає, відповідно, з горизонтальними проекціями штреків, а також ортів. Зовнішній штрек проходять у вміщуючих породах і розміщують нижче водоносного горизонту.



*Рис. 8. Розташування бетонних труб на кільцевому поясі в пілоні*

Із земної поверхні буровими установками проходять експлуатаційні пілот-свердловини, вибої яких розташовують в покрівлі штреків, а також ортів. Після цього проводять виймання корисної копалини на першій стадії з нижнього поверху. Буровими установками НГ330SP в свердловини опускають бурові штанги, на які в штреках і ортах навішують породоруйнівні інструменти. За допомогою обертання та осьового переміщення породоруйнівних інструментів розбурюють пілот-свердловини у напрямку до основ секцій і пілонів, розташованих на верхньому поверсі. Відбиту від масиву корисну копалину за допомогою машин транспортують до шахтних стовбурів, а потім видають на поверхню.

Розбурювання експлуатаційних свердловин починають з перерізу штреку ортами в напрямку до шахтних стовбурів і до СВД. Аналогічним чином розбурюють експлуатаційні свердловини при перерізі ортами штреку. На першій стадії виймання корисної копалини розбурюють експлуатаційні свердловини, вибої яких розміщені в покрівлі ортів.

Після утворення циліндричної порожнини в штреках і ортах встановлюють водонепроникні перемички (на кресленнях не показані). На вустя обсадних колон встановлюють завантажувальні апарати, в які по трубопроводу від закладного комплексу подають бетон. Бетон по обсадній колоні і свердловині надходить в порожнину, заповнює її, а також частини штреків і ортів, розділених водонепроникними перемичками. Та-

ким чином створюють конструкцію у вигляді бетонних циліндрів, дотичних між собою твірними.

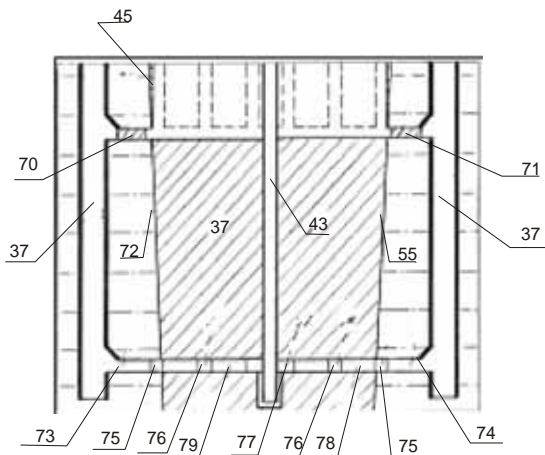


Рис. 9. Розкриття і підготовка нижнього поверху в розрізі: 69 – закладний комплекс; 70, 71 – водонепроникні перемички; 72 – нижній поверх; 73, 74 – квершлага; 75-77 – штреки; 78-81 – орти

Після повного виймання корисної копалини з експлуатаційних пілот-свердловин і заповнення циліндричних порожнин бетоном із залишенням в циліндричних секціях випускних вікон і конструктивного оформлення опор, утворюється суперструктура нижнього поверху, що складається з кільцевих циліндрів жорстко з'єднаних між собою пілонами з необхідними характеристиками міцності. Крім того, суперструктури верхнього і нижнього поверхів, жорстко з'єднані між собою кільцевими поясами, утворюють єдину конструкцію. Потім в квершлагах встановлюють водонепроникні перемички. На цьому виймання корисної копалини на першій стадії припиняють.

Гідравлічне виймання корисної копалини на другій стадії ведуть добувними блоками у формі елементів кругового кільця, що складаються з камер виймання, обмежених суміжними кільцевими циліндричними секціями і пілонами. Центральний кут видобувного блоку встановлюють на підставі міцнісних характеристик суперструктури з урахуванням складноструктурної будови родовища, представленого породами з різними коефіцієнтами міцності.

Використання на другій стадії відпрацювання родовища системи розробки з обваленням корисної копалини значно скорочує експлуатаційні витрати при відносній простоті підготовчих робіт, пов'язаних з проходкою розрізних і компенсаційних щілин добувними гідромоніторами, встановленими на земній поверхні.

Магазинування обрушеної корисної копалини у камерах виймання з подальшою інтенсифікацією процесу довільної дезінтеграції корисної копалини в магазині дозволяє створити необхідний кондиційний кусок для ерліфтної системи. Крім того, є можливим виключити з технологічної схеми збагачувальної фабрики процес дроблення корисної копалини, витрати на здійснення якого є значними.

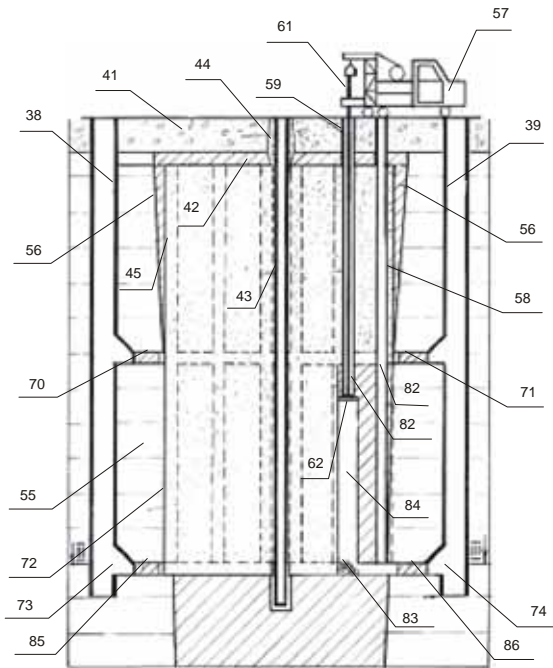


Рис. 10. Процес створення секції кільцевих циліндрів і пілонов на нижньому поверсі: 82 – пілот-свердловина; 83 – відбита корисна копалина; 84 – порожнина; 85, 86 – водонепроникні перемички

Виймання корисної копалини на другій стадії одиночними блоками доцільно проводити в корисній копалині, представленій ксенотуфобрекчіями, тривалість дезінтеграції яких складає одну добу, забезпечуючи тим самим необхідну продуктивність копальні.

Виймання корисної копалини на другій стадії з діаметрально протилежних добувних блоків доцільно проводити в корисній копалині, представленій автіловими брекчіями, тривалість дезінтеграції яких складає до десяти діб і більше. Вказаною закономірністю забезпечується рівномірне навантаження на збагачувальну фабрику, виключаючи при цьому складування надрешітного продукту пульпи на земній поверхні, що призводить до нанесення збитку навколишньому середовищу у вигляді забруднення та відторгнення значних територій.

### Список літератури

1. Рачковський В.П. Техніка і технології для підвищення ефективності освоєння родовищ корисних копалин // Вісник НУВГП. – 2007. – № 1(37).
2. Научные основы недропользования в Украине / Черней Э.И., Постоловский Р.М., Маланчук З.Р. и др. – Украина. Ровно, 2000.
3. Черней Э.И. Устройство для определения диаметра и профиля подземных камер. – А.С. № 1249288, Б.И. № 26, 1986.
4. Научные основы комплексного освоения недр. В 2-х т. / Черней Э.И., Калько А.Д. и др. – Украина. Ровно, 2002.

Рекомендовано до публікації д.т.н. І.О. Садовенком 04.03.09

## **ЕКОЛОГІЧНІ ПРОБЛЕМИ РОЗРОБКИ РОДОВИЩ СКЕЛЬНИХ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ В РАЙОНАХ, ПРИЛЕГЛИХ ДО ЖИТЛОВИХ ЗАБУДОВ**

Відображено вплив відкритих гірничих робіт з урахуванням зменшення забруднення навколишнього природного середовища при проведенні підривних робіт.

Отображено влияние открытых горных работ с учетом снижения загрязнения окружающей природной среды при производстве взрывных работ.

Impact of the open operations with the count of a decrease of pollution of the enviring physical medium is mapped by effecting blasting.

**Вступ.** У даний час на території промислових регіонів все більш актуального значення набувають екологічні проблеми забруднення атмосфери кар'єрів, ґрунтів, водних джерел. У зв'язку з цим постає проблема розробки та застосування методів зменшення концентрації шкідливих домішок на кар'єрах та поблизу нього під час проведення масових вибухів.

**Мета роботи.** Встановити вплив градієнту температури, атмосферних опадів на розповсюдження пилогазової хмари, що в подальшому дозволить завдяки цьому коригувати у зменшувати межі санітарно-захисної зони.

Розробка скельних будівельних матеріалів в Україні здійснюється в 14 областях та АР Крим. В основному це регіони, в яких розповсюджується Український кристалічний щит. На балансі Держкомітету з геології Мінохорони природного середовища України знаходиться близько 400 родовищ, на яких корисними копалинами є граніти, гранодіоріти, мігматити, андезити, базальти, сієніти, гнейси, вапняки, пісковики, що використовуються для виготовлення щебеню, піску, бутового каменю.

Всі ці корисні копалини розробляються з попереднім розпушенням порід буропідривним або іншими способами. Виймання та навантажування гірської маси в транспортні засоби виконуються екскаваторами та фронтальними колісними навантажувачами. На транспортуванні порід в кар'єрах застосовуються автомашини і колісні навантажувачі, а щебеню і іншої продукції-автомобільний, залізничний, річковий та в межах дробильно-сортувальних заводів (ДСЗ) – конвеєрний транспорт. У комплексі видобувний кар'єр – дробильно-сортувальний завод на гірничих підприємствах функціонують також інші механізми: дробарки, грохотильне (сортувальне) обладнання, конвеєри, бункери, класифікатори для промивання продукції та інше. На допоміжних роботах в кар'єрах і на ДСЗ, відвалах та хвосто- та шламосховищах досить широко застосовуються бульдозери, автогрейдери, колісні навантажувачі, колісні скрепери.

Кар'єри, відвали, хвосто- та шламосховища та ДСЗ гірничодобувних підприємств є досить велики-

ми джерелами забруднення навколишнього середовища. Перш за все це забруднення повітря і атмосфери кар'єру, ґрунтів, водних джерел та інших водоймищ.

Державними санітарними правилами [1] передбачається, що навколо потенційних забруднювачів природного середовища – гірничодобувних об'єктів потрібно виділяти санітарно-захисні смуги (зони). Їх ширина по відношенню до населених пунктів та межі житлових забудов повинна становити не меншу 1,5 км, але для більшості (понад 70-75%) раніше експлуатованих родовищ, на яких нині відновлюються кар'єри та в установленому порядку отримані дозволи на їх розробку, ширина зазначеної санітарно-захисної зони не додержується. Вона становить в 2-3 рази меншу величину – до 400-360 м. У такому становищі перебувають кар'єри з видобутку скельних будівельних матеріалів. Наприклад, на Дібровському, Таромському, Петровському та Кам'янозубилівському (Дніпропетровська обл.), Дмитрівському, і Коранському (Донецька обл.), Крюківському, Власівському та Кременчуцькому (Полтавська обл.), Софіївському, Ахтовському, Прибужанівському, Капітонівському та Кодимському (Миколаївська обл.), Вірському I і II, Клесівському та Рокитнянському (Рівненська обл.), Ігнатпольському (Житомирська область) та інших родовищах гранітів, гнейсів, сієнітів, вапняків, діоритів.

Для їх нормальної розробки необхідно постійно дотримуватися екологічних вимог щодо концентрації шкідливих забруднюючих речовин гірничодобувного виробництва на межі житлових забудов. Концентрація пилу, сажі, двоокису азоту, окислу водню, альдегіду бензойного, бенз(о)пірену, сірчаного ангідриду, вуглецю на зазначеній межі не повинна перевищувати гранично-допустимих величин, які встановлені санітарними правилами.

Потрібно зазначити, що на кар'єрах основними джерелами забруднення є підривні роботи, виймально-навантажувальні, транспортні і відвальні роботи. В процесі їх виконання в атмосферу викидаються вищепераховані шкідливі речовини. Досить значним забруднювачем з перелічених процесів вироб-

ництва є масові вибухи на кар'єрах. Так, наприклад, при видобуванні 400-450 тис.м<sup>3</sup> гірських порід за рік на близько 1 млн.т готової щебеневої продукції) загальна кількість шкідливих газоподібних речовин, які викидаються в атмосферу при виконанні одного масового вибуху (окислу вуглецю, окислів азоту, азотної кислоти, двоокису азоту) досягають 215 л/кг по СО, 237 л/кг –NO<sub>x</sub>. Кількість пилу в атмосфері при цьому може становити 870 кг.

Підвищені концентрації шкідливих речовин в кар'єрі та за його межами, що утворюються в період виконання масового вибуху, визначаються балансом між їх надходженням сумісно з пилогазовою хмарою та нейтралізацією під дією різних типів атмосферних опадів [2]. Опادي впливають на розповсюдження пилогазової хмари і, очевидно, характеризують в цілому ступінь самоочищення атмосфери кар'єру від забруднення.

Нині при оцінці забруднюючих факторів виробниками надзвичайно мало враховується вплив геометричних параметрів кар'єрних полів, конструкції свердловинних зарядів, типів вибухових речовин (ВР), метеорологічних умов.

Тому розгляд цих чинників має важливе значення при екологічній оцінці роботи гірничодобувних підприємств, які знаходяться поблизу житлових забудов. Існуючі методики розрахунку кількості та концентрації пилу і токсичних газів в заданих точках місцевості навколо кар'єру (за нормативними методиками Гідрометеокомітету, Держкомстату, Держсаннагляду, Держбуду, а також програма розрахунків неорганізованих викидів NEOR-GIST, яка затвержена Мінохорони навколишнього середовища України), не в повній мірі враховують зазначені чинники. Тому нижче пропонується розглянути нову методику розрахунків, в якій зроблена спроба їх урахування. При цьому необхідно зробити такі застереження. В процесі руху пилогазової хмари виникають різного роду хімічні реакції, які виконують роль стабілізатора стану атмосфери. Швидкість протікання цих реакцій в хмарах за окремим в значній мірі залежать від типу застосовуваних ВР, їх кількості, а також видів і кількості опадів, констант швидкостей реакцій шкідливих газів [3].

**Основні результати.** Під час підричних робіт, наприклад при підвищеній вологості та малій швидкості вітру, в кар'єрі утворюється фотохімічний смог, при цьому залежно від типу ВР нейтральне середовище перетворюється в кисле. Термін існування, наприклад NO<sub>x</sub> можна приблизно оцінювати, якщо відомі тип і кількість ВР з урахуванням стану атмосфери на конкретній ділянці, де проходять шлях пилогазові хмари, та присутністю на цьому шляху водних джерел і біологічних перешкод.

Терміни існування хімічних речовин були встановлені раніше різними авторами, тому відомо, що вони становлять (годин): оксиду азоту в атмосфері – 168, діоксиду азоту – 120, азотистої кислоти – 336, азотної кислоти – 72 години, триоксиду азоту – 72, оксиду та діоксиду вуглецю 26280. Термін

осадження твердих частинок пилу розміром 0,1-10,0 мкм при швидкості вітру менше 4 м/с, з пилогазової хмари здійснюється під дією гравітаційних сил. Якщо ж швидкість складає понад 4 м/с то фракції цих розмірів залежно від метеорологічних умов та кількості ВР підхоплюються вітровими потоками та піднімаються в більш високі шари атмосфери.

Взагалі концентрацію шкідливих газів в пилогазовій хмарі (C<sub>1</sub>) можна визначити за виразом [4]:

$$C_1 = \frac{N_1 \cdot A \cdot K}{10 \cdot V_o}, \text{ мг/м}^3,$$

де N<sub>1</sub> – кількість шкідливих газів в пилогазовій хмарі, л/кг; A – кількість ВР, що підривається, кг; V<sub>o</sub> – об'єм пилогазової хмари, м<sup>3</sup>; K – коефіцієнт, що враховує вихід об'єму отруйних газів в перерахунку на СО та NO<sub>x</sub> (для СО = 1,25 × 10<sup>4</sup>, NO<sub>x</sub> = 5 × 10<sup>4</sup>).

Концентрація забруднюючої речовини (мг/м<sup>3</sup>) в пилогазовій хмарі при використанні одного типу ВР знаходиться за формулою [4]:

$$C = \frac{10^9 \cdot q \cdot A}{V_o} \cdot \left(1 - \frac{\eta}{100}\right) \text{ мг/м}^3,$$

де q – питома витрата ВР, кг/м<sup>3</sup>; A – кількість ВР, що підривається, т;

При застосуванні декількох типів ВР:

$$C = \frac{10^7 \cdot (100 - \eta)}{V_o \cdot (\rho_1 \cdot A_1 + \rho_2 \cdot A_2 + \dots + \rho_n \cdot A_n)} \text{ мг/м}^3,$$

де ρ – питомі виділення забруднюючих речовин при вибуху 1 т ВР, т/т; η – ефективність засобів пилогазоподавлення, %.

Індексми 1, 2, ..., n позначені типи ВР.

Об'єм пилогазової хмари [5]:

$$V_o = 44000 \cdot A^{1,08}, \text{ м}^3$$

Питома кількість пилу, що виділяється під час вибуху з пилогазової хмари (n<sub>o</sub>), визначається за виразом [4]:

$$n_o = \frac{n_{cp} \cdot V_o}{Q_{\dot{a}.i}}, \text{ мг/м}^3$$

де n<sub>cp</sub> – середня концентрація пилу в пилогазовій хмарі, мг/м<sup>3</sup>.

Концентрація шкідливих газів в гірській масі (C<sub>2</sub>), яка розпушується вибухом, може визначатися за формулою [4]:

$$C_2 = \frac{N_2 \cdot A \cdot K}{10 \cdot Q_{\dot{a}.i} \cdot (k_p - 1)} \text{ мг/м}^3,$$

де N<sub>2</sub> – кількість шкідливих газів у відбитій гірській масі, л/кг; Q<sub>ā.i.</sub> – об'єм відбитої гірської маси, м<sup>3</sup>; k<sub>p</sub> – коефіцієнт розпушення гірської маси.

Кількість шкідливих газів (Q<sub>i</sub>), які виділилися в атмосферу кар'єру з пилогазовою хмарою, дорівнює:

$$Q_i = C_1 \cdot V_o \cdot 10^6.$$



Кількість шкідливих газів ( $Q_2$ ), які виділилися в атмосферу кар'єру з відбитої гірської маси, дорівнює:

$$Q_2 = C_2 \cdot V_o \cdot 10^6.$$

Загальна кількість шкідливих газів ( $Q$ ), що виділилися в атмосферу кар'єра при вибуху одного блоку з пилогазовою хмарою, дорівнює:

$$Q = Q_1 + Q_2.$$

Отримані числові величини концентрації шкідливих речовин в пилогазовій хмарі коригуються з урахуванням конструкції свердловинних зарядів [6] та атмосферних опадів (табл.1, табл. 2) [7].

Таблиця 1

Розсіювання пилогазової хмари при випаданні різних типів атмосферних опадів

| Тип опадів    | Кількість пиловидних фракцій, що осаджуються з пилогазової хмари за певний проміжок часу, $t^*$ , % |               |               |
|---------------|---|---------------|---------------|
|               | Без вітру   | Слабкий вітер | Сильний вітер |
| Сонце         | –   | –             | –             |
| Дощ           | 10-15   | 15-20         | 30-35         |
| Дощ з грозою  | 15-20   | 20-25         | 35-40         |
| Дощ із снігом | 20-30   | 25-35         | 40-45         |
| Сильний дощ   | 30-40   | 35-45         | 45-55         |
| Сніг          | 40-45   | 45-50         | 55-65         |
| Мжичка        | 45-60   | 50-65         | 65-70         |
| Туман         | 60-70   | 65-70         | 70-80         |

$t^*$  – час розсіювання пилогазової хмари (залежить від конфігурації кар'єрного простору та геометричних параметрів, типу ВР та гірських порід, їх обводненості).

Таблиця 2

Поглинання  $NO_x$  з пилогазової хмари різними типами випадаючих атмосферних опадів

| Тип опадів    | Кількість $NO_x$ , що вступають в хімічну реакцію з краплинами $H_2O$ за певний проміжок часу, $t^*$ , % |               |               |
|---------------|--|---------------|---------------|
|               | Без вітру  | Слабкий вітер | Сильний вітер |
| Сонце         | 1  | 1             | 1             |
| Дощ           | 0,9-0,85   | 0,86-0,80     | 0,70-0,65     |
| Дощ з грозою  | 0,86-0,80  | 0,81-0,75     | 0,66-0,60     |
| Дощ із снігом | 0,81-0,70  | 0,76-0,65     | 0,61-0,55     |
| Сильний дощ   | 0,71-0,60  | 0,66-0,55     | 0,56-0,45     |
| Сніг          | 0,70-0,79  | 0,80-0,89     | 0,90-0,99     |
| Мжичка        | 0,56-0,40  | 0,51-0,35     | 0,36-0,30     |
| Туман         | 0,41-0,30  | 0,36-0,30     | 0,31-0,20     |

Зниження шкідливих викидів в навколишнє середовище, в першу чергу оксидів азоту та пилу, можливо досягти за рахунок удосконалення конструкцій свердловинних зарядів із застосуванням різного виду нейтралізуючих домішок. Такими домішками слугують хімічно-активні речовини, які вводяться в склад набійки, а також рідини, якими зрошують повітря та блок після вибуху.

Крім того, змінюючи конструкцію свердловинного заряду, можна регулювати ступінь розпушення порід.

Повітряні, водні та інертні проміжки забезпечують значне зменшення викидів отруйних газів та пилу в навколишнє середовище. При цьому питомі витрати вибухової речовини знижуються до 20%, зменшується кількість заколів та сейсмічний ефект вибуху.

Значно зменшується відстань розповсюдження пилогазової хмари за рахунок зменшення висоти її підйому, що досягається при застосуванні неелектричної системи ініціювання типу «Імпульс» та ін. Окрім того, необхідно зазначити, що на висоту

підйому пилогазової хмари впливає також зміна вертикальних градієнтів температур, метеорологічних умов.

З аналізу літературних джерел [8, 9] слідує, що зі збільшенням градієнтів температури ( $\gamma$ ) концентрація забрудненого повітря значно зменшується при  $\gamma \leq 0,8$  °C/100 м; за умови  $\gamma \geq 0,8-1$  °C/100 м вплив температури не буде спричиняти на пилогазову хмару особливого впливу, і в цьому випадку відбувається підйом пилогазової хмари. Очевидно, що швидкість підйому буде збільшуватися при умовах  $\gamma \rightarrow 0$  (рис. 1). Оскільки існує залежність висоти підйому пилогазової хмари від градієнта температур, а останній, очевидно, буде змінюватися при проведенні підривних робіт зимових та літніх умовах. Загалом висота підйому пилогазової хмари в цих умовах буде змінюватися залежно від типу застосованої ВР без зміни її кількості. Вивчаючи зміну висоти підйому пилогазової хмари та вплив на неї глибини кар'єру, враховуючи зміну градієнтів температури, швидкості

вітру, необхідно відмітити, що на її зміну значний вплив завдає не швидкість вітру, а саме різниця на відмітці дно-поверхня.

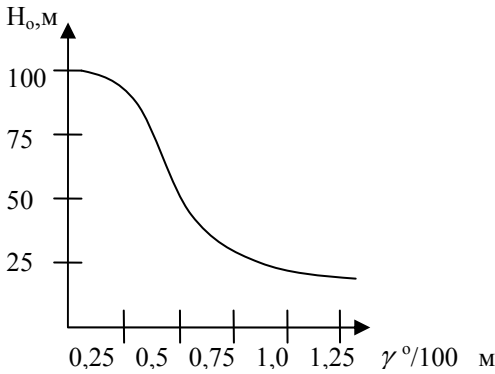


Рис. 1. Зміна висоти підйому пилогазової хмари від зміни градієнта температури

Так, при швидкості вітру менше 4 м/с, як показали аналітичні дослідження, підйом ПГХ здійснюється вертикально (рис. 2)

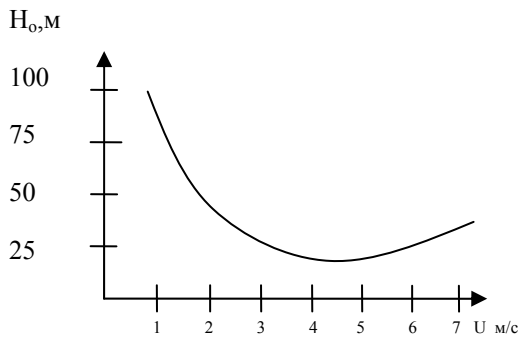


Рис. 2. Зміна висоти підйому пилогазової хмари від швидкості повітря

При зміні фронтів повітряних мас, при збільшенні швидкості повітря більш ніж 4 м/с пилогазова хмара під дією повітряних потоків підіймається вгору та збільшує концентрацію в верхніх перешаруваннях повітря. При цьому відмітимо, що висота підйому пилогазової хмари та концентрація пилу та газів при проведенні масових вибухів в зимовий та літній періоди значно змінюється, оскільки збільшується різниця температур пилогазової хмари та навколишнього середовища.

При проведенні підричних робіт в зимових умовах (рис. 3) висота підйому пилогазової хмари збільшується в порівнянні з літніми, виходячи зі зміни градієнта температури та швидкості вітру відносно відмітки, на якій відбуваються підричні роботи по відношенню до глибини кар'єру.

З рис. 3 видно, що збільшення швидкості вітру на поверхні кар'єру приблизно діє на підняття пилогазової хмари як зимою, так і влітку однаково. При цьому концентрація пилу в пилогазовій хмарі в

проміжках, вказаних на рис. 3, градієнти температури в літку (крива 2) при всіх швидкостях вітру значно більше чим взимку (крива 1).

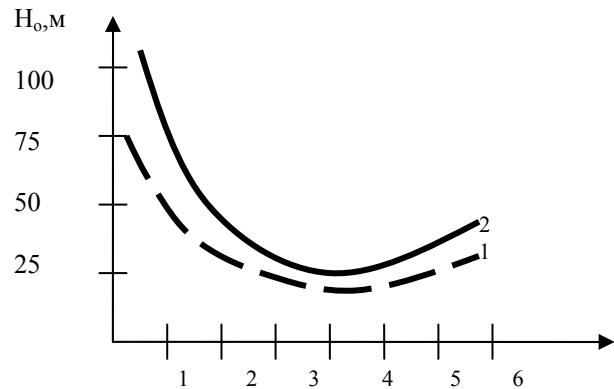


Рис. 3. Вплив швидкості вітру, градієнта температури на висоту підйому пилогазової хмари після проведення масового вибуху: 1 –  $-0,60 \leq \gamma \leq 0,60$ ; 2 –  $0,61 \leq \gamma \leq 1,40$

Водяна набійка свердловин є одним із способів зменшення вилітання в атмосферу кар'єру шкідливих речовин при проведенні масових вибухів. Тому головними задачами забезпечення високого рівня екологічної безпеки та надійності масових вибухів на даному етапі є:

- створення наукових основ еколого-вибухового моніторингу навколишнього природного середовища;
- розробка принципів екологічної та економічної оцінки впливу різних факторів, зумовлених вибуховими роботами;
- визначення ефективності заходів з охорони навколишнього природного середовища, розробка шляхів оптимізації проектування та впливу вибухових робіт на навколишнє природне середовище.

Зауважимо, що при збільшенні довжини набійки кількість вилітаючих в атмосферу кар'єру шкідливих речовин зменшиться в 2-5 разів. Таким чином, врахувавши зазначені вище фактори, можна зменшити, окрім витрат на проведення буропідричних робіт, санітарно-захисну зону від дії промислових масових вибухів до 5-10 разів без зміни об'єму розпушеної гірської маси.

### Список літератури

1. Зберовский А.В. Охрана атмосферы в экосистеме «карьер – окружающая среда – человек». – Д.: РИО АП ДКТ, 1997. – 136 с.
2. Пацера С.В. Особенности загрязнения окружающей природной среды при производстве массовых взрывов на горнорудных карьерах // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць / Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України. – Д., 2007. – Вип. 72. – 190 с.

3. Гопанюк Д.Г., Швець В.Ю., Пацера С.В. Способи уменьшення забруднення оточуючої природної середовища від діяльності вибухових робіт при руйнуванні гірських порід // Науковий вісник НГУ. – 2005. – № 12. – С. 99-101.
4. Проблеми екології масових вибухів в кар'єрах / Э.И. Ефремов, П.В. Бересневич, В.Д. Петренко и др. – Д.: Січ, 1996. – 178 с.
5. Сборник методик по расчету выбросов в атмосферу загрязняющих веществ различными производствами. – Л.: Гидрометеоздат, 1986. – 183 с.
6. Коротенко Л.М., Пацера С.В., Ворон Е.А. Влияние метеорологических условий на загрязнение окружающей среды при производстве массовых взрывов на карьерах // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць / Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України.– Д., 2006. – Вип. 65. – 186 с.

7. Пацера С.В. Влияние типа конструкции скважинных зарядов на распространение пылегазового облака за пределы карьерного поля после производства массовых взрывов // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць / Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України. – Д., 2006. – Вип. 64. – 186 с.
8. Химия нижней атмосферы: Пер. с англ. / Под ред. С. Разула. – М.: Мир, 1976. – 407 с.
9. Численная модель гидрометеорологического режима загрязнения промышленных районов / Пененко В.В., Алоян А.Е., Бажин Н.М., Скубневская Г.И. // Метеорология и гидрология. – 1984. – № 4. – С. 5-15.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. А.Ю. Дриженком 23.01.09*

УДК 622.323

**А.А. Редько, А.П. Кононенко**

## **ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЦИРКУЛЯЦИОННЫХ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ СИСТЕМ**

Наведено результати розрахункових оцінок енергетичних витрат при різних способах підйому води в циркуляційній геотермальній системі. Показана більш висока ефективність ергазліфтної технології у порівнянні з насосною технологією експлуатації.

Приведены результаты расчетных оценок энергетических затрат при различных способах подъема воды в циркуляционной геотермальной системе. Показана более высокая эффективность эргазлифтной технологии по сравнению с насосной технологией эксплуатации.

The results of calculation estimates of energy expenditure in different ways of water lifting in circulating geothermal system are presented. Higher efficiency of air-gaslift technique as compared with pumping operation methods is demonstrated.

**Введение.** В условиях длительного периода эксплуатации геотермального месторождения снижаются пластовое давление и дебит скважин. Скважины переводятся из режима фонтанирования в насосный режим эксплуатации; в последующем, часть нагнетательных, а в последнем периоде эксплуатации, все нагнетательные скважины переводятся в режим эксплуатации циркуляционных скважин.

Для повышения эксплуатационной эффективности геотермального месторождения необходим переход от экстенсивной фонтанной к интенсивной циркуляционной технологии с увеличением дебита эксплуатационных скважин в 3-5 раз путем принудительного подъема геотермальной воды и удешевлением в 1,5-2 раза теплопродукции.

**Цель работы** – анализ различных технологических схем подъема геотермальной воды в эксплуатационной скважине для увеличения дебита и количества извлекаемой теплоты.

**Насосный режим эксплуатации.** Главным препятствием для широкого перехода от фонтанной к

циркуляционной технологии с естественными коллекторами является недостаточная эффективность имеющихся средств принудительного подъема геотермального теплоносителя, без которых, из-за чрезмерных утечек и малого фонтанного дебита, ни действительной циркуляции, ни позитивных экономических результатов получить нельзя [1-4]. Ведутся поиски создания высокопроизводительных средств принудительного подъема геотермального теплоносителя.

Оптимальный дебит эксплуатационных скважин с учетом затрат на буровые работы и обустройство скважин, затрат на эксплуатационные расходы (в основном, на электроэнергию насосов) составляет около 300-400 м<sup>3</sup>/ч [2]. При насосной эксплуатации с использованием насосов отечественного производства дебит скважин может быть обеспечен около 30-70 м<sup>3</sup>/ч, некоторые зарубежные образцы могут обеспечить дебит около 200-300 м<sup>3</sup>/ч.

Для глубинной откачки геотермальной воды применяют центробежные артезианские насосы. При максимальной подаче предельная высота подъема



воды составляет не более 100-150 м, при этом требуется установка верхней обсадной трубы диаметром 300 мм. При диаметрах скважин 200-250 мм могут использоваться насосы артезианские турбинные с подачей до 70 м<sup>3</sup>/ч.

Например, насосы фирмы (Vogel Pumpen) Lowara (Италия) обеспечивают номинальную производительность 80 л/с (288 м<sup>3</sup>/ч) и напор 250 м с установленной мощностью двигателя 318 кВт. Однако для его установки необходимо увеличить диаметр скважины до 13" (325 мм), что приведет к удорожанию буровых работ.

**Эрлифтный режим эксплуатации.** Увеличение периода фонтанирующего режима эксплуатации геотермальных скважин возможно путем подачи воздуха или газа в эксплуатируемую скважину. При подаче газа в эксплуатируемую скважину образуется газожидкостная смесь, плотность которой ниже плотности воды, что при заданном перепаде давлений между давлениями пластовой воды и давлением устья скважины приводит к увеличению дебита скважины. Энергия нагнетаемого сжатого воздуха (или газа), во многом определяемая глубиной погружения смесителя (устройства ввода газа в поток капельной жидкости), позволяет изменить напорную характеристику эксплуатируемой скважины и обеспечить увеличение ее пропускной способности.

**Методика расчета эрлифта.** Уравнение стационарного восходящего вертикального движения двухкомпонентного снарядного течения имеет вид:

$$-\frac{dp(z)}{dz} = \frac{4 \cdot \tau_{\dot{n}0}(z)}{D} + \frac{d}{dz} \{G''(z) \cdot w''(z) \cdot \varphi(z) + G'(z) \cdot w'(z) \cdot [1 - \varphi(z)]\} + \rho_{\dot{m}}(z) \cdot g \quad (1)$$

где  $p(z)$  – давление в сечении трубы на расстоянии  $z$  от смесителя;  $\tau_{\dot{n}0}(z)$  – касательное напряжение;  $D$  – диаметр подъемной трубой;  $w'(z)$  и  $w''(z)$  – истинные скорости жидкости и газа;  $G'(z)$  и  $G''(z)$  – массовые скорости соответственно жидкости и газа;  $\rho_{\dot{m}}(z)$  – плотность водовоздушной смеси;  $\varphi(z)$  – истинное газосодержание водовоздушной смеси;  $g$  – ускорение свободного падения.

Массовые скорости газообразной  $G''(z)$  и жидкостной  $G'(z)$  фаз с учетом уравнения неразрывности движения соответственно равны:

$$G''(z) = \frac{Q_a \cdot \rho_0''}{\omega \cdot \varphi(z)} = \frac{G \cdot x}{\varphi(z)}, \quad (2)$$

$$G'(z) = \frac{Q_v \cdot \rho_0'}{\omega \cdot [1 - \varphi(z)]} = \frac{G \cdot (1 - x)}{1 - \varphi(z)}, \quad (3)$$

где  $Q_a$  – объемный расход воздуха (газа) при нормальных условиях;  $Q_v$  – объемная подача эрлифта;  $\omega$  – площадь сечения подъемной трубы;  $\rho_0''$  – плотность воздуха при нормальных условиях;  $\rho_0'$  – плотность воды;  $x$  – массовое расходное газосодержание;  $G$  – массовая скорость водовоздушной смеси.

Плотность смеси  $\rho_{см}(z)$  в модели раздельного течения описывается выражением:

$$\rho_{\dot{m}}(z) = \omega(z) \cdot \rho''(z) + [1 - \varphi(z)] \cdot \rho'. \quad (4)$$

Учитывая, что массовая скорость водовоздушной смеси  $G$  величина постоянная, выражение (1) примет вид:

$$-\frac{dp(z)}{dz} = \frac{4 \cdot \tau_{\dot{n}0}(z)}{D} + G \cdot \frac{d}{dz} [x \cdot w''(z) + (1 - x) \cdot w'(z)] + \{\varphi(z) \cdot \rho''(z) + [1 - \varphi(z)] \cdot \rho'\} g. \quad (5)$$

Действительные скорости фаз в подъемной трубе:

а) воды

$$w'(z) = \frac{Q_v}{\omega \cdot [1 - \varphi(z)]}; \quad (6)$$

б) воздуха

$$w''(z) = \frac{Q_a}{\omega \cdot \varphi(z)}. \quad (7)$$

Принимая допущение линейности изменения давления по высоте подъемной трубы и интегрируя выражение (5) для участка подъемной трубы эрлифта длиной  $z_i$  (где  $0 \leq z_i \leq H+h$ , где  $H$  – высота подъема эрлифта,  $h$  – геометрическое погружение смесителя), получаем выражение

$$\begin{aligned} p_{\dot{m}} \frac{z_i}{H+h} &= \frac{4}{D} \int_0^{z_i} \tau_{\dot{n}0}(z) dz + \\ &+ G \cdot [x \cdot w''(z) + (1 - x) \cdot w'(z)] \Big|_0^{z_i} + \\ &+ g \int_0^{z_i} \{\varphi(z) \cdot \rho''(z) + [1 - \varphi(z)] \cdot \rho'\} dz, \end{aligned} \quad (8)$$

которое можно представить в виде:

$$\delta_{\Sigma i} = \delta_{\dot{o} \dot{d} i} + \delta_{\dot{o} \dot{n} \dot{e} i} + \delta_{g i}, \quad (9)$$

где  $\delta_{\Sigma i}$  – суммарный перепад давления на участке подъемной трубы длиной  $z_i$ :

$$\delta_{\Sigma i} = \delta_{\dot{m}} \frac{z_i}{H+h}; \quad (10)$$

$\delta_{\dot{o} \dot{d} i}$  – перепад давления на участке подъемной трубы длиной  $z_i$  обусловленный трением:

$$\delta_{\dot{o} \dot{d} i} = \frac{4}{D} \int_0^{z_i} \tau_{\dot{n}0}(z) dz; \quad (11)$$

$\delta_{\dot{o} \dot{n} \dot{e} i}$  – перепад давления на участке подъемной трубы длиной  $z_i$ , обусловленный ускорением:

$$\delta_{\dot{o} \dot{n} \dot{e} i} = G \cdot [x \cdot w''(z) + (1 - x) \cdot w'(z)] \Big|_0^{z_i}; \quad (12)$$

$\delta_{g i}$  – перепад давления на участке подъемной трубы длиной  $z_i$ , обусловленный силой тяжести:

$$\delta_{g i} = g \int_0^{z_i} \{\varphi(z) \cdot \rho''(z) + [1 - \varphi(z)] \cdot \rho'\} dz. \quad (13)$$

Касательные напряжения  $\tau_{\bar{m}i}$  и истинные газосодержания  $\varphi$  вычисляются по эмпирическим выражениям [5].

Суммарная мощность, необходимая для компенсации потерь на трение, ускорение и гравитационной составляющей при движении водовоздушного потока со средним объемным расходом  $Q_{cpi}$  по участку вертикальной подъемной трубы длиной  $z_i$  определяется выражением

$$N_{\Sigma i} = P_{\Sigma i} Q_{cpi} = P_{Ni} \frac{G\omega}{H+h} \int_0^{z_i} \frac{dz}{\rho_{Ni}(z)}. \quad (14)$$

Мощность, необходимая для компенсации потерь на трение

$$N_{\delta \delta i} = \delta_{\delta \delta i} \cdot Q_{\bar{n}i} = \frac{4 \cdot G \cdot \omega}{D \cdot z_i} \int_0^{z_i} \tau_{\bar{n}i}(z) dz \cdot \int_0^{z_i} \frac{dz}{\rho_{\bar{n}i}(z)}. \quad (15)$$

Мощность, необходимая для компенсации потерь на ускорение

$$N_{\delta \delta \delta i} = \delta_{\delta \delta \delta i} \cdot Q_{\bar{n}i} = \left[ x \cdot w''(z) + (1-x) \cdot w'(z) \right] \int_0^{z_i} \frac{G^2 \cdot \omega}{z_i} \cdot \frac{dz}{\rho_{\bar{n}i}(z)}. \quad (16)$$

Мощность, необходимая для преодоления силы тяжести

$$N_{gi} = \delta_{gi} \cdot Q_{\bar{n}i} = g \cdot \frac{G \cdot \omega}{z_i} \int_0^{z_i} \rho_{\bar{n}i}(z) dz \cdot \int_0^{z_i} \frac{dz}{\rho_{\bar{n}i}(z)}. \quad (17)$$

Суммарная мощность (15) складывается из составляющих (15), (16) и (17)

$$N_i = N_{\delta \delta i} + N_{\delta \delta \delta i} + N_{gi}. \quad (18)$$

Мощность, подведенная на участке трубы длиной  $z_i$  потоком сжатого воздуха

$$N_i'' = \delta_0 \cdot Q_{\bar{a}} \cdot \ln \frac{\delta_0 + \delta_{\bar{m}i}}{\delta_0 + \delta_{\bar{m}i} \cdot \left( 1 - \frac{z_i}{H+h} \right)}, \quad (19)$$

где  $p_0$  – атмосферное давление;  $p_{cm}$  – избыточное давление в смесителе.

Мощность, подведенная к подъемной трубе потоком воды

$$N' = \delta_{\bar{m}i} \cdot Q_y. \quad (20)$$

Мощность, необходимая для компенсации потерь на скольжение фаз при движении водовоздушного потока

$$N_{\bar{n}ei} = N_{i\bar{a}i} - N_i. \quad (21)$$

где  $N_{i\bar{a}i}$  – мощность, подведенная водовоздушным потоком:

$$N_{i\bar{a}i} = N_i'' + N'. \quad (22)$$

Решения уравнений (1)–(22) выполняется численным методом по разработанной программе [4].

**Основные результаты.** Расчеты выполнены по исходным данным: расход воздуха при нормальных условиях  $Q_{\bar{a}}$ , м<sup>3</sup>/мин – 0,1-10; диаметр подъемной трубы  $D$ , м – 0,146, 0,246; длина подъемной трубы  $H+h$ , м – 205-505; высота подъема воды  $H$ , м – 5-

55; эквивалентная шероховатость трубы  $\Delta_y$  – 0,0002; геометрическое погружение смесителя  $h$ , м – 200; диаметр эксплуатационной трубы, м – 0,146; 0,246; длина эксплуатационной трубы, м – 1595; касательные напряжения вычислены по формуле Арманда-Невструевой, истинное газосодержание – по формуле Арманда.

Теплофизические параметры воздуха и воды приняты следующие: плотность воды и воздуха соответственно равны 1000 и 1,2 кг/м<sup>3</sup>; динамическая вязкость воды  $1 \cdot 10^{-3}$  Па·с; динамическая вязкость воздуха  $1,79 \cdot 10^{-5}$ ; коэффициент поверхностного натяжения – 0,0723 Н/м; показатель политропы – 1,0.

Уменьшение давления по ходу движения водовоздушной смеси в подъемной трубе эрлифта приводит к увеличению объемного расхода воздуха и соответствующих изменений объемного расхода и истинного газосодержания и скорости компонентов потока. В [5] подтверждена допустимая правомерность линейного закона изменения давления газожидкостного потока в вертикальной трубе. Анализ гидродинамических параметров водовоздушного потока и его компонентов выполняется в выбранных сечениях подъемной трубы (по высоте подъемной трубы  $H+h$ ) при каждом заданном расходе воздуха  $Q_{\bar{a}}$ .

**Анализ результатов.** Ниже, в качестве примера, приведены результаты расчета параметров водовоздушной смеси в скважине диаметром 0,146 м с длиной подъемной трубы  $H+h = 205$  м и геометрическим погружением смесителя  $h = 200$  м при изменении расхода воздуха от 0,1 до 1,0 м<sup>3</sup>/мин.

Объемное расходное газосодержание увеличивается от  $\beta = 0,025-0,030$  на уровне смесителя ( $\bar{z} = 0$ ) до  $\beta = 0,28-0,34$  на уровне выхода из подъемной трубы ( $\bar{z} = 1$ , где  $\bar{z} = z/(H+h)$ ) (рис. 1).

Истинное газосодержание вследствие скольжения фаз имеет меньшее, чем расходное газосодержание, значение и равно  $\varphi = 0,015$  при  $\bar{z} = 0$  и  $\varphi = 0,15-0,218$  при  $\bar{z} = 1$  (рис. 1).

Плотность газожидкостной смеси из-за расширения воздуха по высоте подъемной трубы уменьшается от  $\rho_{cm} = 991,5-980,2$  кг/м<sup>3</sup> при  $z = 0$  до  $\rho_{cm} = 848,4-714,1$  кг/м<sup>3</sup> при  $z = H+h = 205$  м. Безразмерная зависимость  $\bar{\rho}_{\bar{n}i} = f(\bar{z})$  построена для базисного значения плотности смеси (рис. 2), равного  $\rho_{cm} = 980,2$  кг/м<sup>3</sup>, а значения безразмерной плотности водовоздушной смеси находятся в пределах  $\bar{\rho}_{\bar{n}i} = 1,0-0,72$ .

Приведенная скорость воды в подъемной трубе имеет постоянное значение по всей длине трубы и составляет  $w'_0 = 0,45-1,9$  м/с. Приведенная скорость воздуха увеличивается от  $w''_0 = 0,0045-0,05$  м/с при  $z = 0$  до  $w''_0 = 0,1-0,99$  м/с при  $z = H+h = 205$  м, а приведенная скорость смеси изменяется от  $w_{\bar{n}i} = 0,45-1,95$  м/с при  $z = 0$  до  $w_{\bar{n}i} = 0,55-2,1$  м/с при  $z = H+h = 205$  м. Истинная скорость воды на всем протяжении подъемной трубы имеет меньшее значе-

ние, чем приведенная скорость смеси  $w_{\bar{m}}$  и составляет  $w' = 0,45-1,94$  м/с при  $z = 0$  и  $w' = 0,53-2,66$  м/с при  $z = H+h = 205$  м. Истинная скорость воздуха превышает значение приведенной скорости смеси  $w_{\bar{m}}$  и соответственно равна  $w'' = 0,54-2,35$  м/с при  $z = 0$  и  $w'' = 0,66-3,49$  м/с при  $z = H+h = 205$  м.

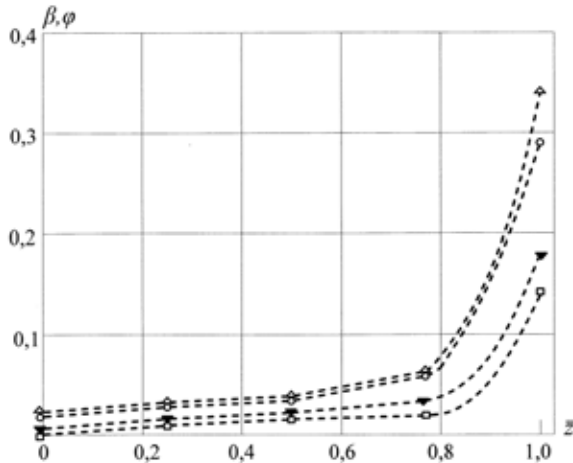


Рис. 1. Изменение воздуходержаний по высоте подъемной трубы эрлифта (базисное значение  $z = 205$  м):  $\blacktriangledown, \Delta$  – объемное расходное газодержание  $\beta = f(\bar{z})$ ,  $\square, \circ$  – истинное газодержание  $\phi = f(\bar{z})$  ( $\blacktriangledown, \square - Q_a = 0,1 \text{ м}^3/\text{мин}$ ;  $\Delta, \circ - Q_a = 1,0 \text{ м}^3/\text{мин}$ )

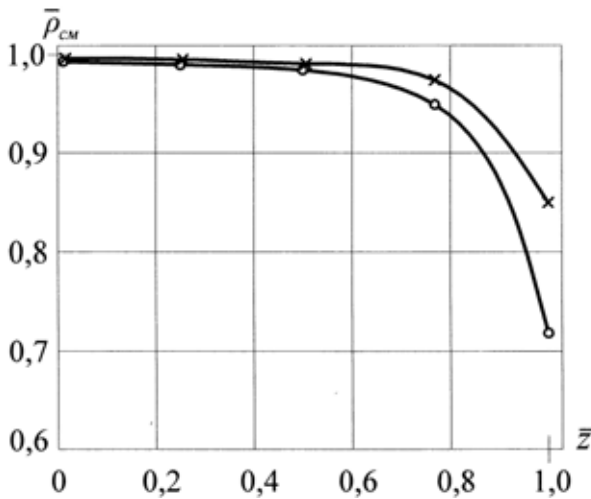


Рис. 2. Изменение относительной плотности водовоздушной смеси по высоте подъемной трубы эрлифта  $\bar{\rho}_{cm} = f(\bar{z})$  (базисные значения  $z = 205$  м,  $\rho_{cm} = 980,2 \text{ кг/м}^3$ ;  $\times - Q_a = 0,1 \text{ м}^3/\text{мин}$ ;  $\circ - Q_a = 1,0 \text{ м}^3/\text{мин}$ )

При построении безразмерных зависимостей  $\bar{w}'_0 = f(\bar{z})$ ,  $\bar{w}''_0 = f(\bar{z})$ ,  $\bar{w}_{\bar{m}} = f(\bar{z})$ ,  $\bar{w}' = f(\bar{z})$ ,

$\bar{w}'' = f(\bar{z})$  в качестве базисного значения принято значение приведенной скорости воды, равное  $w'_0 = 0,45$  м/с (рис. 3).

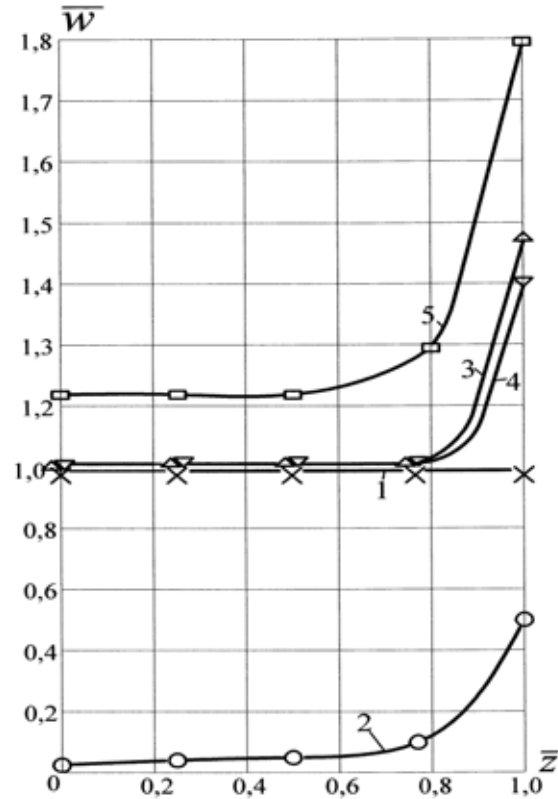


Рис. 3. Изменение относительных скоростей водовоздушной смеси и ее компонентов по высоте подъемной трубы эрлифта: 1 – приведенная скорость воды  $\bar{w}'_0 = f(\bar{z})$ ; 2 – приведенная скорость воздуха  $\bar{w}''_0 = f(\bar{z})$ ; 3 – приведенная скорость водовоздушной смеси  $\bar{w}_{\bar{m}} = f(\bar{z})$ ; 4 – истинная скорость воды  $\bar{w}' = f(\bar{z})$ ; 5 – истинная скорость воздуха  $\bar{w}'' = f(\bar{z})$  (базисные значения  $z = 205$  м,  $w'_0 = 0,45$  м/с)

Значение истинной скорости воды на выходе из подъемной трубы определяет динамические нагрузки на воздухоотделитель и является базовой величиной при расчете его долговечности.

При построении математической модели рабочего процесса эрлифта принято допущение о линейности изменения суммарного давления  $\bar{\delta}_\Sigma$  по высоте подъемной трубы. Практически линейно изменяются и составляющие суммарного давления, обусловленные силой тяжести  $\bar{\delta}_g$ , трением  $\bar{\delta}_{\delta\delta}$  и ускорением  $\bar{\delta}_{\delta\delta\delta}$ . При построении безразмерных зависимостей  $\bar{\delta} = f(\bar{z})$ ,  $\bar{\delta}_g = f(\bar{z})$ ,  $\bar{\delta}_{\delta\delta} = f(\bar{z})$ ,  $\bar{\delta}_{\delta\delta\delta} = f(\bar{z})$  (рис. 4) в качестве базисного принято значение суммарного давления, равное  $\bar{\delta}_\Sigma = 19,9 \text{ кгс/см}^2$  (1,95 МПа).

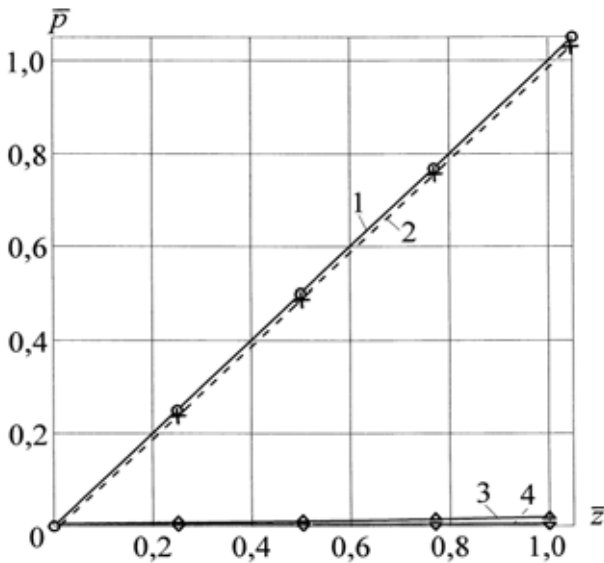


Рис. 4. Изменение относительных давлений по высоте подъемной трубы эрлифта: 1 –  $\bar{p}_z = f(\bar{z})$ ; 2 –  $\bar{p}_g = f(\bar{z})$ ; 3 –  $\bar{p}_{\delta\delta} = f(\bar{z})$ ;  $\bar{p}_{\delta\delta\delta} = f(\bar{z})$  [базисные значения  $z = 205$  м,  $\delta = 19,9$  кгс/см<sup>2</sup> (1,95 МПа)]

Суммарная подведенная мощность монотонно увеличивается от  $N_{iia} = 62,4$  кВт при  $z = 0$  до  $N_{iia} = 67,3$  кВт при  $z = H+h = 205$  м. Мощность, подведенная к подъемной трубе потоком воды, определяется подачей эрлифта, геометрическим погружением системы и сопротивлением подающей трубы и составляет  $N' = 62,4$  кВт. Мощность, подводимая сжатым воздухом, увеличивается из-за увеличения перепада давлений от  $N'' = 0$  при  $z = 0$  до  $N'' = 4,98$  кВт при  $z = H+h = 205$  м.

При построении безразмерных зависимостей (рис. 5)  $\bar{N}_{iia} = f(\bar{z})$ ,  $\bar{N}' = f(\bar{z})$ ,  $\bar{N}'' = f(\bar{z})$ ,  $\bar{N} = f(\bar{z})$  в качестве базисного принято значение суммарной подведенной мощности, равное  $N_{iia} = 67,3$  кВт.

Монотонно увеличиваясь по высоте подъемной трубы, изменяются и мощности:

– а) компенсирующая силу тяжести –  $N_g = 0$  при  $z = 0$   $N_g = 64,3$  кВт при  $z = H+h = 205$  м;

– б) компенсирующая потери на трение –  $N_{\delta\delta} = 0$  при  $z = 0$ ,  $N_{\delta\delta} = 2,09$  кВт при  $z = H+h = 205$  м;

– в) компенсирующая потери на ускорение –  $N_{\delta\delta\delta} = 0$  при  $z = 0$ ,  $N_{\delta\delta\delta} = 0,05$  кВт при  $z = H+h = 205$  м.

Количественные распределения давлений и мощностей снарядного газоводяного потока для выполненных вариантов расчетов скважины составляют:  $\bar{p}_g = 60-80\%$ ,  $\bar{p}_{\delta\delta} = 25-40\%$ ,  $\bar{p}_{\delta\delta\delta} < 4\%$ ,  $\bar{N}_g = 15-60\%$ ,  $\bar{N}_{\delta\delta} = 5-25\%$ ,  $\bar{N}_{\delta\delta\delta} < 3\%$ ,  $\bar{N}_{\delta\delta\delta} = 15-75\%$ .

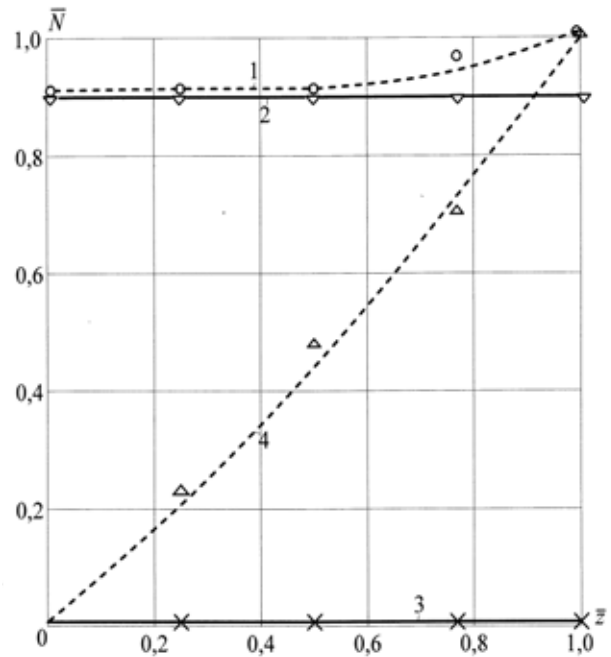


Рис. 5. Изменение относительных мощностей по высоте подъемной трубы эрлифта: 1 –  $\bar{N}_{iia} = f(\bar{z})$ ; 2 –  $\bar{N}' = f(\bar{z})$ ; 3 –  $\bar{N}'' = f(\bar{z})$ ; 4 –  $\bar{N} = f(\bar{z})$  (базисные значения  $z = 205$  м,  $N_{iia} = 67,3$  кВт)

Анализ расходных характеристик скважин диаметром 146 мм при эрлифтной эксплуатации показал следующее: изменение расхода воздуха от 0,1 до 1,0 м<sup>3</sup>/мин позволяет увеличить дебит скважины до 120 м<sup>3</sup>/ч при глубине расположения смесителя 200 м и высоте подъема 5 м. При увеличении высоты подъема воды до 55 м и уменьшении глубины погружения смесителя до 150 м дебит скважины уменьшается до 25 м<sup>3</sup>/час, при глубине погружения смесителя 175 м и высоте подъема воды 30 м дебит скважины составляет около 40 м<sup>3</sup>/ч. Увеличение расхода воздуха до 8-10 м<sup>3</sup>/мин обеспечивает увеличение дебита скважины диаметром 146 мм до 200-225 м<sup>3</sup>/ч.

При увеличении диаметра скважины до 246 мм ее дебит существенно увеличивается при прочих равных условиях. Так, при глубине погружения смесителя 200 м и высоте подъема воды 5 м дебит скважины увеличивается до 400-525 м<sup>3</sup>/ч при расходе воздуха 4-6 м<sup>3</sup>/мин (рис. 6).

**Газлифтный режим эксплуатации.** В работах [2, 3] приводятся перспективные идеи о применении вместо воздуха сжиженного легкокипящего газа (углекислота, фреон, изобутан и др.), при вводе которого в жидкость образуется смесь, по мере подъема формирующаяся в эмульсионную или снарядную структуры потока, обеспечивающие значительные дебиты в подъемной трубе.

По данным [2] на установке эрлифтного подъема воды с применением двухфазной пены (добавка 0,1% сульфанола) наблюдалось резкое увеличение производительности подъема. Применение пены исключает

ет нерациональные режимы движения водовоздушной смеси, как кольцевая (пленочная), а также обеспечивает коррозионную защиту оборудования.

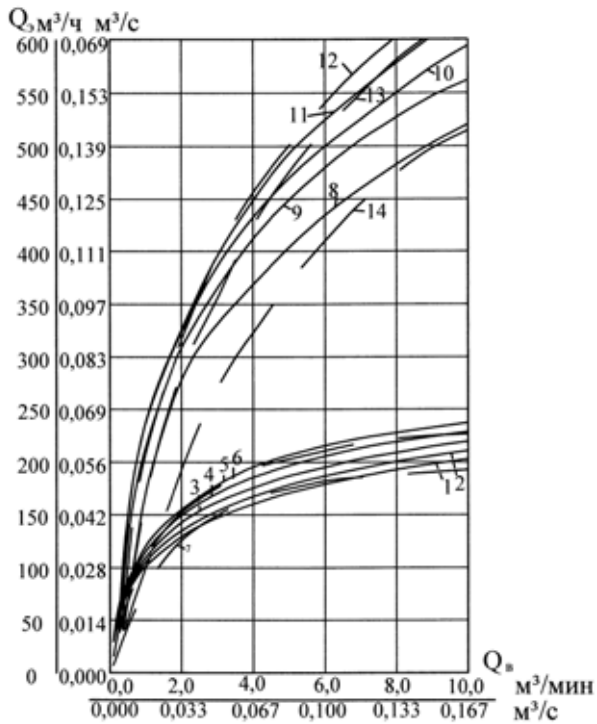


Рис. 6. Зависимость дебита скважины от расхода воздуха: а –  $D = 146$  мм;  $H = 5$  м; 1 –  $h = 500$  м; 2 –  $h = 400$  м; 3 –  $h = 300$  м; 4 –  $h = 200$  м; 5 –  $100$  м; 6 –  $h = 50$  м; 7 –  $h = 20$  м; б –  $D = 246$  мм;  $H = 5$  м; 8 –  $h = 505$  м; 9 –  $h = 405$  м; 10 –  $h = 305$  м; 11 –  $h = 205$  м; 12 –  $105$  м; 13 –  $h = 55$  м; 14 –  $h = 25$  м

В [3] указывается, что для повышения эффективности ГеоТЭС разработана схема со вскипанием рабочего тела непосредственно в эксплуатационной скважине, работающей в режиме газлифта. Не исключается возможность циркуляции низкокипящей жидкости через ГЦС с парообразованием за счет теплообмена с горячими породами.

В [3] приведены сведения о лабораторных исследованиях структуры газожидкостной смеси. При выделении газа из раствора происходит создание высокодисперсных структур. Результаты лабораторных опытов показали, что приготовление насыщенного раствора углекислоты в воде с последующим введением его в подъемник без применения диспергирующих устройств приводило к созданию высокодисперсных эмульсионных структур.

В [6] изучались самоциркулирующие системы отопления зданий и охлаждения легкокипящим теплоносителем агрегатов с высоким тепловыделением. В данной работе рассматривается технологическая схема системы газлифта с циркуляцией легкокипящего теплоносителя (рис. 7) в подъемной трубе. Система работает следующим образом: сжиженный газ по опускной трубе с помощью дозирующего насоса подается в эксплуатируемую скважину на требуемую

глубину. Сжиженный газ растворяется в геотермальной воде и по мере подъема испаряется, образуя паровоздушную смесь, что обеспечивает подъем воды. В сепараторе происходит отделение газа от воды. Далее газ охлаждается и конденсируется в конденсаторе и с помощью дозирующего насоса снова подается в эксплуатируемую скважину. Теплота конденсации отводится либо в систему отопления, либо в систему горячего водоснабжения. Изменения термодинамических параметров сжиженного газа при движении в замкнутой системе показано на рис. 8. Образованный замкнутый цикл (1-2-3-4) характеризует эффективность термодинамического насоса, обеспечивающего подъем воды в системе газлифта.

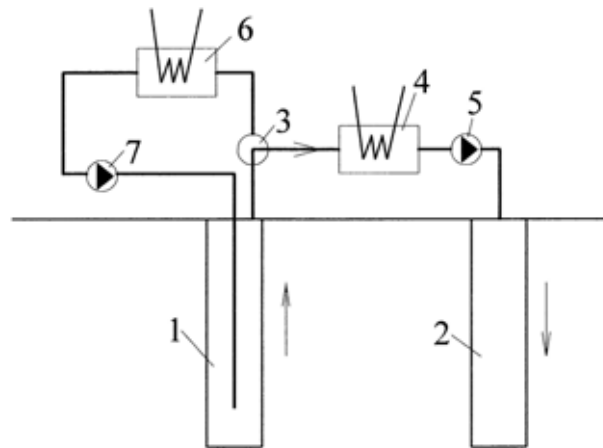


Рис. 7. Технологическая схема газлифтного подъема воды со сжиженным газом: 1, 2 – соответственно эксплуатационная и нагнетательная скважины; 3 – сепаратор; 4 – теплообменник; 5, 7 – насосы; 6 – конденсатор

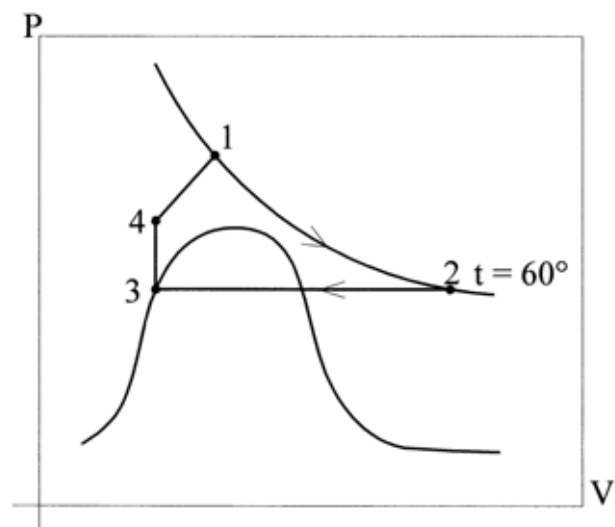


Рис. 8. Изменение термодинамических параметров легкокипящего теплоносителя в циркуляционной системе

В данном цикле процесс 1-2 – изотермическое расширение низкотемпературного теплоносителя при его движении от точки ввода до устья скважины, 2-3 – процесс изобарного охлаждения и конденсации теплоносителя, 3-4 – процесс сжатия в дозирующем насосе, 4-1 – сжатие теплоносителя при движении к точке ввода.

Расчет гидравлических режимов газлифта выполняется по методике расчета эрлифта. Предполагается, что сжиженный газ вскипает мгновенно или на небольшом участке подъемной трубы.

Сравнение насосного и эргазлифтного режимов эксплуатации скважин позволяет утверждать, что газлифтный режим характеризуется значительно меньшими энергетическими затратами и определяется в основном установленной мощностью дозирующего насоса, которая ниже мощности компрессора в эрлифтной технологической системе и дозирующего насоса с низкой производительностью в насосной технологии.

Так, для обеспечения дебита геотермальной воды около  $300 \text{ м}^3/\text{ч}$  ( $80 \text{ л/с}$ ) компрессор должен обеспечивать мощность 180-200 кВт и производительность 4-5  $\text{м}^3/\text{мин}$ , в то время как требуемая производительность дозирующего насоса и его установленная мощность может быть существенно, в несколько раз, снижена.

### Выводы

Таким образом, анализируя результаты выполненных расчетов энергетических характеристик

средств подъема воды в технологических системах извлечения геотермальной энергии, можно отметить перспективность применения эргазлифтной технологии, особенно с циркуляцией в ней сжиженного газа, обеспечивающей увеличение дебита воды в 2,5-5 раз и снижение энергозатрат.

### Список литературы

1. Богуславский Э.И. Техничко-экономическая оценка освоения тепловых ресурсов недр / Э.И. Богуславский – Л.: ЛГИ, 1984. – 267 с.
2. Дядькин Ю.Д. Разработка геотермальных месторождений / Ю.Д. Дядькин. – М.: Недра, 1989. – 229 с.
3. Муравьев И.М. Основы газлифтной эксплуатации скважин / И.М. Муравьев, В.И. Ямпольский. – М.: Недра, 1973. – 184 с.
4. Локшин Б.А. Использование геотермальных вод для теплоснабжения / Б.А. Локшин – М.: Стройиздат, 1974. – 152 с.
5. Кононенко А.П. Теорія і робочий процес ерліфтів / А.П. Кононенко – Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Х.: НГУ ХПІ, 2007. – 34 с.
6. Новохацкий Е.М. Отопительное устройство с естественной циркуляцией / Е.М. Новохацкий, А.Д. Харлампиди, А.В. Ромашко. – А.с. СССР № 1054552. – Оpubл. в Б.И., 1983. – № 42.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. О.М. Кузьменком 17.02.09*

УДК 614.89

В.Є. Колесник, С.І. Чеберячко, Д.І. Радчук, Н.С. Литвин

## ОЦІНКА ДОСТОВІРНОСТІ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО ВИЗНАЧЕНИХ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ПРОТИПИЛОВИХ РЕСПІРАТОРІВ

Проаналізовано методи дослідження протипилових респіраторів. Оцінена достовірність якості показників, що експериментально визначають під час проведення відповідних випробувань на лабораторних стендах за різними методиками.

Выполнен анализ методов исследования противопылевых респираторов. Дана оценка достоверности качества показателей, которые экспериментально определяют при проведении соответствующих испытаний на лабораторных стендах различными методиками.

The methods of particulate respirators research are analysed. The validation of results quality evaluation which experimentally defines at carrying out of corresponding tests at laboratory stands by various test techniques is given.

Протипилові респіратори є важливим засобом захисту працівників від захворювань на пневмоконіоз та пилові бронхіти. Від їх якості залежить і продуктивність праці, оскільки респіратори є додатковим джерелом навантаження на систему дихання людини. Отже, важливо встановити їх реальні показники захисної ефективності та опору диханню, тобто основні параметри оцінки засобів індивідуального захисту органів дихання (ЗІЗОД), від яких також залежить достовірність розрахунку величин пилового навантаження і працездатності людини. Для визначення згаданих показників раніше використовували стандартні методики, перелік яких наведено в ГОСТ 12.041–89. Однак з 2004 року в Україні вступили в дію гармонізовані з європейськими нормативні акти, які являють собою вимоги до випробування ЗІЗОД, а також перелік методів та методик їх проведення. При цьому перед спеціалізованими випробувальними лабораторіями виникає завдання з оцінки похибок вимірювання конкретних показників респіраторів, без вирішення якого не можна отримати дозвіл від контролюючих органів на проведення заявлених випробувань. Завдання ускладнюється відсутністю в європейських стандартах методик з оцінки згаданої похибки визначених показників, на відміну від вітчизняних, де після описаних процедур з визначення результатів вимірювань наведено, як перевірити їх достовірність. Отже, завдання з оцінки достовірності отриманих показників якості ЗІЗОД при випробуваннях за новими гармонізованими ДСТУ є ак-

туальним. У рамках поставленого завдання проаналізуємо методи дослідження протипилових респіраторів й оцінимо достовірність показників їх якості, що експериментально визначають при проведенні відповідних випробувань на лабораторних стендах.

Захисну ефективність протипилових респіраторів визначають експериментально за допомогою встановлення коефіцієнта проникнення [1]

$$K_r = \frac{\tilde{N}}{\tilde{N}_0}, \quad (1)$$

де  $C$  – концентрація шкідливої речовини у підмасковому просторі респіратора,  $\text{мг/м}^3$ ;  $C_0$  – концентрація шкідливої речовини в повітрі навколишнього середовища,  $\text{мг/м}^3$ .

На рис. 1 наведено принципову схему випробувань респіратора для визначення його захисної ефективності –  $K_n$ . Випробування проводяться наступним чином. У генератор аерозолів, що містить спеціальну рідину, подають стисле повітря. Утворений там тест-аерозоль надходить до змішувальної камери, де його розбавляють чистим повітрям до необхідної концентрації, а потім подають у камеру, де утворену аерозольну суміш пропускають через респіратор. За допомогою лічильника аерозольних частинок визначають вхідну та вихідну концентрацію тест-аерозолу і розраховують  $K_n$  за формулою (1).

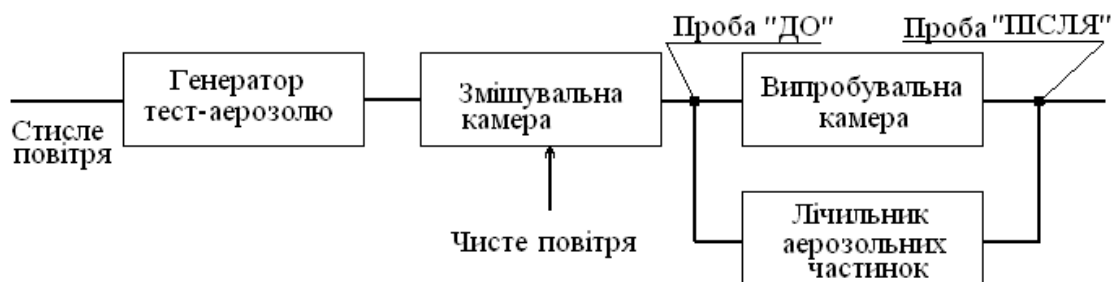


Рис. 1. Принципова схема випробувань респіратора за тест-аерозолями

Другий важливий показник – опір диханню  $R$  – визначають за перепадом тиску, що виникає за рахунок проходження через ЗІЗОД певної кількості повітряного потоку (рис. 2).

Перепад фіксується мікроманометром, а опір визначається за формулою [2]

$$R = (n_i - n_0) K_1$$

де  $n_i$  – відлік опору за мікроманометром, мм. вод. ст.;  $n_0$  – власний опір мікроманометра, мм. вод. ст.;  $K_1$  – поправковий коефіцієнт на температуру та атмосферний тиск.

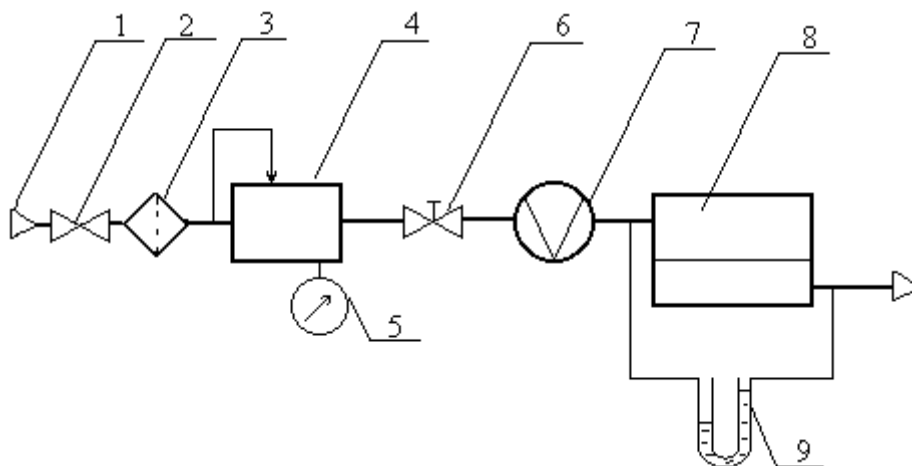


Рис. 2. Принципова схема для визначення опору ЗІЗОД постійному повітряному потоку: 1 – вхід з агістралі; 2 – нерегулюючий вентиль; 3 – фільтр для очищення повітря; 4 – редуктор-стабілізатор; 5 – манометр; 6 – регулюючий вентиль; 7 – діафрагма; 8 – випробувальна камера; 9 – мікроманометр

В європейських стандартах за основу взято інший підхід до оцінки якості ЗІЗОД, хоча методи досліджень принципово однакові. До відмінностей, насамперед, необхідно віднести процедуру підготовки респіраторів до випробувань, що передбачена в стандартах країн Європейської Співдружності (EN 136; EN 140; EN 143; EN 149), але відсутня у вітчизняних нормативах. Її сутність полягає в тому, що одна серія зразків, яка у більшості випадків складається з трьох (іноді двох) респіраторів або фільтрів, спочатку піддається температурному впливу протягом 24 год при  $+70^\circ\text{C}$ , а потім при  $-30^\circ\text{C}$  – такої ж тривалості, між якими час переходу до наступного випробування не менше 4 год за кімнатної температури. Друга серія зразків проходить «моделювання режиму носіння», коли крізь фільтрувальні півмаски, закріплені на «шеффілдському» муляжі голови, пропускається двосторонній повітряний потік (для імітації вдиху видиху) із штучним зволоженням повітря та температурою  $37 \pm 2^\circ\text{C}$ . Третя серія зразків піддається механічному впливу (імітація низькочастотної вібрації) і витримує тест на займистість, тобто ЗІЗОД підносять до відкритого полум'я з температурою  $800^\circ\text{C}$ . Крім того, за ДСТУ EN 149-2003 випробовують захисні вироби не тільки з рівнем витрати повітря 30 л/хв, як було раніше, а й 95 л/хв.

Зрозуміло, що величини захисної ефективності та опору дихання, визначені після процедур передбачених «підготовкою», будуть відрізнятися між серіями зразків, що ускладнює встановлення істинного результату через можливі значні розбіжності показників. Враховуючи, що кожна серія складається з трьох

ЗІЗОД, досить складно оцінити похибку кінцевого результату по кожній із процедур передбаченою «підготовкою». Спробуємо довести це на прикладі розрахунку достовірності отриманих результатів за вітчизняними та гармонізованими з європейськими методиками з визначення основних показників протипилових респіраторів.

Розрахунок загальної похибки результатів вимірювання виконують відповідно до ГОСТ 8.207-76 «Прямі вимірювання з багаторазовими спостереженнями. Методи обробки результатів спостереження». Результат складається з середньоквадратичного відхилення – випадкової похибки і систематичної похибки, що залежить від засобів вимірювання.

Для визначення випадкової похибки, відповідно до [3, 4], розраховують середнє значення кількості виробів:

$$\bar{R} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i,$$

де  $n$  – кількість виробів для випробування;  $R_i$  – показник, визначений дослідним шляхом для  $i$ -го виробу.

Середньоквадратичне відхилення  $S$  розраховують за формулою

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^2}. \quad (2)$$

Виключають аномальні результати, визначивши співвідношення  $U_{max}$  або  $U_{min}$  за формулами



$$U_{\max} = (R_{\max} - \bar{R}) / S \text{ або} \quad (3)$$

$$U_{\min} = (\bar{R} - R_{\min}) / S, \quad (4)$$

де  $R_{\max}$ ,  $R_{\min}$  – відповідно максимальна і мінімальна величина отриманого у досліді показника з вибірки.

Отримані значення  $U_{\max}$  і  $U_{\min}$  порівнюють з граничним значенням критерію  $\beta$  [2] при типовому рівні значимості  $\alpha = 0,05$ . Якщо  $U_{\max} \geq \beta$  або  $U_{\min} \geq \beta$ , тоді результат спостереження  $R_{\max}$  або  $R_{\min}$ , відповідно аномальний і повинний бути виключений з вибірки. У протилежному випадку результат вважають нормальним і його не виключають. Після виключення аномального значення знову визначають середнє значення  $\bar{R}$  і обчислюють  $S'$ .

Визначають відносне середньоквадратичне відхилення результату виміру за формулами

$$S' = S / \sqrt{n} \quad (5)$$

або за умов малої вибірки

$$S' = S' / \sqrt{n-1}. \quad (6)$$

Знаходять довірчий інтервал випадкової похибки результату

$$\varepsilon = tS',$$

де  $t$  – коефіцієнт Ст'юдента, який залежить від довірчої ймовірності  $p$  і кількості спостережень  $n$ , вибирається за таблицею.

Результат розрахунків подають у вигляді

$$R = \bar{R} \pm \varepsilon.$$

Систематичну похибку від засобів вимірювання встановлюють за формулою

$$\theta = k \sqrt{\sum_{i=1}^m \theta_i^2},$$

де  $k$  – коефіцієнт, який визначається за вибраною довірчою ймовірністю;  $\theta_i = \frac{100\Delta_i}{X_i}$  – межа систематичної похибки  $i$ -го засобу вимірювання.

Тут  $\Delta_i$  – похибка  $i$ -го засобу вимірювання;  $X_i$  – значення вимірюваної величини на  $i$ -му засобі вимірювання.

З метою розрахунку похибки вимірювань коефіцієнта проникнення за тест-аерозолями та опору дихання і встановлення оптимальної кількості спостережень згідно з вітчизняними і гармонізованими методиками випробувань якості ЗІЗОД, було відібрано декілька десятків протипилових респіраторів

ШБ-1 «Лепесток-200» виробництва НВП «Стандарт» (м. Дніпропетровськ).

На першому етапі визначалися основні показники декількох серій респіраторів відповідно до вимог ГОСТ 12.4.028-76 [5]. Перша серія складалась з трьох зразків, а кожна наступна збільшувалась на три респіратора. Далі за формулами (2)-(6) були розраховані середні значення результатів вимірювань для кожної серії ЗІЗОД та їх відносне середньоквадратичне відхилення. Результати наведені на рис. 3 та 4, де суцільні лінії – відповідні тренди.

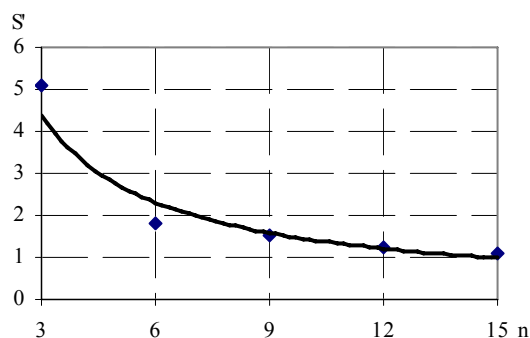


Рис. 3. Залежність величини відносного середньоквадратичного відхилення опору диханню від кількості випробуваних зразків

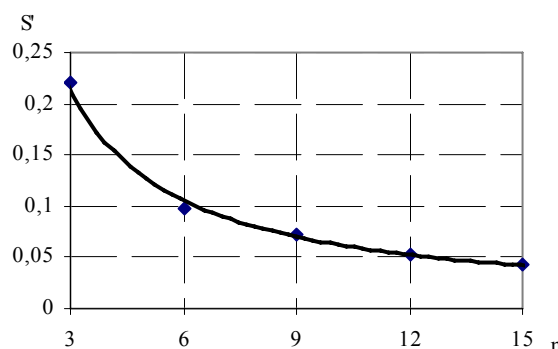


Рис. 4. Залежність величини відносного середньоквадратичного відхилення коефіцієнта проникнення за тест-аерозолями від кількості випробуваних зразків

Як бачимо, зі збільшенням кількості спостережень величина відносного середньоквадратичного відхилення зменшується. За числа респіраторів, що приблизно більше десяти, зміною цієї величини можна нехтувати. Отже, для забезпечення достовірності вимірювань кількість досліджуваних зразків, в даному випадку, повинна складати не менше десяти.

На другому етапі проводилися випробування ЗІЗОД за методиками, наведеними у гармонізованих ДСТУ EN 149-2003, що передбачають описану вище процедуру підготовки респіраторів.

Для визначення оптимальної кількості спостережень, також були підготовлені декілька серій зразків, які відрізнялись кількістю респіраторів (в кожній наступній – на три більше). Перед визначенням коефіцієнта проникнення й опору диханню за тест-

аерозолем парафінової оливи певна кількість дослідних ЗІЗОД піддавалась температурному впливу, а інша проходила «модельовання режиму носіння». Потім досліджувалися указані показники і за формулою (5) розраховувалось відносне середньоквадратичне відхилення для кожної серії зразків (рис. 5 і 6).

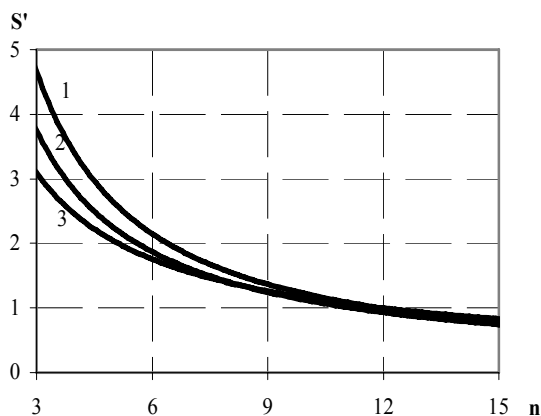


Рис. 5. Залежності величини відносного середньоквадратичного відхилення опору диханню від кількості спостережень: 1 – зразки без попередньої підготовки; 2 – зразки, що піддавались температурному впливу; 3 – зразки, що проходили «режим носіння»

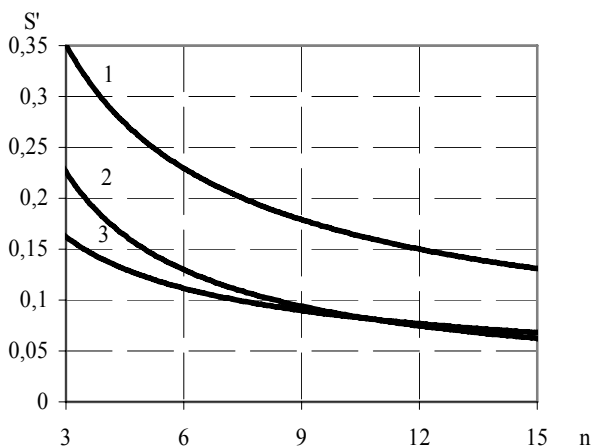


Рис. 6. Залежність величини відносного середньоквадратичного відхилення коефіцієнта проникнення за тест-аерозолем парафінова олива від кількості спостережень: 1 – зразки без попередньої підготовки; 2 – зразки, що піддавались температурному впливу; 3 – зразки, що проходили «режим носіння»

Аналізуючи побудовані графіки, робимо висновок, що відносне середньоквадратичне відхилення отриманих результатів, як і в попередньому випадку, мало змінюється при кількості зразків більше десяти, а процедури попередньої підготовки покращують однорідність показників якості ЗІЗОД. Це особливо помітно при отриманні величини коефіцієнта проникнення за тест-аерозолем, коли відхилення для одна-

кової кількості звичайних зразків майже вдвічі більші, ніж у зразків, що пройшли попередню підготовку.

Проведені дослідження на вибраних зразках протипилових респіраторів показали високу ймовірність похибки при визначенні показників якості на серії з трьох зразків, як це передбачено гармонізованими стандартами, хоча, враховуючи проходження процедур підготовки, загальна кількість зразків складає більше дванадцяти і начебто достатня для отримання високої достовірності вимірювань.

Проте попередня підготовка значно впливає, зокрема, на коефіцієнт проникнення за тест-аерозолем, що майже удвічі збільшує діапазон межі випадкової похибки і ускладнює визначення класу захисту респіратора. Отже, кількість зразків у серіях бажано збільшувати з трьох до десяти.

При цьому, якщо проводити весь комплекс досліджень, передбачених новим стандартом, для забезпечення високої достовірності знадобиться суттєво більше часу на підготовку та проведення необхідних обсягів досліджень, що призведе до значного здороження випробувань.

Виходом з цієї ситуації, на наш погляд, є урахування режиму експлуатації ЗІЗОД і проведення спеціалізованими лабораторіями тільки тієї попередньої підготовки зразків, для подальшого визначення їх показників, що відповідає майбутній сфері застосування респіраторів.

**Висновки**

Таким чином, було досліджено методики, за якими перевіряються основні показники протипилових респіраторів. Встановлено, що методики в гармонізованих з європейськими Стандартах не забезпечують достатньої вірогідності випробування, тому для підвищення точності отриманих результатів необхідно збільшити кількість випробувань зразків та скоригувати перелік методик випробувань.

**Список літератури**

1. Лепесток (Легкие респираторы) / Петрянов И.В., Кошечев В.С., Басманов П.И. и др. – М.: Наука, 1984. – 218 с.
2. Методика выполнения измерений сопротивления постоянному потоку воздуха фильтрующих коробок к противогазам и респираторам, респираторов, фильтров респираторов и фильтрующих материалов: РНД 37.001-2001 / Разраб. НГАУ. – Д., 2001. – 12 с.
3. Новиков В.М., Коцуба А.М. Основы метрологии та метрологічна діяльність. Частина 2: Навч. посіб. – К.: Нора-прінт, 2001. – 210 с.
4. Володарський Є.Т., Кошева Л.О. Статистична обробка даних: Навч. посіб. – К.: НАУ, 2008. – 308 с.
5. ГОСТ 12.4.028-76. ССБТ. Респираторы ШБ-1 «Лепесток». Технические условия.

Рекомендовано до публікації д.т.н. В.І. Голіньком 26.02.09

УДК 687.17

Л.Д. Третьякова

## ВИБІР ТА ОЦІНКА ЗАХОДІВ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ЗАСОБІВ ІНДИВІДУАЛЬНОГО ЗАХИСТУ

Розглянуто проблему вибору економічно доцільного рівня надійності засобів індивідуального захисту персоналу АЕС. Запропоновано структурні математичні моделі та сформульовано цільову функцію оптимізації за показниками надійності та вартості виробів з урахуванням систем резервування.

Рассмотрена проблема выбора экономически обоснованного уровня надежности средств индивидуальной защиты персонала АЭС. Предложены структурные математические модели и сформулирована целевая функция оптимизации, которая учитывает изменение стоимости при возрастании надежности изделий с учетом систем резервирования.

The problem of choosing the economically proved level of the individual protective equipment reliability was observed in this article. There was offered the structured mathematical models and optimization function, which deals with the price changing in case of increasing the level of the reliability.

Підвищений ступінь небезпеки атомної енергетики пов'язаний передусім з величезною енергоємністю ядерних реакторів. Вирішення проблеми охорони праці персоналу – предмет особливої уваги, спрямований на зниження нещасних випадків і зменшення ризиків виникнення професійних захворювань. Накопичений досвід експлуатації засвідчив, що навіть найвищі вимоги до якості устаткування не спроможні унеможливити аварійні ситуації. Усвідомлення такого факту сприяло формуванню підходу до ядерних енергоустановок як до об'єктів підвищеної небезпеки, що потребують застосування спеціальних заходів і систем забезпечення охорони праці [1]. Під час нормальної експлуатації устаткування атомних електричних станцій (АЕС) на працівників великою мірою впливають шкідливі і небезпечні виробничі фактори – робота з небезпечними хімічними і біологічними речовинами, іонізуючі випромінювання, підвищені температури, пил, електромагнітні поля та ін. 28,5% виробничого персоналу АЕС нині працює в шкідливих умовах, а 47,4% – в особливо шкідливих. Необхідними заходами зі зниження впливу шкідливих факторів є застосування засобів індивідуального захисту (ЗІЗ) під час регламентних та профілактично-ремонтних робіт (табл. 1).

Таблиця 1

Сучасний стан забезпечення персоналу АЕС засобами індивідуального захисту

| Види ЗІЗ          | Кількість ЗІЗ за роками, шт. |        |        |
|-------------------|------------------------------|--------|--------|
|                   | 2005                         | 2006   | 2007   |
| Захисний спецодяг | 33 964                       | 30 759 | 29 717 |
| Респіратори       | 14 838                       | 18 967 | 17 096 |
| Протигази         | 16 119                       | 14 194 | 15 250 |
| ЗІЗ ніг           | 28 364                       | 28 171 | 27 317 |
| ЗІЗ голови        | 28 912                       | 24 777 | 25 794 |
| ЗІЗ рук           | 35 260                       | 31 174 | 33 864 |

Аналіз багатьох техногенних аварій свідчить, що швидкий пошук джерела аварійної ситуації, вживан-

ня заходів щодо її ліквідації можливі лише в разі ефективних і чітких дій персоналу самого підприємства. Практика підтверджує, що аварійно-рятувальні служби, пожежні частини з огляду на свою дислокацію прибувають на місце з великим запізненням. Вочевидь, на кожному небезпечному об'єкті потрібно вживати екстрені заходи з ефективного запобігання розростанню аварійної ситуації і, як наслідок, мати ефективні й надійні засоби захисту персоналу, необхідні для виконання аварійних і післяаварійних операцій. Тільки захищена людина, відчуючи себе комфортно і впевнено, спроможна в разі нештатної ситуації, в тому числі внаслідок порушення технології, вжити ефективні заходи для ліквідації аварії, не допускаючи її розвитку, і тим самим різко знизити її вплив. Тому так важливо мати надійну систему захисту людини у виконанні нею небезпечних робіт, у тому числі аварійних.

Таким чином, на АЕС домінуючим став принцип забезпечення ефективними ЗІЗ із призначеною ймовірністю безвідмовної роботи, тобто з економічно доцільним рівнем надійності. З-поміж ЗІЗ за рівнем надійності виокремлено дві групи:

- вироби, яким потрібно забезпечити максимальний рівень надійності (герметичний і фільтрувальний одяг, протигаз, каска), оскільки виникнення непередбачених відмов становить загрозу життю працівників;
- вироби, для яких максимальна надійність бажана, але дотримання цієї вимоги не обов'язкове.

Для першої групи виробів забезпечують максимально можливий рівень надійності. У другій групі можна розглядати різні варіанти рішення, які забезпечують досягнення визначеного рівня надійності за певних витрат. Отже, існує деяке оптимальне значення надійності, за якого загальна вартість розробки, виготовлення й експлуатації мінімальна.

Мета дослідження – вирішити завдання знаходження оптимального заходу підвищення надійності, яке базується на визначенні оптимального співвідношення між показниками надійності, вар-

тості і кількістю резервних елементів. Об'єкт дослідження – оптимальна надійність невідновлюваних ЗІЗ, які застосовують в ізолювальних комплектах, призначених для робіт з дезактивації на АЕС. Предмет дослідження – динаміка зміни техніко-економічних показників ізолювального одягу під час підвищення надійності. Для визначення показників надійності та обґрунтування результатів використано ймовірні методи оцінки статистичних параметрів і графічно-аналітичні методи розрахунку і оптимізації.

Теорія надійності ґрунтується на ймовірнісно-статистичній природі самого феномена надійності. З великої кількості станів, у яких може перебувати система, виділяють підмножини, що різняться між собою з погляду показників надійності. Кількісну оцінку рівня надійності визначають як величину ймовірності безвідмовної роботи виробу  $P(t)$  у функції часу  $t$  і середнім часом безвідмовної роботи  $T_0$  [2]. Надійність ЗІЗ залежить від кількох факторів: фізико-механічних характеристик матеріалів і місць з'єднання деталей виробів; фізико-хімічних процесів, що прискорюють руйнування матеріалів, формуючи відмови. Водночас з'являється проблема встановлення кореляційних зв'язків між характеристиками цих процесів і показниками надійності, удосконалення методів розрахунку показників надійності виробів з урахуванням економічних факторів, пошук принципово нових способів підвищення надійності.

Інша важлива проблема – проблема знаходження правильних співвідношень між надійністю деталей і надійністю виробу або комплекту загалом. В основі надійної експлуатації захисних засобів закладено принцип структурної й функціональної надмірності. Необхідний рівень надійності можна досягти під час підвищення надійності окремих елементів конструкторсько-виробничими заходами або впровадженням систем резервування.

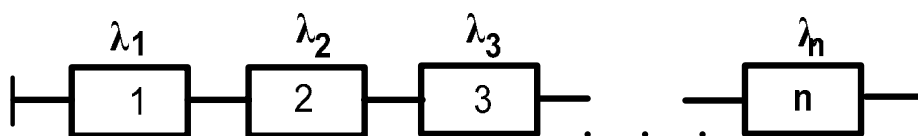


Рис. 1. Послідовна структурна схема захисного одягу

Припускають, що відмови елементів незалежні один від одного. Безвідмовна робота всього виробу – складний процес, імовірність якого є добутком ймовірностей безвідмовної роботи кожного елемента. У такий спосіб надійність виробу визначається

$$P_{\text{виробу}}(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t), \quad (1)$$

де  $P_i(t)$  – функція надійності  $i$ -го елемента;  $n$  – кількість елементів виробу.

Треба зазначити, що надійність елементів завжди менша за одиницю, і надійність виробу завжди зменшується під час зростання кількості послідовних елементів.

вання розглядають як надмірність елементів, які не мають прямого функціонального використання. Обмеження використання принципу надмірності встановлюють за допомогою ергономічних й економічних критеріїв. Необґрунтоване використання цього принципу призводить до неприпустимого збільшення розмірів, ваги, вартості виробів, внаслідок чого підвищення надійності спричиняє зниження інших показників технічного рівня. З погляду на це проблема оптимізації зводиться до вирішення певного техніко-економічного завдання зі знаходження оптимальної моделі розглянутого процесу, що характеризує підвищення надійності. Надійність визначаємо як функцію параметрів математичної моделі.

Побудова структурної математичної моделі надійності має на меті встановити зв'язок між елементами виробу, що дають змогу: визначити вихідні характеристики окремих елементів; встановити функціональні зв'язки між елементами, що утворюють у своїй сукупності структуру виробу. Модель може бути побудована таким чином, що для успішного її функціонування необхідна безвідмовність усіх елементів. Модель з такими властивостями називають послідовною. Моделі, в яких у разі відмови будь-якого елемента знайдеться інший елемент, здатний виконати його функції, називають паралельними. Часто виробу мають властивості і паралельних, і послідовних моделей.

Для захисних комплектів або окремих виробів використовуємо модель у вигляді системи з  $n$  простих елементів. Наприклад, елементами захисного одягу є матеріал, шви, оздоблювальні елементи; для ЗІЗ органів дихання – лицьова маска, фільтр-поглинач, з'єднувальний шланг, елементи обтірації і кріплення. За ознаками надійності ці елементи з'єднано послідовно (рис. 1), оскільки відмова одного елемента спричиняє порушення захисних властивостей усього виробу.

У період нормальної експлуатації надійність виробу зумовлена тільки непередбаченими відмовами, і надійність кожного елемента описується експоненціальним законом

$$P(t) = \exp(-\lambda t).$$

Звідси для послідовної моделі (рис. 1) визначаємо

$$P_{\text{виробу}}(t) = \exp(-\sum \lambda t), \quad (2)$$

де  $\lambda_i$  – інтенсивність відмов окремого елемента.

Така модель дає змогу виявити фактичні або потенційно вузькі місця виробу з погляду надійності і розробити заходи з їх усунення. Проаналізувавши вирази (1, 2), можна зробити такі висновки:

1. Надійність виробу можна підвищити за рахунок зменшення інтенсивності відмов для кожного елемента. Зменшення інтенсивності відмов можна досягти на етапі конструкторського розроблення або зміни технології виготовлення. Однак за суттєвого підвищення рівень надійності необхідно зменшити  $\lambda$ -характеристики в кілька разів. Для цього потрібно виконати роботи з розроблення і застосування нових матеріалів [3] або впровадження нових технологій виготовлення [4].

2. Надійність виробу підвищується під час зниження кількості використовуваних елементів. Однак за суттєвого підвищення надійності складного виробу це скорочення недосяжне. Сучасна тенденція з підвищення ергономічних і захисних вимог до ЗІЗ, забезпечення їх універсальності та багатофункціональ-

ності призводить до збільшення кількості захисних елементів. Наприклад, під час робіт з дезактивації водночас використовують бавовняний і ізолювальний одяг з полівінілхлорид (ПВХ) пластикату, респіратори, рукавиці, бахіли. Під час роботи в полях зовнішніх іонізуючих випромінювань використовують основні ЗІЗ у комплекті з радіозахисним одягом [5].

Для підвищення надійності до необхідного значення застосовують резервування, що дає змогу отримати великий ефект навіть за низького рівня надійності окремих елементів. Структурна модель виробів з резервними елементами формується як паралельна, складається з  $m$  підсистем і побудована таким чином, що її відмова відбувається лише в разі відмови всіх підсистем (рис. 2).

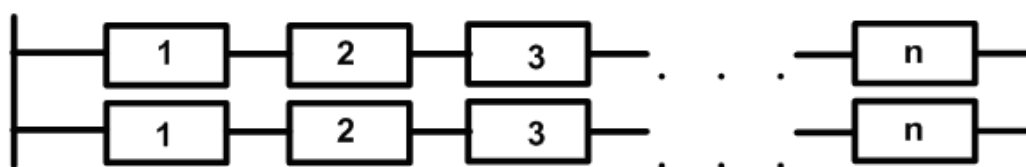


Рис. 2. Паралельна структурна схема захисного одягу

Властивість паралельності адекватно характеризує принцип резервування, оскільки у моделі є резервні елементи, що забезпечують її безвідмовну роботу за умов, коли відмовляє один або кілька базових елементів. Ступінь резервування характеризується процентним відношенням кількості елементів, які можуть виконувати певні функції без відмов, до загальної конструктивно-необхідної кількості елементів.

У сучасних ЗІЗ резервування використовують повсякчасно. Наприклад, у протигазах використовують два фільтри, протиаерозольні респіратори мають від двох до п'яти шарів. Пакет матеріалів захисного одягу виготовляють як багатшарову систему, шари якої з'єднують механічним (нитковим), хімічним (клеєвим), електричним (зварювання) або комбінованим способом. Фільтрувальний одяг для роботи в умовах хімічного й біологічного забруднення виготовляють з тришарового фільтроламінантного полотна: внутрішній шар – нетканий поліестер; середній – поліуретан з активованим вуглецем; зовнішній шар – трикотаж. Для підвищення надійності фільтроламінантне полотно покривають водостійкою камуфльованою тканиною. Для гасіння пожеж в умовах можливого забруднення довкілля радіонуклідними елементами на АЕС захисний костюм виготовляють: внутрішній шар – з прогумованого матеріалу з додаванням до нього окису свинцю; зовнішній шар – матеріал з жаростійким покриттям. Для робіт під час дії полів іонізуючого випромінювання персонал АЕС застосовує одяг, у якому внутрішній і зовнішній шари виготовлено з ПВХ-пластикату, а додаткові захисні елементи з матеріалу "Протектор 2000" встановлено між ними.

Резервування ЗІЗ завжди призводить до ускладнення їхньої конструкції, збільшення ваги, погіршення теплообмінних процесів, зростання вартості, однак підвищення надійності є визначальним фактором.

Надійність виробу з  $n$  елементів за загального резервування визначаємо:

$$P_{\text{аєдіає}}(t) = 1 - Q_{\text{аєдіає}}(t) = 1 - \left\{ (1 - P_a(t)) \cdot \prod_{i=1}^m (1 - P_p(t)) \right\}^m \quad (3)$$

де  $Q(t)$  – функція відмов;  $P_a(t)$  – функція надійності базового виробу;  $P_p(t)$  – функція надійності резервного виробу;  $m$  – кратність резервування.

Для ЗІЗ базовий виріб зазвичай резервують елементами, надійність яких однакова або перевищує базовий рівень. Використання резервування дає змогу підвищити надійність до необхідного рівня (рис. 3).

Оптимальна надійність відповідає умовам мінімізації сумарних витрат ( $C_{\text{сум}}$ ) на проектування, виготовлення ( $C_B$ ), експлуатацію ( $C_E$ ) і резервування ( $C_P$ ) виробів

$$\tilde{N}_{\text{аєдіає}} = \tilde{N}_A + \tilde{N}_P + \tilde{N}_\delta \rightarrow \min \quad (4)$$

Витрати  $C_B$  забезпечують збільшення терміну використання виробу і залежать від рівня інтенсивності відмов у період нормальної експлуатації виробу. Для оцінки впливу надійності на  $C_B$  запропоновано математичну модель у вигляді функції:

$$\tilde{N}_A = \tilde{N}_a \left( \frac{\lambda_0}{\lambda_1} \right)^\alpha \quad (5)$$

де  $C_\delta$  – базова вартість виробу за вихідною надійності  $P_0(t)$ ;  $\lambda_0$  – інтенсивність відмов за  $P_0(t)$ ;  $\lambda_1$  – інтенсивність відмов за  $P_1(t)$ .

Таку модель застосовують під час підвищення надійності виробів за рахунок зменшення інтенсивності відмов на етапі проектно-конструкторського розроблення. Коефіцієнт  $\alpha$  в моделі (5) підбирають таким чином, щоб у найкращий спосіб апроксимувати ре-

альну залежність вартості виробу від надійності. Цей коефіцієнт визначається додатковими витратами, що залежать від запропонованих способів підвищення надійності та організації виробництва у конкретного виробника.

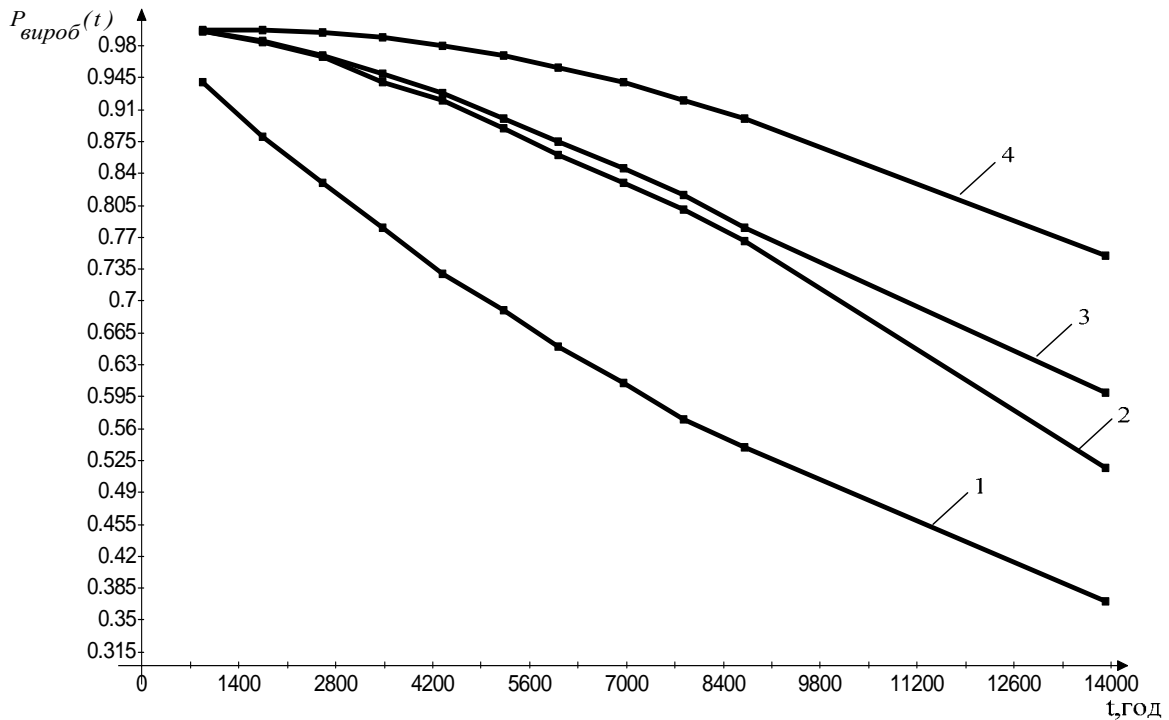


Рис. 3. Залежність функції надійності  $P(t)$  для ізолювального одягу з ПВХ пластикату: 1 – без резервування ( $\lambda_0=7,15 \cdot 10^{-5}$ ); 2 – за однократного резервування  $P_p=P_0$ ; 3 – за однократного резервування  $P_p > P_0$ ; 4 – за двократного резервування  $P_p=P_0$

Витрати  $C_E$  визначають зменшення витрат в процесі експлуатації виробів з підвищеним рівнем надійності. Вироби з підвищеним рівнем надійності мають більший термін напрацювання на відмову, витримують більшу кількість циклів дезактивації. Це зумовлює зменшення необхідної кількості додаткових виробів, які забезпечують безперервну роботу персоналу.

$$\tilde{N}_A = N \cdot \lambda_1 \cdot t \cdot C_B,$$

де  $N$  – кількість виробів, яку використовують на АЕС упродовж середнього терміну служби до списання  $T_{cp.сл.сп}$ . Для ізолювального одягу  $T_{cp.сл.сп}$  дорівнює два роки.

Максимальну кратність резервування  $M$  визначаємо за формулою

$$M = \frac{\ln(1 - P_{AD})}{\ln(1 - P_A)},$$

де  $P_{sp}$  – граничний рівень надійності виробу.

Для ЗІЗ звичайно використовують одно- або двократне резервування, що зумовлено обмеженнями за розмірами та вагою виробів. Витрати під час резервування визначаємо за формулою:

$$\tilde{N}_D = \dot{I} \cdot \tilde{N}_A.$$

Таким чином, цільова функція (4), яка встановлює зв'язок між параметрами надійності, вартості та надійності, набуває вигляду:

$$\tilde{N}_{\dot{a}} = N \left( C_{\xi} \left( \frac{\lambda_0}{\lambda_1} \right)^\alpha + t \cdot \lambda_1 \cdot C_{\xi} \left( \frac{\lambda_0}{\lambda_1} \right)^\alpha + M \cdot C_{\xi} \left( \frac{\lambda_0}{\lambda_1} \right)^\alpha \right). \quad (6)$$

Значення інтенсивності відмов  $\lambda_{opt}$ , яке відповідає оптимальному рівню надійності та мінімуму витрат, визначаємо після диференціювання виразу (6) за  $\lambda$

$$\lambda_{i \dot{\alpha}} = \frac{\alpha}{(1+M)(1-\alpha) \cdot t}. \quad (7)$$

Відповідно до формули (7) оптимальна надійність залежить тільки від кратності резервування, терміну експлуатації виробів і коефіцієнта  $\alpha$  (рис. 4). Залежності на рис. 4 дають змогу визначити ефективні заходи з підвищення надійності ізолювального одягу. Наприклад, визначимо за графіком 1 коефіцієнти  $\alpha_0$  і  $\alpha_{гр}$ , які відповідають вихідній надійності виробу  $P_0$  та надійності  $P_{sp}$ , необхідної для виконання робіт.

За таких умов порівняння фактичного коефіцієнта  $\alpha$  з  $\alpha_0$  і  $\alpha_{гр}$  дає змогу визначити, який спосіб підвищення надійності буде оптимальним:

1. Якщо  $\alpha \geq \alpha_0$ , що відповідає умові  $P_{10mm} \leq P_0$ , необхідне значення надійності  $P_{сп}$  можна отримати тільки за використання резервних елементів.

2. За умови  $\alpha < \alpha_0$  ( $P_{10mm} > P_0$ ), підвищення надійності можна досягти зменшенням інтенсивності відмов конструкторсько-виробничими заходами за ра-

хунок внесення змін під час проектного розроблення (рис. 4, табл. 1).

3. Якщо  $\alpha_{гр} < \alpha < \alpha_0$  ( $P_{сп} > P_{10mm} > P_0$ ), необхідно під час виготовлення підвищити надійність до рівня  $P_{10mm}$ , а за рахунок резервування (рис. 4, графіки 2, 3) підвищити надійність до необхідного рівня.

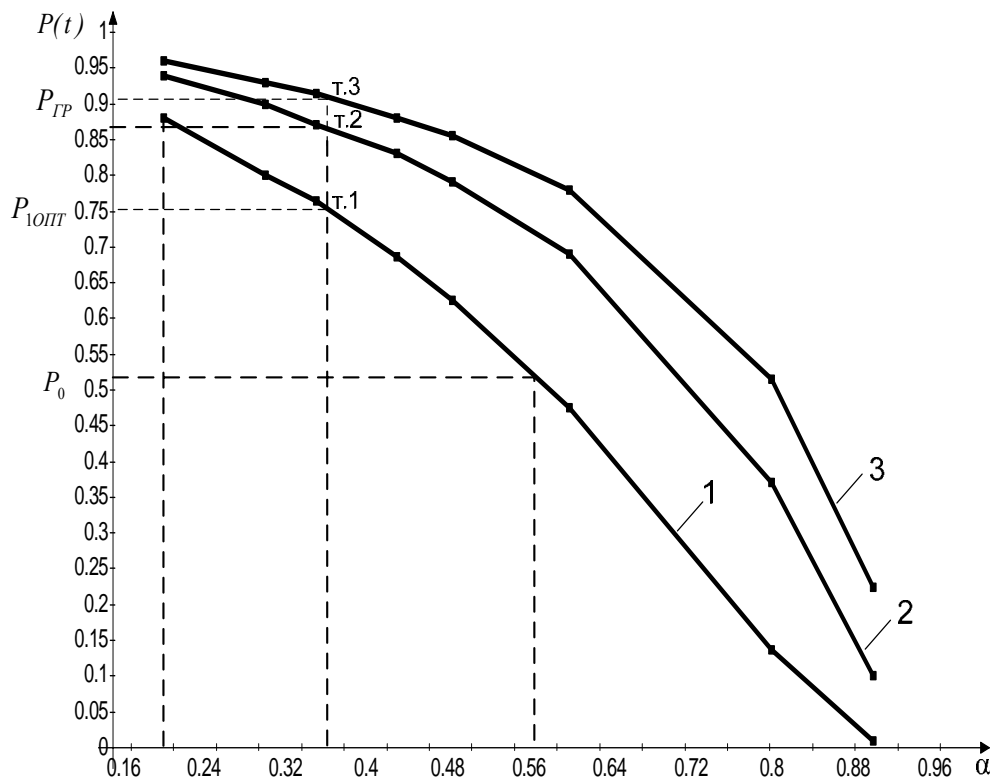


Рис. 4. Залежність  $P_{0mm}$  від коефіцієнта  $\alpha$ : 1 — без резервування; 2 — за однократного загального резервування; 3 — за двократного загального резервування

### Висновки

Виконання щоденних регламентних і ремонтно-профілактичних робіт на АЕС неможливе без застосування ефективних ЗІЗ з високим рівнем надійності.

Запропоновано структурні математичні моделі, за параметрами яких визначено функції надійності захисних засобів.

Сформульовано цільову функцію оптимізації показників надійності, в якій враховано складники витрат, безпосередньо пов'язаних з надійністю окремих елементів і виробу загалом, що дає змогу оцінювати економічність заходів з підвищення надійності й вибирати відповідні способи вирішення проблеми.

Визначено оптимальний рівень надійності на прикладі ізолювального одягу, який використовують під час ремонтно-профілактичних і дезактиваційних робіт на АЕС.

### Список літератури

1. Кузнецов В., Кузнецова Е. Безопасность эксплуатации объектов атомной энергетики // Стандарты и качество. — 2005. — № 9. — С. 42-45.
2. Кенделл М., Стюард А. Теория распределений: Пер. с англ. / Под ред. А.Н. Колмагорова. — М.: Наука, 1966. — 587 с.
3. Бузов Б.А., Алыменкова Н.Д. Материаловедение в производстве изделий легкой промышленности. — М.: Academia, 2004. — 384 с.
4. Литвиненко Г.Е., Третьякова Л.Д. Засоби індивідуального захисту: виготовлення та застосування. — К.: Лібра, 2008. — 317 с.
5. Третьякова Л.Д. Оцінка захисних властивостей нових засобів індивідуального захисту від іонізуючого випромінювання // Вісник НТУ України "КПІ": 36. наук. праць. — К., 2008. — Вип. 16. — С. 154-160.

Рекомендовано до публікації д.т.н. В.І. Голіньком 04.02.09



А.Л. Лозовой, В.Ф. Приходченко, Д.В. Рудаков, В.В. Манюк, Д.В. Гречищева

## ДВУМЕРНАЯ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКА ПО МЕТОДИКЕ ЭЛЕКТРОТОМОГРАФИИ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ О. ЗМЕИНЫЙ

Розглянуто можливість застосування різновиду двовимірної електророзвідки по методиці електричної томографії для вивчення геологічної і тектонічної будови о.Змеїний. Показано, що двовимірна електророзвідка дозволяє досліджувати розрізи значно відмінні від горизонтально-шаруватих, у присутності тектонічних порушень і різких змін фізичних властивостей гірських порід, як по латералі, так і у вертикальній площині. Електророзвідку в модифікації електротомографії слід застосовувати в режимі моніторингу за розвитком зон тріщинуватості в умовах острова.

Рассмотрена возможность применения разновидности двумерной электроразведки по методике электрической томографии для изучения геологического и тектонического строения о.Змеиный. Показано, что двумерная электроразведка позволяет исследовать разрезы значительно отличающиеся от горизонтально-слоистых, в присутствии тектонических нарушений и резких изменений физических свойств горных пород, как по латерали, так и в вертикальной плоскости. Электроразведку в модификации электротомографии следует применять в режиме мониторинга за развитием зон трещиноватости в условиях острова.

Possibility of application of the variety of two-dimensional electrometry is considered on the method of electric tomography for the study of geological and tectonic structure of I. Serpentine. It is shown that two-dimensional electrometry allows exploring the cuts that considerably differing from horizontally stratified, in presence of tectonic violations and sharp changes of the physical properties of rocks, both on laterally and in vertical plane. Electrometry in modification of electrotomography follows to use in the mode of monitoring for development of areas of fissuring in the island's condition.

Остров Змеиный представляет собой участок суши со скалистыми, отвесными, интенсивно расчлененными в результате абразии берегами. Он расположен в 45 км восточнее от Килийского устья Дуная. Скалистые обрывы возвышаются над уровнем моря на 18-25 м, а максимальная отметка высоты достигает +41,0 м. В плане остров напоминает ромб с удлиненным мысом в юго-восточной части (рис. 1). Наибольший его размер с юго-запада на северо-восток 630 м, наименьший с юга на север 360 м; площадь около 12 га. Поверхность острова в центральной части равнинная, плавно переходит к склонам, где на отметках +15 - +20 м заканчивается обычно отвесными уступами.



Рис. 1. Остров Змеиный

В профиле морского дна остров выступает на 70 м над прилегающей территорией в виде горстоподобного поднятия, ограниченного разломами.

Породы, выходящие на поверхность острова, преимущественно относятся к Фидонисийской свите верхнего девона (D<sub>3</sub> fd). Разрез фидонисийской свиты хорошо обнажается в береговых уступах по всему периметру острова. Ниже приводится характеристика толщи на примере разреза южного побережья, но с учетом и других обнажений.

1. Конгломерат крупнообломочный, серый до светло-серого. Состав гравиево-галечный при существенном преимуществе гальки. Цемент кремнисто-песчано-гравийного типа заполнения пор и полостей или регенерации. Степень окатанности средняя, местами слабая, отдельные гальки сплющены, и ориентирование длинной оси совпадает с наслоением. Галечный материал от белого до темно-серого цвета, редко красно-бурый, интенсивно железненный. Размер обломков от 0,5-1,0 до 12,0 см. Характерна интенсивная трещиноватость, которая пересекает и цемент и обломки. По более крупным трещинам развита светло-серая глина трения, иногда каолиновая глина, мелкозернистый железненный песок. В нижней, базальной части слоя, развито сильное выщелачивание, присутствует заметное количество глинистого материала.

Конгломераты юго-западной части острова отличаются большими размерами обломочного материала (местами они переходят в валуны с величиной обломков до 10-20 см, иногда до 35 см) и значительно большей крупностью блоков. Например, в условиях приблизительно равной общей мощности теригенной толщи здесь насчитывается 21 пласт конгломератов по сравнению с 4 пластами на южном побережье.



Микроскопически конгломераты состоят из обломков кварцитов, песчаников, алевролитов и халцедона разных размеров, угловато-окатаной формы, заключенных в опалово-халцедоново-е вещество. Размеры обломков от 2 до 5-6 мм. Обычно присутствует чешуя слюды.

Обломки кремнистых пород (трепелов, опок) представлены опал-халцедоновым материалом. Опал представляет собой первичное образование в твердых частицах спикул губок. Наблюдаются реликтовые очертания спикул губок в виде удлинённых форм. Опал тесно связан с халцедоном, в который переходит.

Обломки алевролитов состоят из остроугольных и угловатых зерен кварца. Размеры обломков от 0,01 до 0,05 мм. Обломки сцементированы халцедоном, содержат скопления чешуй серицита, а также рудные минералы размером до 0,01 мм. Среди обломков встречаются спикулы губок.

Обломки песчаников и кварцитов преимущественно кварцевые с единичными зёрнами плагиоклазов угловатой таблитчатой формы. Цемент гидрослюдистый, тип цемента поровый, местами базальный. Размер зерен от 0,05 до 0,5 мм. Среди обломков кремнистых пород наблюдается прослойка волокнистого халцедона. Халцедон образует радиально-лучистые сферолиты и сектора.

Акцессорные минералы представлены отдельными кристаллами циркона с размерами 0,05-0,1 мм, иногда с роговой обманкой, рудными.

Азимут падения пластов  $100^{\circ}$ , угол  $15^{\circ}$ , мощность 0,8 м.

2. Глина буро-красная, алевролитистая, мелкоплитчатой отдельности, часто в виде овальных сплюснутых образований, с заметной горизонтальной слоистостью и сланцеватостью, с чешуей гидрослюды. В верхней части слоя глина переходит в желтовато-светло-серую с многочисленными примазками и прожилками светлой глины по трещинам и наслоению. В целом глина достаточно плотная, содержит обломки рыхлого песчаника и алевролита. Микроскопические исследования глин свидетельствуют о том, что главной их составляющей является тонкочешуйчатый материал типа гидрослюды, что подтверждают данные термического и рентгеновского анализов. Обломочный материал в глинах не превышает 2-3% и представлен зёрнами кварца, чешуей серицита и одиночными зёрнами плагиоклаза. Мощность глин достигает 2,5 м.

3. Конгломерат серый, крупнообломочный, отличается от расположенного выше более значительными размерами обломков (до 15 см). Обломочный материал кремнисто-халцедоновый с белым кварцем. Цемент кремнистый, крепкий, серого цвета, с ожелезнением по трещинам и наслоению. Мощность – 0,3 м.

4. Песчаник кварцевый мелкозернистый, светло-серый до серого, неравномерно ожелезненный, крепкий, кварцитовидный, местами переходит в кварцит сливной. Песчаник имеет горизонтальную, слабонаклонную тонкую слоистость, хорошую сортировку

обломочного материала, примеси гравия и мелкой гальки. Цемент кремнисто-халцедоновый, базального типа, крепкий. Порода трещиноватая, по трещинам развиты гидроокислы железа. Слой песчаника невыдержан, в западном направлении он выклинивается.

В шлифах обломочный материал преимущественно кварцевый, с единичными зёрнами полевых шпатов и кварца с размерами зерен 0,05-0,1 мм. Цемент кремнистый, опал-халцедоновый. Халцедон в виде радиально-лучистых сферолитов и отдельных их секторов. Тип цемента пористый, пленочный или мозаичный. Опал тесно связан с халцедоном, в который переходит, и представляет первичное образование в твердых частицах губок и скелетов радиоларий, реликты которых встречаются в породе. Наблюдаются одиночные чешуи мусковита, серицита и гидробиотита. Акцессорные минералы представлены цирконом и одиночными кристаллами турмалина. Встречаются кристаллы рудного минерала и гидроокиси железа.

Обобщая результаты исследования песчаников в разных частях острова, следует отметить следующее:

- песчаники неоднородные по прочности и могут постепенно переходить от рыхлых, слабосцементированных к сливным кварцитам;

- характерна невыдержанность их мощности, постепенные переходы к конгломератам и выклинивания, то есть самое частое их залегание линзовидное;

- состав песчаников исключительно кремнисто-халцедоновый, олигомиктовый, однородный; расцветка однородная;

- мощность от изменяется от 0 до 1,0 м.

5. Конгломерат, аналогичный описанному выше. Отличается несколько меньшими размерами обломков (галька до 3-5 см), более интенсивным ожелезнением по системе трещин и наслоением. Мощность – 0,5 м.

6. Глина пестрая, кирпично- и буро-красная, сиренево-красная и охристая, плотная, плоскопризматической отдельности, аргиллитопобная, с глянцевыми поверхностями отдельности, по которым развиты пленки гидроокислов железа. Глина неоднородна, переслаивается с подчиненными прослойками песчаника. Песчаник кварцевый, охристо-желтый, мелко-среднезернистый, слабосцементированный глинисто-кремнистым материалом, плохо отсортированный. По простиранию глины переслаиваются с песчаниками, алевролитами и аргиллитами невыдержанной мощности, но с выдержанным кремнисто-халцедоновым составом. Алевролит кварцевый, серовато-желтый, неплотный, местами ожелезненный, с четко отбитой тонкой слоистостью. Аргиллит сиренево-красно-коричневый, средней плотности, сильно ожелезненный. Как в алевролитовых, так и в аргиллитовых прослойках, характерно распространение плотных корок сидерита, гетита и лимонита, которые образуют каркасные формы.

Характерной особенностью пестрой толщи является наличие среди слабо литифицированных алевролитовых пород гравия и гальки, типичных для

конгломератов в слоях, которые залегают выше и ниже, что свидетельствует о близких условиях седиментогенеза этих существенно различных пород.

Поверхность скальных девонских образований лишь фрагментарно, плащеобразно перекрыта мало-мощными олово-делювиальными отложениями со слабо развитым почвенно-растительным слоем четвертичных отложений. Мощность их не превышает 0,3-0,6 м. Исключение – северо-восточное побережье острова, где понижение в рельефе поверхности девона выполнено красно-бурными эоплейстоценовыми отложениями мощностью до 5 м.

Благодаря интенсивной трещиноватости пород, чередованию крепких конгломератов со слаболитифицированными породами, мощной абразивной деятельностью моря в соединении с процессами выветривания, происходит быстрое разрушение береговых скал, отделяются разные по размерам, иногда громадные, блоки горных пород.

Электроразведка методом сопротивлений остается одним из основных методов при малоглубинных геофизических исследованиях. В настоящее время в практику активно внедряется методика электротомографии, которая позволяет исследовать сложные среды и выполнять интерпретацию в рамках дву- и трехмерных геоэлектрических моделей. Термин *электротомография* вошел в «Сводные правила» Госстроя России [1], в англоязычной литературе чаще используются два других термина: *Resistivity Imaging* и *Electrical Resistivity Tomography*. Такая методика применяется за рубежом уже более 10 лет [2], в то время как в странах СНГ из-за отсутствия многоэлектродной аппаратуры внедрение такого подхода только начинается. Развитие метода обусловлено как развитием аппаратной базы и вычислительной техники, так и появлением новых технологий полевых работ, обработки и интерпретации данных.

Двумерная электроразведка основана на методике многоэлектродных зондирований. Эта методика отличается от «классического» метода ВЭЗ в первую очередь высокой плотностью наблюдений, которая достигается применением соответствующих схем наблюдения, а использование многоэлектродной аппаратуры обеспечивает эффективность полевых работ [2-4]. Другой составляющей двумерной электроразведки является автоматическая двумерная инверсия данных, прежде всего в рамках «гладких» моделей [5]. В целом использование такого подхода позволяет получать удовлетворительные результаты даже при минимальной квалификации пользователя. За последние 15 лет эта методика получила на Западе повсеместное распространение.

Электротомография – это целый комплекс, включающий в себя как методику полевых наблюдений, так и технологию обработки и интерпретации полевых данных. Ее особенностью является многократное использование в качестве питающих и измерительных одни и те же фиксированные на профиле наблюдения положения электродов. Это приводит к уменьшению общего числа рабочих положений электродов при существенном увеличении плотности из-

мерений по сравнению с обычным методом вертикальных электрических зондирований. Такой подход позволяет с одной стороны, работать с современной высокопроизводительной аппаратурой, а с другой, применять эффективные алгоритмы моделирования и инверсии.

Технология электротомографии значительно расширяет область применения метода сопротивлений и вызванной поляризации, повышает точность, разрешающую способность и геологическую эффективность метода сопротивлений, позволяя проводить надежную интерпретацию для сложно построенных сред. Такое качество интерпретации во многих случаях недостижимо при использовании методов ВЭЗ и ВЭЗ-ВП.

Разрешающая способность (т.е. количество деталей геоэлектрического разреза, устойчиво проявляющихся в электрическом поле) и, соответственно, качество интерпретации данных электротомографии тесно связано с числом и плотностью измерений на одном профиле. Их число обычно достигает первых тысяч, поэтому вопрос о производительности полевых измерений имеет принципиальное значение и во многом определяет возможность практического использования этого метода. Для достижения максимальной эффективности при проведении полевых работ применяется специальная аппаратура с программируемой автоматической коммутацией электродов [3]. Далее для краткости мы будем использовать термин многоэлектродная аппаратура.

Сегодня в практику отечественной инженерной электроразведки вводятся работы со стандартной одноканальной аппаратурой. Идея этого подхода в том, что коммутируются только приемные электроды, соединенные крестом (рис. 2). Питающий электрод переключается вручную. Для эффективного использования коммутатора нужно применять установки с неподвижными питающими электродами: трехэлектродная установка или дипольная осевая.

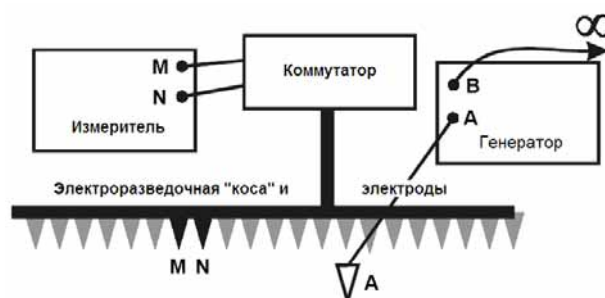


Рис.2. Установка для электротомографии на базе одноканальной аппаратуры

Полевые измерения могут осуществляться равнодипольной осевой (рис. 3) или комбинированной трехэлектродной установками (рис. 4).

В случае равнодипольной осевой установки кажущееся сопротивление  $\rho_k$  рассчитывается по пол-

ной формуле [6], учитывающей недипольность установки:

$$\rho_k = k_{\text{доз}} \frac{\Delta U_{MN}}{I_{AB}} \cdot 10^{-3},$$

где  $k_{\text{доз}} = \frac{\pi \cdot R^3}{AB \cdot MN} \cdot \bar{M}$  – коэффициент установки, м;

$\Delta U_{MN}$  – разность потенциалов в приемной линии, мВ;  $I_{AB}$  – сила тока в питающей линии, А;

$\bar{M} = \left[ 1 - \left( \frac{AB}{2 \cdot R} - \frac{MN}{2 \cdot R} \right)^2 \right] \cdot \left[ 1 - \left( \frac{AB}{2 \cdot R} + \frac{MN}{2 \cdot R} \right)^2 \right]$  – поправка за

недипольность установки;  $AB$  – длина питающей линии, м;  $MN$  – длина приемной линии, м;  $R$  – разнос установки (расстояние между центрами питающей и приемной линий), м.

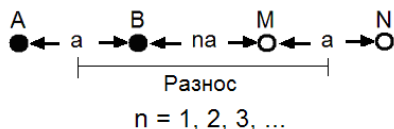


Рис. 3. Схема равнодипольной осевой установки

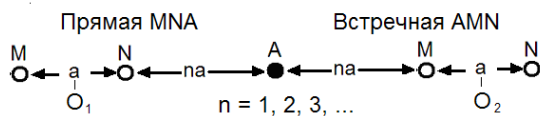


Рис. 4. Схема комбинированной трехэлектродной установки

В случае комбинированной трехэлектродной установки кажущееся сопротивление  $\rho_k$  рассчитывается по формуле:

$$\rho_k = k_{AMN} \frac{\Delta U_{MN}}{I_{AB}} 10^{-3}$$

где  $k_{AMN} = \frac{2 \cdot \pi \cdot (AO + MN / 2) \cdot (AO - MN / 2)}{MN}$  – коэф-

фициент установки, м;  $\Delta U_{MN}$  – разность потенциалов в приемной линии, мВ;  $I_{AB}$  – сила тока в питающей линии, А;  $AO$  – разнос установки (расстояние между центром приемной линий и питающим электродом А), м;  $MN$  – длина приемной линии, м.

На рис. 5 показан пример размещения электродов и последовательности измерений, который можно использовать для 2-D томографической съемки [5].

Программа инверсии результатов наблюдений разработана для инверсии больших массивов данных (от 200 до 6500 точек) собранных системой наблюдений с большим числом электродов (от 25 до 1800 электродов).

Двумерная модель, используемая этой программой, делит полупространство на ряд прямоугольных блоков (рис. 6, 7). Цель работы программы состоит в определении сопротивлений прямоугольных блоков дающих псевдоразрез кажущихся сопротивлений, совпадающий с практическими измерениями. Для установок Веннера и Шлюмберже, мощность первого ряда блоков составляет 0,5 разноса электродов. Для установок потенциала, дипольной осевой и трехэлектродной мощность равна 0,9, 0,3 и 0,6 соответствующих разносов электродов. Мощность каждого более глубокого слоя обычно увеличивается на 10% (или 25%). Глубины слоев также могут быть изменены пользователем вручную. Метод оптимизации обычно пытается уменьшить различие значений кажущегося сопротивления рассчитанного и измеренного путем вариации сопротивлений блоков модели. Мерой этого различия является среднеквадратическая ошибка. Однако модель с наименьшей возможной ошибкой иногда может давать большие и нереальные изменения сопротивлений модели и не всегда может оказаться «наилучшей» моделью в геологическом отношении. В общем, наиболее разумным методом является выбор модели для той итерации, после которой среднеквадратическая ошибка уже не изменяется значительно. Это обычно происходит между третьей и пятой итерациями.

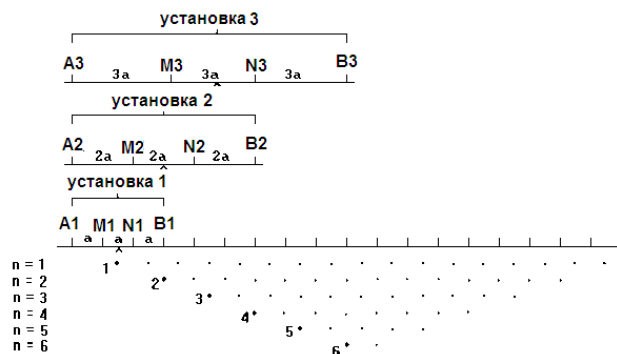


Рис. 5. Последовательность измерений для построения псевдоразреза по методике электрической томографии



Рис. 6. Расположение блоков, используемых в модели, и точек записи на псевдоразрезе

Подпрограмма прямой задачи используется для расчета значений кажущегося сопротивления, а метод нелинейной оптимизации на основе наименьших квадратов – для осуществления инверсии [5].

Программа может работать как с методом конечных разностей, так и конечных элементов для расчета прямой задачи. Эта программа может использоваться для наблюдений с установками Веннера, двухэлектродной, дипольной осевой, трехэлектродной, Веннера-

Шлюмберже и дипольной экваториальной. В дополнение к обычным, программа поддерживает и нестандартные установки, с почти неограниченным числом возможных расположений электродов. Можно обрабатывать псевдоразрезы, в которых до 1800 электродов и до 6500 измерений для одного времени. Максимальный разнос может до 36 раз превосходить наименьший разнос. Пределы размеров данных будут распространены на еще большие системы наблюдений.

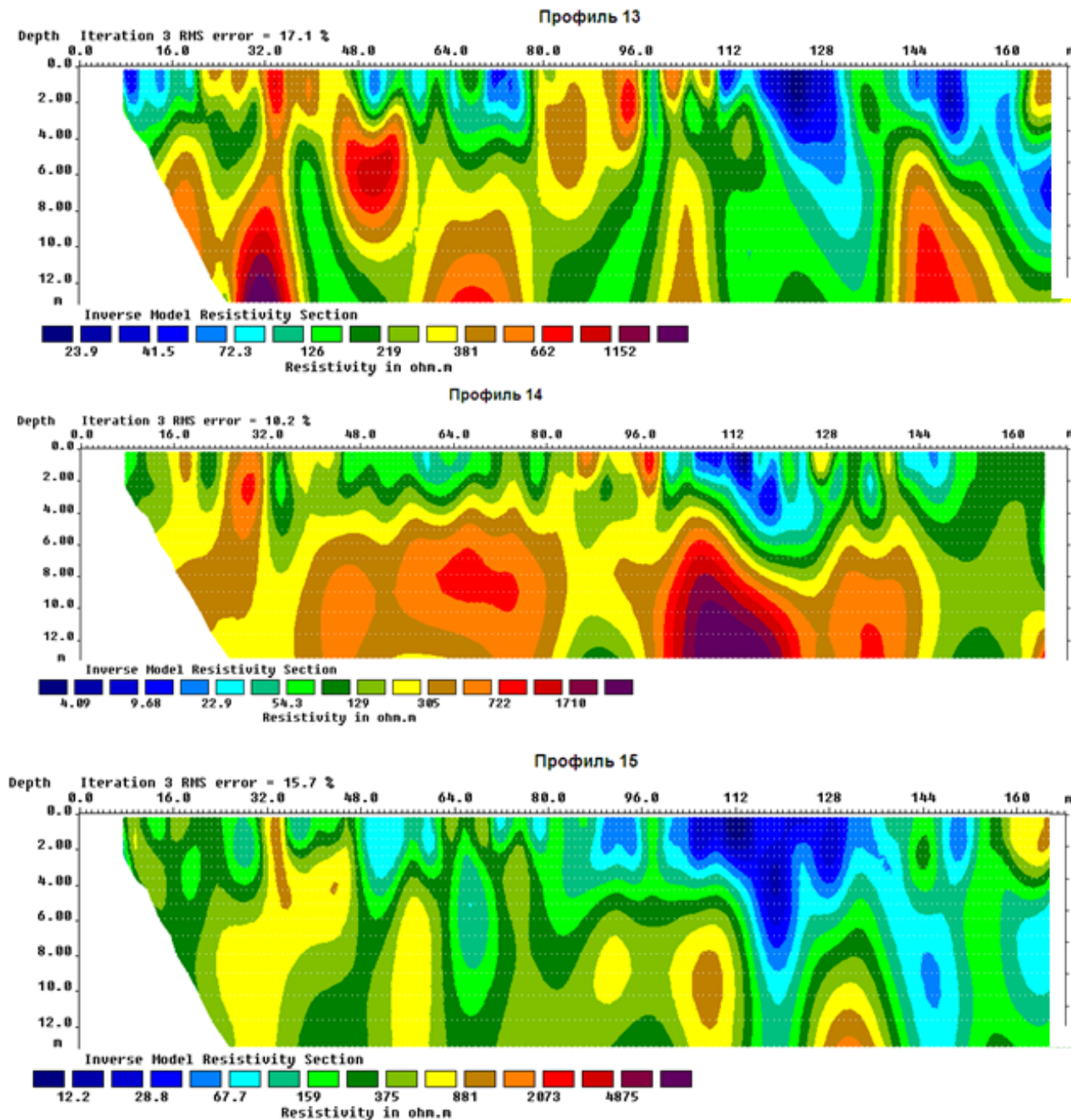


Рис. 7. Результаты работ с дипольной осевой установкой на о.Змеиний

Процедура инверсии используемая программой основана на smoothness-constrained (с ограничениями гладкости) методе наименьших квадратов. Может

быть также использована новая реализация метода наименьших квадратов, основанная на квази-Ньютоновском методе оптимизации [5]. Этот метод

более чем в 10 раз быстрее, чем обычный метод наименьших квадратов для больших объемов данных и требует меньше памяти. Метод наименьших квадратов smoothness-constrained основан на следующем уравнении:

$$(\mathbf{J}^T \mathbf{J} + \mathbf{uF})\mathbf{d} = \mathbf{J}^T \mathbf{g}, \quad (1)$$

где  $\mathbf{F} = \mathbf{f_x f_x}^T + \mathbf{f_z f_z}^T$ ;  $\mathbf{f_x}$  – горизонтальный сглаживающий фильтр;  $\mathbf{f_z}$  – вертикальный сглаживающий фильтр;  $\mathbf{J}$  – матрица частных производных;  $\mathbf{u}$  – показатель затухания;  $\mathbf{d}$  – вектор приращений параметров модели;  $\mathbf{g}$  – вектор невязок.

Одним из достоинств этого метода является возможность настройки показателя затухания и сглаживающих фильтров, чтобы удовлетворить различным типам данных.

Возможно использование в этой программе и обычного метода Гаусса-Ньютона. Он намного медленнее, чем квази-Ньютоновский метод, но для разрезов с контрастами сопротивлений больше чем 10:1, он дает лучше результаты. Третьей возможностью в этой программе является использование метода Гаусса-Ньютона для первых трех итераций, после чего используется квази-Ньютоновский метод. Во многих случаях это дает наилучший результат.

Первые версии программ автоматической двумерной инверсии данных работали в рамках “гладких” моделей [5]. Это наиболее простой способ регуляризации обратной задачи часто приводит к появлению ложных аномалий в результирующем разрезе. Поэтому стали использоваться другие алгоритмы регуляризации (рис. 2). Кроме того, стала очевидной необходимость учета априорных данных при инверсии через введение некоторых границ и закрепления сопротивлений блоков.

Опыт практического применения многоэлектродных зондирований показал, что сама по себе высокая плотность наблюдений недостаточна для получения качественных результатов инверсии. Поэтому перед использованием программ автоматических инверсий необходимо проводить обработку полевых данных для подавления различных помех и методических ошибок [7].

Особое внимание приходится уделять подавлению искажений от приповерхностных неоднородностей. Обычно это необходимо при одномерной интерпретации [8], однако такая обработка существенно улучшает результаты и для двумерной инверсии, особенно для глубинной части разреза [9]. Для подавления эффектов приповерхностных неоднородностей могут применяться статистические методы – метод главных компонент или медианная фильтрация.

На рис. 7 показаны результаты работ с дипольной осевой установкой на о. Змеиный вдоль трех смежных параллельных профилей, которые сводятся к следующему. До глубин 12-15 м от поверхности острова наблюдается крайне неоднородное строение геологической среды. Имеет место смена зон монолитных пород с зонами трещиноватости. Корреляция

последних от профиля к профилю позволяет классифицировать их как зоны тектонических нарушений. Кроме зон нарушений в конгломератах острова фиксируются локальные зоны депрессии сопротивления, что, очевидно, связано с разнообразием их цемента

В заключение отметим следующее. Двумерная электроразведка позволяет исследовать разрезы значительно отличающиеся от горизонтально-слоистых в условиях крутопадающих слоев, в присутствии тектонических нарушений и резких изменений физических свойств горных пород, как по латерали, так и в вертикальной плоскости. Электроразведку в модификации электротомографии следует применять в режиме мониторинга за развитием зон трещиноватости пород.

### Список литературы

1. СП 11-105-97. Инженерно-геологические изыскания для строительства. Ч. VI. Правила производства геофизических исследований / Госстрой России. – М.: ПНИИИС Госстроя России. – 2004. – 49 с.
2. Griffiths D.H., Barker R.D. Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology // J. Appl. Geophysics. – 1993. – 29. – P. 211-226.
3. Многоэлектродные электрические зондирования в условиях горизонтально-неоднородных сред / Бобачев А.А., Модин И.Н., Пervaго Е.В., Шевнин В.А. // Разведочная геофизика. Обзор. АОЗТ “Геоинформ-марк”. – М., 1996. – Вып. 2. – 50 с.
4. Dahlin T. The development of DC resistivity imaging techniques // Computers & Geosciences. – 2001. – 27. – P. 1019-1029.
5. Loke M.H., Barker R.D. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method // Geophysical Prospecting. – 1996. – 44. – P. 131-152.
6. Инструкция по электроразведке: Наземная электроразведка, скважинная электроразведка, шахтно-рудничная электроразведка, аэроэлектроразведка, морская электроразведка / М-во геологии СССР. – Л.: Недра, 1984. – 352 с.
7. Dahlin T. Short note on electrode charge-up effects in DC resistivity data acquisition using multi-electrode arrays // Geophysical Prospecting. – 2000. – 48. – P. 181-187.
8. Shevnin V.A., Bobachev A.A., Modin I.N., Pervago E.V. Interpretation of resistivity sounding data, distorted by geological noise // Proc. of EAGE 61-th Conference, 1999. – Vol. 2. – P. 27.
9. Ritz M., Robain H., Pervago E. et al. Improvement to resistivity pseudosection modelling by removal of near-surface inhomogeneity effects: application to a soil system in south Cameroon. Geophysical Prospecting. – 1999. – 47(2). – P. 85-101.

*Рекомендовано до публікації д.г.-м.н. Ю.М. Назорним 20.02.09*



В.П. Солдатенко, М.М. Довбнич, Д.С. Пикареня

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ НАД ЗОНАМИ ГИДРОТЕРМАЛЬНО-МЕТАСОМАТИЧЕСКИ ИЗМЕНЕННЫХ ПОРОД

На підставі проведеного геолого-геофізичного моделювання гравітаційного, магнітного і природного імпульсного електромагнітного полів показано, що в аномальному магнітному полі і в полі щільності потоку магнітної складової ПЕМПЗ зонам гідротермально-метасоматичних змін порід відповідають ділянки зі слабо диференційованим характером поля одночасно з неперушеним ходом ізоліній гравітаційного поля. Жильна мінералізація характеризується підвищеними значеннями щільності потоку магнітної складової ПЕМПЗ. Вельми задовільна збіжність результатів моделювання з природними об'єктами дозволяє розглядати цю закономірність як геофізичний пошуковий критерій ділянок розвитку гідротермально-метасоматичних порід та мінералізованих зон.

На основании проведенного геолого-геофизического моделирования гравитационного, магнитного и естественного импульсного электромагнитного полей показано, что в аномальном магнитном поле и в поле плотности потока магнитной составляющей ЕИЭМПЗ зонам гидротермально-метасоматических изменений пород соответствуют участки со слабо дифференцированным характером поля одновременно с ненарушенным ходом изолиний гравитационного поля. Жильная минерализация характеризуется повышенными значениями плотности потока магнитной составляющей ЕИЭМПЗ. Весьма удовлетворительная сходимость результатов моделирования с природными объектами позволяет рассматривать данную закономерность как геофизический поисковый критерий участков развития гидротермально-метасоматических пород и минерализованных зон.

On the basis of the conducted geological-geophysical design a gravitation, magnetic and natural impulsive electromagnetic the fields of the Earth it is shown that in the anomalous magnetic field and in the field of closeness of stream of the magnetic constituent NIEMFE to the areas of hydrothermal-metasomatose changes of breeds areas correspond with the washed out character of the field simultaneously with the unbroken motion of isolines of the gravitation field. Vien myneralization is characterized by the promoted values of closeness of stream of the magnetic constituent NIEMFE. Very satisfactory representation of results of design with natural objects allows examining this conformity to the law as geophysical searching criterion of areas of development of hydrothermal-metasomatitic breeds.

Разработка прогнозных критериев и признаков для поисков любого минерального сырья является важнейшей научно-практической задачей. Ее решение должно базироваться на всем объеме накопленной информации, ее всестороннем анализе. Например, подавляющее большинство золоторудных объектов гидротермально-метасоматического генезиса на древних щитах и молодых платформах приурочено к наиболее деформированным участкам этих структур – глубинным разломам, а конкретно – к меридиональным и широтным системам разломов, причем зачастую в узлах их пересечения происходит увеличение концентраций элементов в геохимических аномалиях.

В частности, к узлам пересечения разломов ортогональной системы тяготеют и участки повышенного содержания золота в железистых кварцитах саксаганской свиты [1, 2], подобная же закономерность проявляется и в пространственном положении гидротермально-метасоматической минерализации золота и полиметаллов в зоне между Ингулецким и Криворожско-Кременчугским разломами [2], на севере Криворожской структуры в районе Желтянского месторождения [3] и в пределах центральной части Белозерской зеленокаменной структуры, где практически все аномалии и точки минерализации золота расположены в узлах пересечения широтной и меридиональной систем.

Важную роль широтной системы разломов УЩ в локализации различных видов минерального сырья отме-

чают Л.С. Галецкий и Т.П. Шевченко [4], Б.А. Горлицкий и др. [5], О.Б. Гинтов [6] и многие другие исследователи.

Подобных примеров можно привести много, в т.ч. и для зарубежных месторождений, они будут отличаться деталями, но главное, что их объединяет – это локализация гидротермально-метасоматического оруденения преимущественно в узлах пересечения ортогональных разломов или в системе «глубинный – диагональный (оперяющий) разлом». Очевидно, это не случайно, т.к. именно в таких участках создаются максимальные градиенты давлений, температур и электромагнитных полей. В связи с этим особую важность приобретают прогнозирование и поиски подобных структур.

Анализируя современное состояние системы прогнозно-поисковых критериев и признаков, следует отметить, что максимально полно для Украинского щита они разработаны для золоторудных объектов благодаря обширному фактическому материалу и теоретическим исследованиям последних тридцати лет. Применительно к этим объектам установлено, что факторами рудного контроля являются: структурно-тектонические, формационные, литологические, магматические, метаморфические, гидротермально-метасоматические, минералогические, геохимические, геофизические и стратиграфические. По мнению авторов [7], в распределении их по масштабам (рангам) проявления необходимо различать четыре уровня иерархии: глобальный, региональный, районный и локальный. Одни прогнозные критерии, такие, как

структурно-тектонические, магматические носят «сквозной» характер и могут проявляться на всех иерархических уровнях, другие (формационный, литологический, минералогический) применяют только для конкретных масштабов исследований.

Часть прогнозных критериев детально разработана, и на их основании можно достаточно точно оценить перспективы региона (района) на тот или иной тип золоторудной минерализации. Другие критерии требуют дальнейшего развития и являются, по сути, поисковыми признаками какого-либо иерархического уровня. К этому типу относятся геофизические поисковые признаки, косвенно указывающие на наличие в данном районе благоприятной тектонической обстановки и пород, которые могут содержать рудную минерализацию. Наиболее полно характеристика геофизических поисковых признаков для различных типов золоторудных месторождений Украинского щита и Донбасса приведена в работе Н.Я. Азарова, В.В. Белявского и др. [8]. Их анализ показал, что геофизические признаки не имеют самостоятельного значения, а проявляются через другие геологические критерии. Так, используя геофизические данные, по известным особенностям геофизических полей выделяются зоны повышенной трещиноватости и разрывы (тектонический критерий), в структурно-вещественные комплексы (формационный критерий), зоны окварцевания, карбонатизации, сульфидной минерализации (минералогический критерий) и т.п. Однако на настоящий момент не выявлено ни одного геофизического поискового критерия или признака, который мог бы прямо указать на наличие в конкретном регионе золоторудного объекта гидротермально-метасоматического генезиса.

Учитывая вышеизложенное, следует отметить, что определение рационального комплекса геофизических методов, способных по прямым признакам установить в данном районе (регионе) наличие толщ гидротермально-метасоматически измененных горных пород, а также развитие в них рудной минерализации (рудных тел) является весьма актуальной задачей. Использование только известных геофизических методов эту задачу решить не сможет, поскольку все возможные их сочетания уже апробированы не только для условий Украинского щита, но и других докембрийских структур. В связи с этим необходимо привлечение качественно новых методов, которые позволили бы с несколько иных позиций оценить данные, полученные традиционными способами, либо дополнить их новыми физическими характеристиками геологических объектов.

Особое место среди них занимает естественное импульсное электромагнитное поле Земли (ЕИЭМПЗ), наиболее чутко реагирующее на любые изменения физического состояния горных пород. Эта особенность положена в основу электроразведочного метода – наблюдения ЕИЭМПЗ. Метод активно применяется в инженерно-геологических и гидрогеологических исследованиях [9], угольной геологии [10] и др., были попытки использовать его на Сурожском золоторудном месторождении [8], однако целенаправленно для выявления участков

гидротермально-метасоматической минерализации в зонах глубинных разломов он применяется авторами с 2006 года [3, 11-14]. При этом преследуется цель – установить по особенностям ЕИЭМПЗ зоны максимальной тектонической нарушенности пород и выделить в них участки развития гидротермально-метасоматической минерализации.

Исследования методом ЕИЭМПЗ, проведенные на Желтянском (рис. 1) и Марьяновском рудопроявлениях (Криворожско-Кременчугский глубинный разлом) и Комаровском золоторудном месторождении (Джетыгаринское рудное поле, Казахстан, рис. 2), интерпретация данных гравимагнитных съемок позволили сформулировать геофизический поисковый признак на гидротермально-метасоматически измененные породы и минерализованные зоны в них, суть которого заключается в том, что изменения физических свойств гидротермально-метасоматически переработанных горных пород отражаются в слабо дифференцированном («размытом» рисунке) аномального магнитного и естественного импульсного электромагнитного полей при дифференцированном гравитационном поле, а рудные тела фиксируются повышенными значениями ЕИЭМПЗ. Результаты применения геофизического признака для выделения перспективных участков в южной части Губовского рудопроявления золота (Клинцовское рудное поле УЩ) [11] и последующее их бурение позволяет перевести его в разряд критериев.

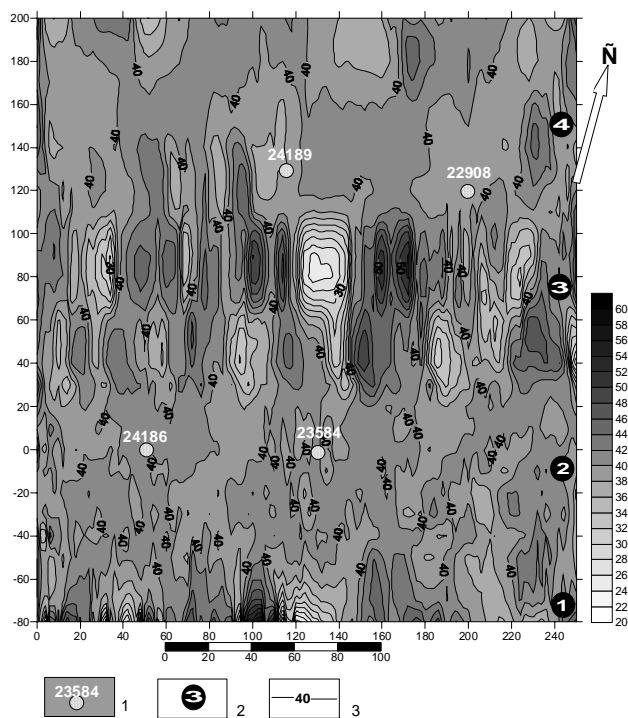


Рис. 1. Схема наблюдаемого ЕИЭМПЗ в южной части Желтянской площади: 1 – разведочная скважина, вскрывшая золотоносную зону и ее номер; 2 – номер зоны с различным рисунком поля ЕИЭМПЗ; 1, 3 – дифференцированное поле, 2, 4 – размытое поле; 3 – изолинии плотности потока магнитной составляющей ЕИЭМПЗ в условных единицах. Координатная сеть отражает расстояние в метрах

Для подтверждения разработанного критерия проведено геолого-геофизическое моделирование. В качестве геологической модели принято Желтянское рудопроявление золота, детально изученное геолого-геофизическими методами. Здесь в разные годы и разными исполнителями проведены магнитная и гравитационная съёмки, ЕИЭМПЗ, участок достаточно разбурен, изучены петрофизические характеристики горных пород, установлен вещественный состав вмещающих и рудоносных комплексов. Выбор модели обусловлен и тектонической позицией зон золоторудной минерализации – приуроченностью к субширотным разрывным нарушениям, ортогональным к Криворожско-Кременчугскому глубинному разлому и простиранию железисто-кремнистых толщ. Кроме того, значительная дифференциация по намагниченности и максимальное для этого района различие по плотности вмещающих и рудоносных пород позволяет наиболее четко установить особенности изменения геофизических полей.

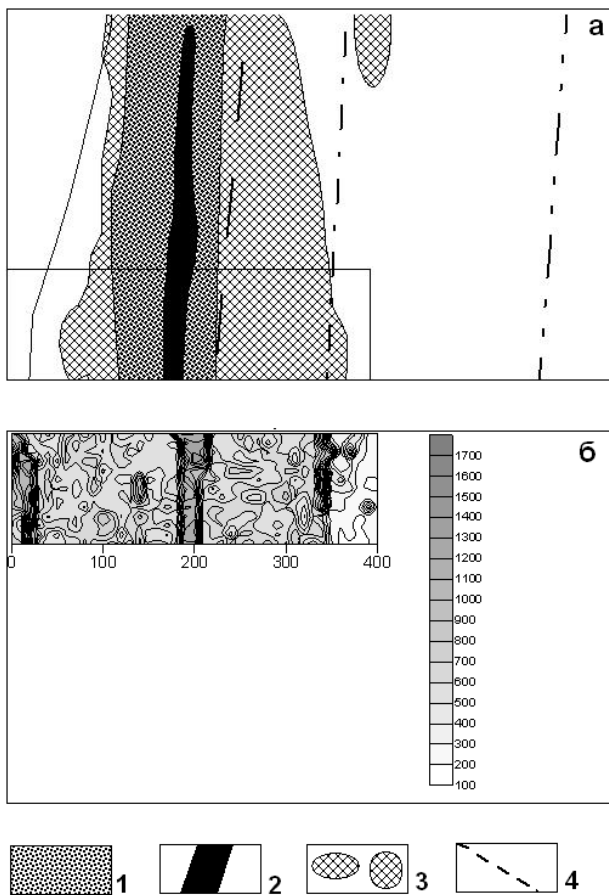


Рис. 2. Фрагмент геологической карты Комаровского месторождения (а), составленной по материалам ООО «Геобайт-ИНФО» и ООО «КазРосГеоКом» и карты-схемы ЕИЭМПЗ (б): 1 – гидротермально-измененные породы; 2 – рудные зоны и тела; 3 – депрессии, зоны дробления в фундаменте по данным гравиразведки; 4 – тектонические нарушения, подтвержденные бурением

Геологическая модель, составленная по геологическим данным Желтянского рудопроявления, показана на рис. 3, А. Основанием для проведения геолого-геофизического мо-

делирования послужили детальные исследования изменения петрофизических свойств горных пород в северной части Криворожско-Кременчугского глубинного разлома, проведенные Н.Ф. Познанской с соавторами [15]. В этой работе подчеркивается существенное изменение намагниченности и слабая дифференциация по плотности изменённых и неизменённых разностей горных пород. При этом метасоматические процессы в железистых кварцитах вызывают резкое уменьшение (на 3-5 порядков) намагниченности и незначительное от 0,01 до 0,11 г/см<sup>3</sup> плотности. Подобной точки зрения придерживается О.Б. Гинтов [6], который считает, что породы, подверженные динамометаморфическим изменениям, теряют свою намагниченность, причём уменьшение намагниченности и интенсивность динамометаморфизма связаны прямой зависимостью. Однако известны случаи, когда в результате наложенных метасоматических процессов, например альбитизации, динамометаморфически измененные породы приобретают более высокую магнитную восприимчивость по сравнению с окружающими образованиями и выделяются в виде цепочек магнитных максимумов [6].

Учитывая вышеизложенное, для геофизического моделирования принимались значения намагниченности и плотности, приведенные в табл. Кроме того, учитывалось, что кварц, карбонаты, хлориты, безрудные кварцито-сланцы являются диамагнетиками и имеют обратную (отрицательную) намагниченность.

Таблица  
Параметры для расчетов геофизических моделей

| Тип породы                             | Намагниченность, ед. СГС | Плотность, г/см <sup>3</sup> |
|--|--------------------------|------------------------------|
| Железистые кварциты                    | 1                        | 3,2                          |
| Безрудные сланцы                       | $1 \cdot 10^{-2}$        | 2,9                          |
| Кварц-карбонатные жилы (с хлоритом)    | $1 \cdot 10^{-5}$        | 2,8                          |
| Жилы, обогащенные пиритом и пирротином | $1 \cdot 10^{-3}$        | 2,95                         |

Расчет магнитного и гравитационного полей по заданной геологической модели проведен с использованием программы «Пирамида», разработанной специально для решения прямой и обратной геофизических задач в условиях Кривбасса.

Анализ геофизических моделей (рис. 3, Б, В) показывает, что для аномального магнитного поля характерны четыре зоны с различным рисунком поля. Первые две зоны, соответствующие неизменённым железистым кварцитам и безрудным сланцам, имеют четкие линейные аномалии повышенных и пониженных значений, которые ориентированы по простиранию горных пород. Участки, содержащие жильную кварц-карбонатную и хлоритовую минерализацию, имеют слабодифференцированное «размытое» поле обоих знаков с двумя четкими положительными аномалиями, фиксирующими зоны с рудной составляющей. При этом ориентировка изодинам совпадает с простиранием кварц-карбонатных, хлорито-



вых жил и тел с повышенной гидротермальной рудной минерализацией.

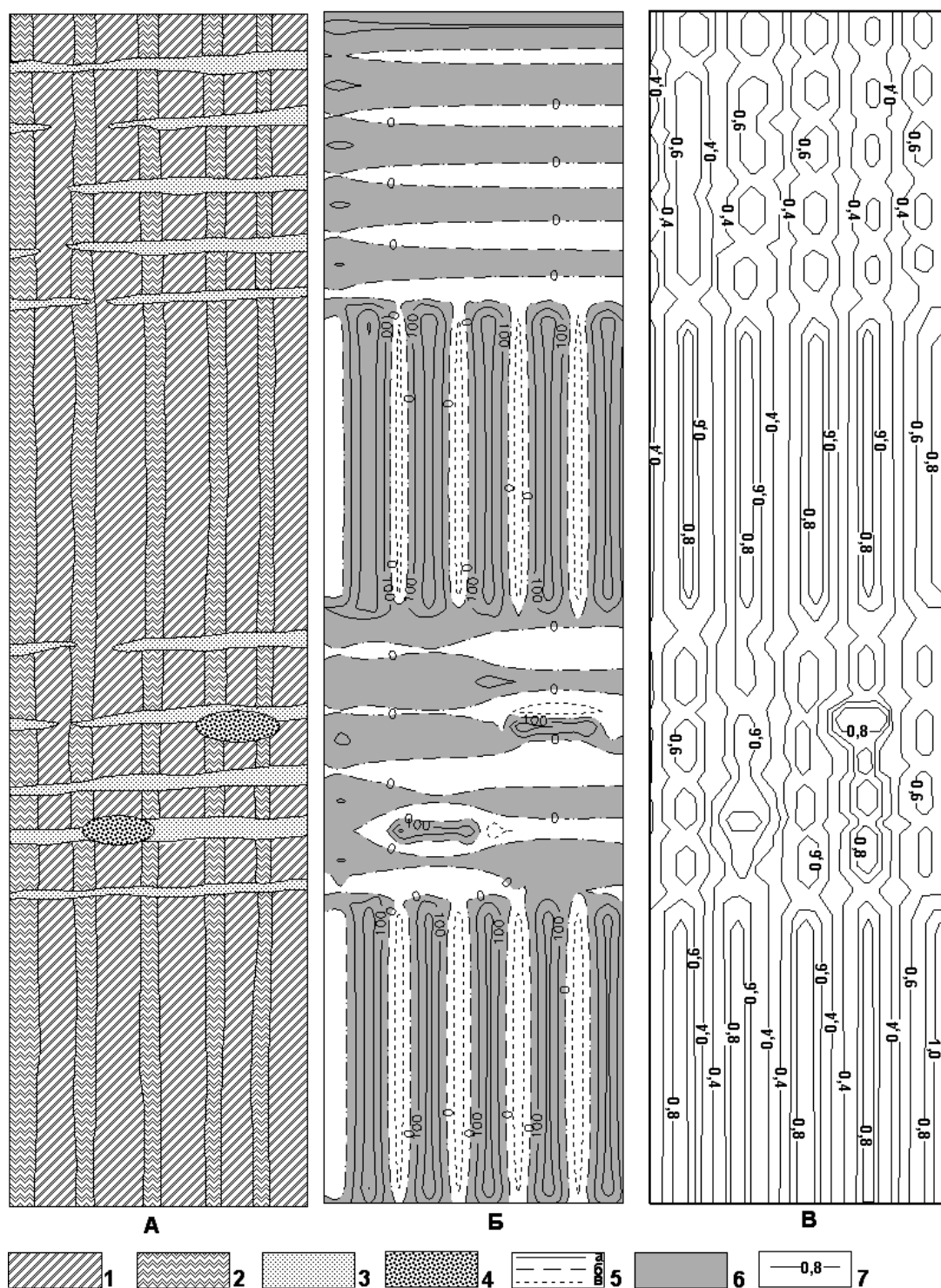


Рис. 3. Геологическая модель гидротермально-метасоматической минерализации (А) и схемы аномального магнитного (Б) и гравитационного (В) полей над ней: 1 – магнетитовые кварциты; 2 – сланцы кварц-карбонат-хлоритовые безрудные; 3 – жилы кварц-карбонатные с хлоритом; 4 – жилы кварц-карбонатные с обильной пирит-пирротиновой минерализацией; 5 – изолинии расчетного аномального магнитного поля (а – положительные, б – нулевая, в – отрицательные); 6 – положительные аномалии магнитного поля; 7 – изолинии расчетного гравитационного поля

Иная картина наблюдается в гравитационном поле. Все аномалии вытянуты по простиранию железистых кварцитов и безрудных сланцев. Кварц-карбонатные и

хлоритовые жилы фиксируются небольшими пережимами, которые при решении обратной задачи могут быть идентифицированы как зоны разрывов или трещин. Не-

большие аномалии гравитационного поля широтной ориентировки фиксируют участки рудной минерализации. В целом, гравитационное поле не имеет таких четких особенностей, как магнитное.

Таким образом, геофизическое моделирование показало, что существуют различные признаки выделения гидротермально-метасоматически измененных пород и рудной минерализации в магнитном и гравитационных полях, что может служить основой для формирования нового поискового критерия.

Методы решения прямой задачи для ЕИЭМПЗ разработаны слабо, что обуславливает ограничение его применения для решения тех или иных геологических и инженерно-геологических задач. Основные трудности заключаются в отсутствии четких зависимостей естественного импульсного электромагнитного поля Земли от напряжений в массиве горных пород, степени его тектонической нарушенности, электрического сопротивления и намагниченности пород. Кроме того, при моделировании ЕИЭМПЗ необходимо учитывать не только изменение амплитуды, но и спектра электромагнитных полей вследствие их дифракции на неоднородностях.

Одним из авторов статьи проведено моделирование ЕИЭМПЗ над двумерным проводящим телом (обводненная зона разрывного нарушения) прямоугольного сечения, находящемся в однородном полупространстве (ненарушенный массив горных пород) (рис. 4). Решалась задача о дифракции плоской электромагнитной волны на двумерной неоднородности. При этом анализировалось

изменение спектра в диапазоне, регистрируемом при наблюдениях ЕИЭМПЗ (5-50 кГц).

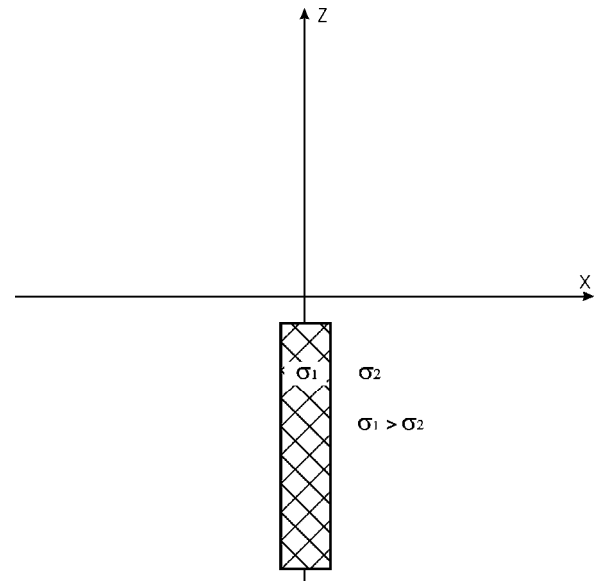


Рис. 4. Физико-геологическая модель тектонического нарушения

Расчетный алгоритм реализован в виде программы для ЭВМ, с помощью которой выполнено моделирование для различных параметров физико-геологической модели тектонического нарушения (рис. 5).

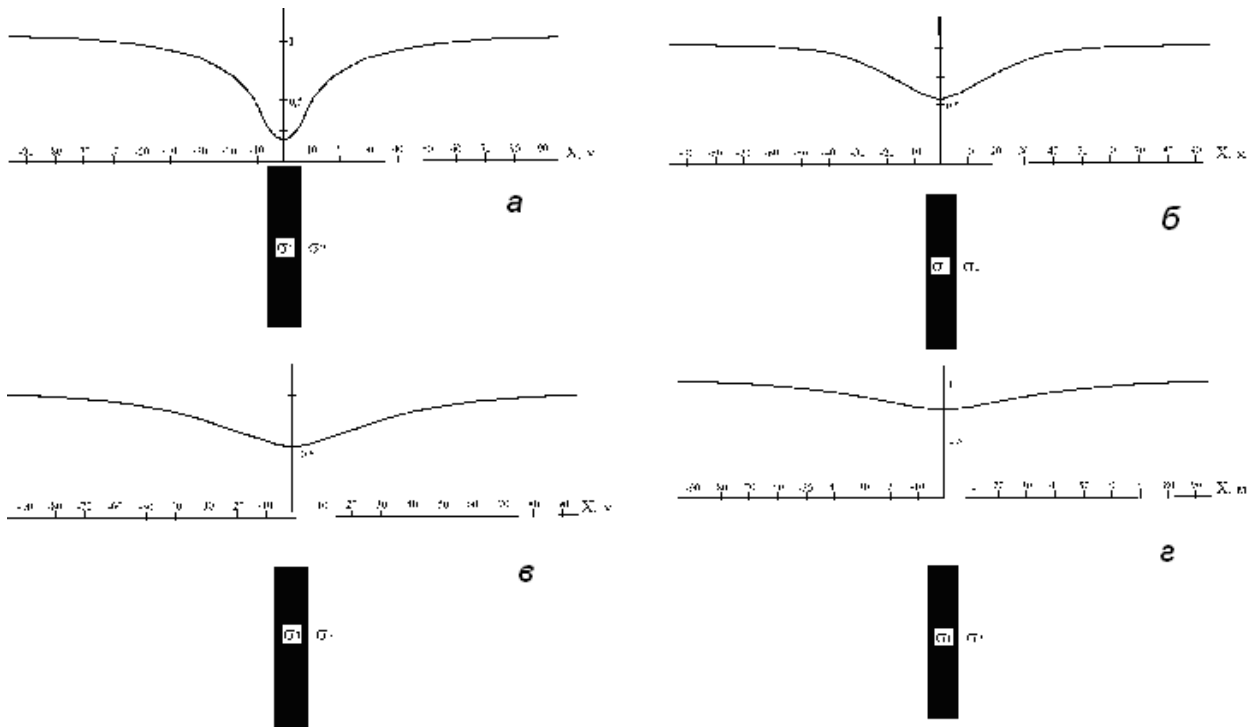


Рис. 5. Нормированные кривые ЕИЭМПЗ при различных параметрах геологической модели разрывного нарушения: а – отношение глубины до верхней кромки/мощность зоны 0,1; б – отношение глубины до верхней кромки/мощность зоны 1; в – отношение глубины до верхней кромки/мощность зоны 1,5; г – отношение глубины до верхней кромки/мощность зоны 2,5

На основе анализа результатов моделирования ЕИЭМПЗ можно сделать следующие выводы.

### Выводы

1. При увеличении мощности перекрывающих пород уменьшается четкость и выразительность аномалий ЕИЭМПЗ.

2. Аномалии от зон разрывных нарушений малой мощности более контрастные, чем от разрывов большой мощности.

Разработанный алгоритм позволяет выполнить моделирование и для разрывных нарушений, в зоне которых присутствуют породы с высокой намагничённостью. В этом случае аномалии ЕИЭМПЗ, приведенные на рис. 5, приобретут зеркальное отражение, т.е. областям с повышенной намагничённостью будут соответствовать более высокие значения нормированной кривой ЕИЭМПЗ. Более сложные расчеты для площадных моделей в настоящее время выполнить, к сожалению, невозможно.

Подытоживая результаты геофизического моделирования, следует отметить, что оно хорошо сопоставимо с данными, полученными при проведении полевых исследований. Наличие «размытого» рисунка аномального магнитного поля и дифференцированного гравитационного позволяет считать выделенный поисковый критерий зон развития гидротермально-метасоматической минерализации в зонах глубинных разломов достаточно надежным и обоснованным и рекомендовать его в внедрению в практику геологоразведочных работ.

### Список литературы

1. Орлинская О.В., Билан Н.В. Анализ пространственных взаимосвязей золоторудной минерализации в зеленокаменных структурах и систем разломов Среднего Приднепровья // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2003. – № 9. – С. 50-52.
2. Взаимосвязь гидротермально-метасоматической минерализации с ортогональной системой разломов / Д.С. Пикареня, О.В. Орлинская, Г.М. Стовас, О.А. Терешкова / Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2007. – № 11. – С. 77-82.
3. О влиянии электромагнитных полей на образование гидротермально-метасоматических рудных формаций / О.В. Орлинская, Д.С. Пикареня, Г.М. Стовас, М.М. Довбнич // Зб. наук. праць / УкрДГРІ. – 2007. – № 2. – С. 98-104.
4. Галецкий Л.С., Шевченко Т.П. Трансрегиональные рудоконцентрирующие мегазоны активизации // Геологія у 21-му столітті: Шляхи розвитку та перспективи. – К.: Знання, 2001. – С. 70-82.
5. Горлицкий Б.А., Занкевич Б.А., Шмелев Е.Г. Типизация геохимических аномалий Украинского щита и

их структурно-геологическое положение // Зб. Наук. праць Ін-ту геохімії навколишнього середовища. – 2003. – Вип. 8. – С. 202-215.

6. Гинтов О.Б. Полевая тектонофизика. – К.: Феникс, 2005. – 572 с.

7. Геология медно-никелевых месторождений // Сб. науч. тр. / Л.А. Арутюнян, Е.В. Баташев, В.С. Голубков и др. – Л.: Наука, 1990. – 280 с.

8. Геоэлектрические модели золоторудных месторождений Украинского щита и Донбасса / Н.Я. Азаров, В.В. Белявский, С.В. Гошовский и др. – К.: Знання, 1999. – 160 с.

9. Кузнецов И.В., Осыкин М.В. Методологические и методические подходы к изучению региональных и локальных закономерностей формирования оползней на основе комплексных геолого-геофизических исследований // Зб. наук. праць / УкрДГРІ. – 2006. – № 3. – С. 107-113.

10. Орлинская О.В., Довбнич М.М. Глубинные разломы мелкоамплитудная нарушенность угольных пластов и естественные поля Земли // Сб. научн. тр. НГАУ. – 1998. – № 2. – С. 224-228.

11. Особенности естественного импульсного электромагнитного поля Земли над золоторудными месторождениями Украины и Казахстана / Д.С. Пикареня, О.Ф. Братчук, П.Ф. Якубенко, О.В. Орлинская // Зб. наук. праць / НГУ. – 2008. – № 31. – С. 9-19.

12. Орлинская О.В., Пикареня Д.С. Новый поисковый признак зон гидротермального метасоматоза // Зб. наук. праць УкрДГРІ. – 2008. – № 1. – С. 72-78.

13. Орлинская О.В., Пикареня Д.С., Бутырин В.К. О возможности применения метода ЕИЭМПЗ для картирования докембрийских образований и выделения зон, перспективных на гидротермально-метасоматическую рудную минерализацию // Матер. IV наук.-вироб. наради геологів-зйомщиків України “Геологія та питання геологічного картування і вивчення докембрійських утворень Українського щита”, м. Кривий Ріг, 8-12 жовтня 2007 р. – Дніпропетровськ, 2007 – С. 188-191.

14. Возможности метода естественного импульсного электромагнитного поля Земли для поисков гидротермально-метасоматической рудной минерализации / Д.С. Пикареня, О.В. Орлинская, П.И. Гладун, С.В. Вагин // Коренные и рассыпные месторождения алмазов и важнейших металлов: Тез. докл. Междунар. научн.-практич. конф., 15-21 сент., 2008, г. Симферополь – Судак. – С. 151-152.

15. Познанская Н.В., Ярошук Э.А., Красовский С.С. Изменения петрофизических и петрохимических параметров докембрийских пород в зонах глубинных-разломов Северного Криворожья // Геофиз. журн. – 1999. – Т. 21, № 1. – С. 106-112.

*Рекомендовано до публікації д.г.-м.н. К.Ф. Тяпкіним 12.02.09*

П.И. Пигулевский

## О МЕТОДИКЕ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА СТАДИИ ПОИСКА ТЕЛ ЛАМПРОИТОВОГО И КИМБЕРЛИТОВОГО МАГМАТИЗМА В ЗАПАДНОМ ПРИАЗОВЬЕ

Розглянуто основні методичні прийоми інтерпретації геофізичних матеріалів при підготовці великомасштабних прогностичних карт алмазоносності в межах Західноприазовського блоку Українського щита.

Рассмотрены основные методические приемы интерпретации геофизических материалов при подготовке крупномасштабных прогностических карт алмазоносности в пределах Западноприазовского блока Украинского щита.

The basic methodical ways of interpretation of geophysical materials are shown by preparation the large-scale prognosis maps of diamondiferous rocks within the Western-Priazov block of Ukrainian shield.

**Введение.** Проблема пространственного размещения лампроит-кимберлитовых полей тесно связана с вопросом генезиса лампроитов и кимберлитов и их эволюции. Несмотря на обилие сведений по этому вопросу [1-5], достигнутый уровень данных явно недостаточен для их использования с целью прогнозирования и поисков месторождений алмазов по геофизическим данным. Как известно, существует две основные группы гипотез локализации лампроитов и кимберлитов в обособленные группы или поля. Первая группа гипотез предполагает наличие в мантии отдельных линзовидных тел определенного состава, которые в результате декомпрессии, поступления эндогенного тепла и т.д. начинают плавиться и перемещаться к поверхности по системе трещин. Вторая – базируется на существовании относительно однородной мантии, на которую воздействуют потоки (плюмы), поднимающиеся из нижней мантии. Такое воздействие инициирует локальное проявление магматизма в виде обособленных полей.

Существующие модели глубинного образования лампроитов и кимберлитов, несмотря на их различия, сходятся в том, что для их внедрения на поверхность необходимы определенные структурно-тектонические условия в верхнекоровом пространстве. Если считать, что эти условия существовали независимо от эволюции лампроит-кимберлитового очага, то они в принципе могли проявиться на больших территориях вне связи с лампроитами и кимберлитами, но этот магматизм мог реализоваться лишь там, где на глубине существовала мобильная магматическая колонна, потенциально готовая к перемещению в верхние горизонты. Если же структурно-тектоническая перестройка среды обусловлена внедрением лампроитов и кимберлитов, то указанные изменения происходят в пределах ограниченного пространства – лампроитового или кимберлитового полей. Таким образом, локализованный участок внедрения лампроитов и кимберлитов (лампроитовое или кимберлитовое поля) должен на некоторой глубине характеризоваться наличием среды, отличающейся от окружающей проявлением специфических условий в виде изменения структурно-тектонической

обстановки и вещественных преобразований, происшедших под воздействием коромантийных веществ и геодинамических процессов. Указанные физико-геологические изменения среды в районах проявления лампроит-кимберлитового магматизма, как показывают проведенные исследования, находят свое отражение в геофизических полях.

**Влияние геодинамического фактора на аномальные особенности геофизических полей.** До сих пор недостаточно учитывается его влияние при интерпретации геофизических полей и, в первую очередь, гравитационного. На горную породу, залегающую на определенной глубине, действуют в основном два вида напряжений: литостатическое и девиаторное. Литостатическое напряжение вызвано весом вышележащих пород и направлено по нормали вниз. Девиаторное (или неотектоническое) напряжение действует в горизонтальном направлении на единицу поперечного сечения тела. Нормальный градиент литостатического напряжения составляет около 23 МПа на 1 км. Типичные значения девиаторных напряжений в земной коре имеют порядок 10-100 МПа. По лабораторным данным в этих условиях магнитные свойства пород существенно изменяются. Так, при давлении 100-200 МПа, что соответствует глубинам 5-10 км, уменьшение магнитной восприимчивости магнетита в породе может составить 10% [6]. Уменьшение остаточной намагниченности в этих же условиях при одноосном напряжении составляет до 40-50%. С учетом девиаторной составляющей изменение магнитных свойств должно быть еще больше. Значительно сложнее зависимость плотностных свойств от напряженного состояния среды. В лабораторных условиях получены данные, свидетельствующие о росте объемного веса пород на 2-3% при увеличении давления от 0,1 до 1500 МПа [6]. Таким образом, с глубиной плотность должна увеличиваться. В реальных условиях наблюдается иная картина. Прямыми наблюдениями в Кольской сверхглубокой скважине [7] на глубине 6800 м вскрыт архейский комплекс, сложенный биотит-плагиоклазовыми и высокоглиноземистыми гнейсами и амфиболитами с плотностью 2,6-2,9 г/см<sup>3</sup>, что значительно ниже от-

носителем вышележащих протерозойских осадочно-вулканогенных пород ( $2,9-3,2 \text{ г/см}^3$ ). Таким образом, чувствительность пород и минералов к изменениям напряжения достаточно высока. Если считать, что геодинамические условия в районах лампроит-кимберлитового магматизма отличались определенной спецификой и величины давлений явно превосходили “нормальные” и, если учесть повышенный тепловой поток в районе влияния магматической колонны, то следует допустить, что эти условия определенным образом воздействовали на физические свойства и способствовали появлению аномальных особенностей среды.

**Перспективы алмазности Приазовского мегаблока УЩ.** Для среднемасштабной оценки перспектив алмазности Приазовского мегаблока УЩ был составлен комплект специальных карт различного содержания в масштабе 1:200 000 – геологическая, структурно-тектоническая, шлихо-минералогическая, геофизические (магнитная, гравиметровая и их трансформации, светотеневые структурно-морфологические физических полей и глубинные геолого-геофизические разрезы), космогеологического дешифрирования, морфоструктурного анализа дневного рельефа и др. Анализ и интерпретация их были направлены на выявление, сначала общих региональных признаков алмазности, затем по методу сочетания благоприятных поисковых критериев и их значимости, на выделение отдельных участков и площадей перспективных в отношении обнаружения коренных источников алмазов. После этого была подготовлена интегрированная карта перспектив алмазности Приазовского мегаблока масштаба 1:200000 с врезками масштаба 1:50000 по хорошо изученной Западной части Приазовского мегаблока.

По этим материалам Приазовский мегаблок УЩ является консолидированным в позднем докембрии участком континентальной земной коры, сложенным архей-протерозойскими, сложнослоистыми ультраметаморфическими и метаморфическими образованиями, являющимися продуктами глубокой метаморфической проработки первичных осадочных, вулканогенно-осадочных пород и интрузивными комплексами. По своему возрасту и формационным комплексам, принимающим участие в его строении [8], он относится к архону, который претерпел несколько эпох тектоно-магматической активизации. По данным интерпретации материалов глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ) к блоку приурочен, так называемый, Азовский мантийный купол. В центральной части его мантия приподнята до глубины 35 км, по периферии она залегает на глубине 45 км.

Значения теплового потока в границах блока изменяются в пределах  $34-53 \text{ мВт/м}^2$  (при среднем –  $45 \text{ мВт/м}^2$ ) и являются относительно повышенными по отношению к другим блокам УЩ, а геотермический режим соответствует таковому для древних платформ.

Из этих общих предпосылок и по аналогии с другими алмазоносными провинциями (Архангельская, Уральская, Сибирская и др.) Приазовский мегаблок УЩ относится к числу потенциально перспективных в отношении проявления коренной алмазности.

По особенностям геологического строения, характеру и времени проявления магматической деятельности, геофизическим данным, космогеологическому дешифрированию он разделяется на два блока II порядка – Западный и Восточный. Условная граница между ними (согласно данным ГСЗ) проходит по Малоянисольской тектонической зоне. Причем, Восточноприазовский блок приподнят и по этой зоне надвинут на Западноприазовский. По петроплотностным и магнитным характеристикам они имеют некоторые отличия. Западный блок выделяется как область развития более основных пород, Восточный – более кислых. На космоснимках и в гравитационных полях оба блока проявляются как две крупные оvoidно-кольцевые структуры. В пределах Западноприазовского блока по геологическим, структурно-тектоническим, геофизическим и космогеологическим данным выделены кимберлит-лампроит-вмещающие структуры. Они пересекаются зонами, имеющими глубинное заложение, которые в разное время претерпели тектоно-магматическую активизацию. В пределах этих зон проявилась неопротерозойская активизация со штоками, дайками и жилами ультраосновных пород, представленных лампроитами, горнблендитами, лампрофирами, диабазами [8].

**Методика интерпретации геофизических материалов** изложена в многочисленных публикациях по различным алмазоносным провинциям Мира [1-4]. Методические подходы и результаты геологической интерпретации по этим работам были проанализированы и систематизированы.

В данной статье излагаются в краткой форме лишь основные методические приемы обработки геофизических материалов и космо-геологического дешифрирования по изучению геологического строения, которые были применены при подготовке крупномасштабных прогнозных карт алмазности масштаба 1:50000 Западноприазовского блока, на примере Андреевского купола (Андреевская площадь) Салтычанского антиклинория Приазовского мегаблока УЩ.

Методические подходы сводились к уточнению данных по глубинному геологическому строению, геолого-структурных построений, детализации выделенных зон и участков тектонической и магматической активизаций, структур, благоприятных для проявления кимберлитового и лампроитового магматизма, т.е. к получению основных предпосылок и критериев перспектив алмазности изучаемой площади.

Одной из проблем изучения глубинного строения площадей исследований является недостаточность прямой априорной информации (в основном информация по прямым наблюдениям и скважинам связана с освещением верхней части разреза, первые сотни

метров). Отчасти недостаток этой информации при пометодной обработке удастся восполнить, используя определенную последовательность действий. На основе анализа возможности потенциальных полей, используемой информации, способов решения, можно выделить *четыре этапа* обработки и интерпретации: обработка и районирование; определение предварительных параметров геологического разреза методами решения обратной задачи, требующими минимум априорной информации; уточнение параметров разреза решением прямой задачи и подбором модели изучаемой геологической среды; прогнозирование участков, структур (тел) при помощи автоматизированных прогнозирующих систем (АПС), благоприятных для проявления кимберлитового или лампроитового магматизма. Такая последовательность обработки позволяет максимально использовать для анализа глубинного строения информацию, заключенную в самих геофизических полях.

На *первом этапе* проводилось преобразование исходных полей с целью выделения полезной составляющей. Как правило, здесь достигаются обычно две основные цели: исключение из наблюдаемых полей помехи и выделение региональной и локальной компонент.

Для выбора оптимальных параметров разделения полей с помощью фильтрации или трансформации обычно необходима дополнительная информация о полях и источниках. Сделать заключение о структуре полей: о составляющих, их энергиях, частотных диапазонах, размерах аномалий, простирании основных структур и т.д., а также о возможности выделения отдельных составляющих позволяет расчет корреляционно-спектральных характеристик как для исследуемого поля в целом, так и расчет их в пределах отдельных участков. Полученные в результате анализа этих характеристик выводы явились основой для выбора последовательности и параметров дальнейшей обработки и проведения районирования потенциальных полей с целью выделения границ, отличающихся характером поля. Для этого изучалась структура и текстура полей.

На *втором этапе* с целью получения глубинной характеристики выделенных блоков проводилось определение геометрических и физических параметров неоднородностей разреза верхней части земной коры, при этом использовались методы решения обратных задач гравиразведки и магниторазведки, использующие минимум априорной информации, что позволяет составить общее представление о распределении неоднородностей по глубине, их размерах и контрастности физических свойств.

На *третьем этапе* было выполнено формирование модели геологического строения площади с использованием всей имеющейся геолого-геофизической информации и методики для оценки параметров (плотности) и глубины залегания объектов, которые создают аномалии в гравитационном поле [9]. Эта методика базируется на частотном составе наблюдаемых аномалий потенциальных полей.

Разложение наблюдаемого поля на составляющие с разной несущей частотой, которая в ряде случаев достаточно тесно связана с глубиной залегания аномалиеобразующих объектов. Применение такого подхода позволило автору на этапе построения модели первого приближения получить псевдоплотностную модель, на базе которой была создана 3D геолого-плотностная модель изучаемой площади (рис. 1). Как видно на рисунке, использованный на этом этапе спектрально-корреляционный подход позволил локализовать массы на глубине, определить положение верхних кромок источников аномалий и оценить глубину залегания нижних границ неоднородностей.

На *четвертом этапе* с целью получения оценки распространения лампроитового и кимберлитового магматизма выполнялся прогноз по геолого-геофизическим признакам с помощью АПС ГИС РАПИД, использующей методы распознавания образов и обработки изображений [10], позволяющей решать широкий класс задач обработки, анализа и комплексной интерпретации данных при геолого-геофизическом прогнозировании. При прогнозировании были использованы такие графы обработки [10]: статистическая обработка данных; расчет трансформаций исходных данных с целью выделения разных информационных аспектов; кластер-анализ совокупностей цифровых полей с целью выделения однородных зон, таксономии и районирования; комплексный анализ информации с целью установления связи между разными объектами и явлениями, выделение комплексных аномалий и др.; автоматическое определение информативности цифровых полей и их трансформаций; прогнозирование объектов по комплексу количественных и качественных признаков; оценка эффективности и качества прогнозных построений.

В процессе комплексной интерпретации геолого-геофизических данных использование АПС ГИС РАПИД проводилось в режиме человеко-машинной системы, то есть при решении конкретной задачи автор сам определял последовательность выполняемых процедур и принятия окончательного решения. При этом реализовался принцип многовариантного решения прогнозных задач путем проведения вычислительных экспериментов и их корректности с позиций геологического строения площади исследований.

Анализ геолого-геофизических данных и полученных прогнозных карт позволил сделать следующие выводы: при фиксированной системе признаков качество прогноза определяется составом эталонной выборки, поэтому к классу эталонных объектов были включены представители, которые находятся в разных структурных условиях (внутренний и внешний эталоны); при прогнозировании трубчатых тел влияние регионального фона относительно небольшое, поэтому для формирования признакового пространства, в первую очередь, были использованы аналоги дифференциальных и гистограммных признаков.

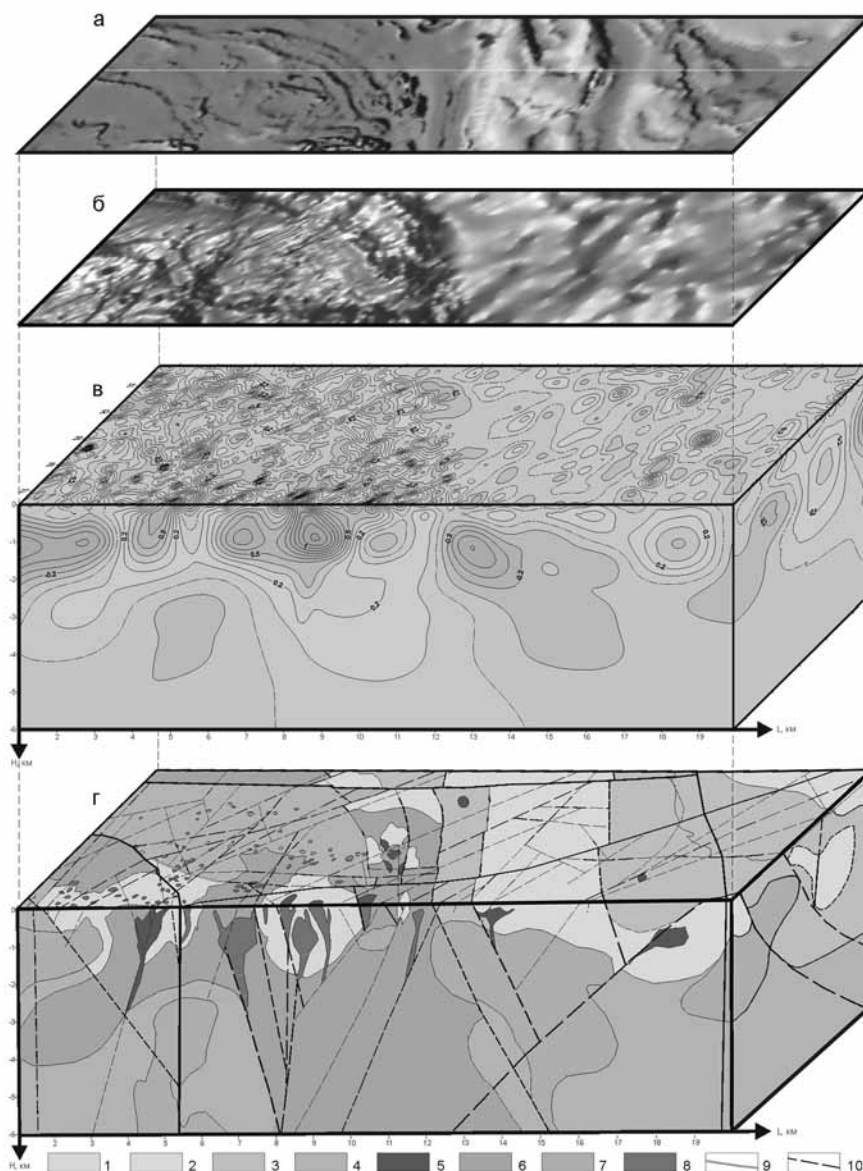


Рис. 1. Фрагмент результатов геолого-геофизических исследований при прогнозировании лампроит-кимберлитового магматизма на примере Андреевского купола Салтычанского антиклинория Приазовского мегаблока УЩ: а – рельефная свето-теневая карта магнитного поля  $Z_a$ ; б – рельефная свето-теневая карта гравитационного поля  $\Delta g_a$ ; в – 3D модель результатов “гравитационного зондирования”; г – объемная геологическая модель площади исследований. Стратиграфические подразделения. Палеоархей. Западноприазовская серия: 1 – верхнетокмакская толща, 2 – каингулакская толща; 3 – драгунская толща. Ультраметаморфические и интрузивно-магматические комплексы. Палеоархей: 4 – ремовский комплекс. Палеопротерозой: 5 – новосельская ассоциация, 6 – обиточенский комплекс, 7 – салтычанский комплекс. Мезопротерозой: 8 – коларовский комплекс, 9 – дайковый комплекс; 10 – тектонические нарушения

Для прогнозирования в сложных геолого-структурных условиях, которые мы имеем на отдельных участках Андреевской площади, дополнительно использовались признаки местоположения, в комплексе с другими; увеличение размерности признакового пространства путем комплексирования не привело к улучшению качества прогноза.

На заключительной стадии исследований при помощи АПС ГИС РАПД, с использованием внутренних эталонов (разрушенные при ГДП-200 тела лампроитов) и внешнего – трубка «Мрия» [8], были вы-

делены и оконтурены прогнозируемые объекты, которые представляют интерес с позиций проявления кимберлитового и лампроитового магматизма.

Кроме анализа и синтеза геофизической информации, для выявления потенциально благоприятных участков проявления лампроитового и кимберлитового магматизма было также проведено дешифрирование аэро-космоснимков и морфоструктурный анализ гипсометрического плана современного рельефа. По данным интерпретации этих материалов в преде-

лах площади исследований было выделено 15 овално-кольцевых структур.

### Выводы

Опираясь на изложенные выше основные подходы в интерпретации геофизических материалов, совместно с космогеологическим дешифрированием, была построена модель глубинного геологического строения Андреевского купола Салтычанского антиклинория (рис. 1), выделены зоны тектонической активизации (тектонические зоны), овоидно-кольцевые структуры разного ранга, кольцевые структуры центрального типа, изотропные аномальные зоны эндогенной трещиноватости и др. Эти данные, в совокупности со структурно-вещественными, минералогическими, петрографическими, геохимическими показателями, позволили наметить участки, благоприятные для проявления лампроит-кимберлитового магматизма и в итоге подготовить карту перспектив площади в масштабе 1:50 000 (*будет приведена в следующей публикации*). На ней показаны прогнозные контуры по данным АПС ГИС РАПИД и основные признаки по результатам качественной интерпретации геолого-геофизической информации и вероятного проявления тел лампроитового и кимберлитового магматизма, на основании которых дана оценка перспектив возможной алмазности этой площади.

Выделенные перспективные участки были разделены на три (1, 2, 3) категории (очереди) перспективности. Участки 1-й очереди характеризуются наличием максимального количества признаков: положительные локальные магнитные аномалии и сниженные значения гравитационного поля над ними, овоиднокольцевые морфоструктуры центрального типа, изотропные зоны эндогенной трещиноватости, преимущественно негативные космоморфоструктуры, высокий уровень перспективности по данным АПС ГИС РАПИД. Участки 2-й очереди перспективности выделены по проявлениям в их границах комплекса ультраосновных и основных пород архейской и протерозойской эпох тектономагматической активизации и более половины благоприятных геофизических и космогеологических поисковых критериев. Для участков 3-й очереди

вышеперечисленные признаки проявлены не так четко, и они выделены, в основном, по данным АПС ГИС РАПИД.

### Список литературы

1. Никулин В.И., Лелюх М.И. Фон-дер-Фласс Г.С. Алмазопрогностика (методическое пособие). – Иркутск, 2001. – 320 с.
2. Ваганов В.И. Алмазные месторождения России и Мира. – М.: Недра, 2000. – 369 с.
3. Гейко Ю.В., Металиди В.С., Приходько В.Л. Перспективы алмазности северо-западной части Украинского щита // *Мінеральні ресурси України*. – 1999. – № 3. – С. 12-15.
4. Геология, закономерности размещения, методы прогнозирования и поисков месторождений алмазов. – Мирный, 1998. – Акционерная компания “Алмазы России-Саха”. Якутское научно-исследовательское геологоразведочное предприятие ЦНИГРИ, сб. статей, 1998. – 308 с.
5. Алмазносные формации и структуры юго-западной окраины Восточно-Европейской платформы. Опыт минерагении алмаза / Яценко Г.М., Гурский Д.С., Сливко Е.М. и др. – К.: УкрГГРИ, 2002. – 331 с.
6. Физические свойства горных пород и полезных ископаемых / Под ред. Н.Б. Дортман. – М.: Недра, 1984. – 455 с.
7. Кольская сверхглубокая. – М.: Недра, 1989. – 486 с.
8. Раздорозный В.Ф., Пигулевский П.И., Козар Н.А. Алмазность и тектоническая активизация Приазовского геоблока Украинского щита // *Науковий вісник НГАУ*. – 2003. – № 1. – С. 24-29.
9. Довбнич М.М. Гравитационное зондирование: идея, алгоритм, промеры // *Науковий вісник НГА України*. – 2003. – № 6. – С. 89-93.
10. Бусыгин Б.С., Мирошниченко Л.В. Распознавание образов при геолого-геофизическом прогнозировании. – Д.: Изд-во ДГУ, 1991. – 168 с.

*Рекомендовано до публікації д.г.-м.н. К.Ф. Тяпкіним 20.01.09*



В.В. Ишков, А.Л. Лозовой, Д.В. Рудаков

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПЕРВЫХ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ УЧАСТКОВ ДНЕПРОВСКИХ ПОРОГОВ

Вперше були встановлені основні особливості геологічної будови ділянок розташування Дніпровських порогів. Межами порогів є розломи, відновлені по геоморфологічних і геофізичних ознаках (дані граві- і магніторозвідки М 1:200 000 і М 1:50 000). Виявлені розломи складають між собою взаємно-ортогональні системи і формують блокову будову земної кори на території розташування Дніпровських порогів. Дослідження речовинного складу і текстурно-структурних особливостей гірських порід свідчать про неодноразові процеси активізації руху блоків земної кори по розломах на ділянках розташування порогів. Розломи земної кори є найпроникнішими зонами, а отже, масо- і енерготранспортними «артеріями» з глибин Землі до її поверхні. Багаторазові етапи активізації руху блоків земної кори, що супроводжуються різними типами деформацій і змінюючими напружений стан масивів гірських порід, слугують своєрідними «генераторами» варіацій електромагнітного поля.

Впервые установлены основные особенности геологического строения участков Днепровских порогов. Границами порогов являются разломы, восстановленные по геоморфологическим и геофизическим признакам (данные гравитационной и магниторазведки М 1:200 000 и М 1:50 000), составляющие между собой взаимно-ортогональные системы и формирующие блоковое строение земной коры на территории расположения Днепровских порогов. Исследования вещественного состава и текстурно-структурных особенностей горных пород свидетельствуют о неоднократных процессах активизации движения блоков земной коры по разломам на участках порогов. Разломы земной коры являются наиболее проницаемыми зонами, а следовательно массо- и энерготранспортными «артериями» из глубин Земли к ее поверхности. Многократные этапы активизации движения блоков земной коры, сопровождающиеся различными типами деформаций и изменяющимися напряженным состоянием массивов горных пород, служат своеобразными «генераторами» вариаций электромагнитного поля.

The basic features of geological structure of areas of Dnepr rapids are first installed. The scopes of rapids are breaks, restored by geomorphologic and geophysical showings (the data of gravimetrical prospecting and magnetic exploration М 1:200 000 and М 1:50 000), forming between itself the mutually ortogonal systems and formative the block's construction of the earth's crust on territory of location of Dnepr's rapids. Researches of material composition and texture-structured features of rocks testify to the repeated processes of activation of the motion of earth's crust's blocks on breaks on the areas of rapids. The breaks of the earth's crust are the most permeable areas and consequently mass- and energotransport's "arteries" from the Earth to its surface. The frequent stages of activation of motion of blocks of the earth's crust, attended with different types of deformations and changing the tense state of arrays of rocks, serve as the original "generators" of variations of the electromagnetic field.

Днепровские пороги были известны с незапамятных времен. Первое достоверное и дошедшее до нас из глубины веков упоминание о них принадлежит «отцу истории» Геродоту [1]. Посетив в 5 веке до н. э. греческую колонию Ольвию, он отмечает, что там, где Борисфен перестаёт быть судоходным от моря, расположена местность Герра, в которой скифы хоронят своих царей. Археологические находки, сделанные в курганах скифской эпохи, дают основание утверждать, что легендарная Герра находится в пределах Днепропетровской области. И именно здесь, на сакральной для скифов территории и расположены Днепровские пороги.

В десятом веке византийский император Константин Багрянородный в составленном для поучения сыну сочинении «Об управлении империей» (948-952 гг.) [2] впервые подробно описал пороги, приведя соответствующие названия «по-росски» и «по-славянски».

В то же время, несмотря на многочисленные историко-этнографические сведения о Днепровских по-

рогах, достоверная информация о геологическом строении участков расположения порогов до настоящего времени практически полностью отсутствует.

В связи с этим основной целью данных исследований являлось установление особенностей геологического строения участков Днепровских порогов и предварительный анализ возможного использования полученных результатов в целях экономического развития Украины.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Определение геодезических координат и установление на местности положения затопленных Днепровских порогов, наблюдение и анализ морфогенетических особенностей форм современного рельефа на участках их расположения.

2. Установление минералого-петрографического состава и структурно-текстурных особенностей пород, формирующих Днепровские пороги. Классификация пород и определение принадлежности их к ранее установленным в регионе комплексам.

3. Выявление геолого-структурных особенностей участков расположения Днепровских порогов.

Основными источниками первичных топогеодезических картографических материалов являлись архивные и опубликованные историко-географические материалы, современные официальные издания административных карт Днепропетровской и Запорожской областей масштаба 1:250 000 и разномасштабные космоснимки территории долины р. Днепр между городами Днепропетровском и Запорожьем.

Использование данного комплекса материалов позволило определить координаты порогов с точностью до секунды и положение их границ на местности с точностью  $\pm 10 - 20$  м.

Наблюдение и анализ морфогенетических особенностей рельефа на участках расположения Днепровских порогов позволили выявить на их границах современные овражно-балочные системы. Как правило, они характеризуются резко выраженным V-образным поперечным профилем, крутым продольным профилем и субпараллельной линейностью простираения относительно границ порогов (рис. 1). Подобные геоморфологические образования являются общепринятыми признаками тектонических разрывных нарушений. Наличие линейных ступенеобразных уступов и линейные зоны мульдоподобных депрессий в формах современного рельефа на территории, непосредственно примыкающей к этим овражно-балочным системам свидетельствует об активной динамике вертикальных движений блоков земной коры на участках порогов и в настоящее время.



Рис. 1. V-образный поперечный профиль и ступенеобразные уступы в линейной овражно-балочной системе на границе участка одного из порогов

Основными источниками первичных геолого-геофизических данных являлись листы М-36-XXXVI (Днепропетровск) и L-36-VI (Запорожье) Центральноукраинской серии Государственной геологической карты Украины масштаба 1:200 000, схема рельефа кристаллических пород фундамента территории Среднего Приднепровья Украинского кристаллического щита масштаба 1:200 000, результаты гравитационной и магнитометрической съемки территории Среднего Приднепровья Украинского кристаллического щита масштаба 1:200 000 и, частично, результаты гравитационной и магнитометрической съемки долины р. Днепр между городами Днепропетровском и Запорожьем масштаба 1:50 000.

Собранный комплекс первичных геолого-геофизических данных позволил установить наличие и площади распространения на изучаемой территории определенных комплексов геологических образований, оценить их возрастные взаимоотношения, геоструктурное положение и минералогическо-петрографические особенности, а также выполнить комплексную интерпретацию первичных геолого-геофизических данных.

В качестве идейной основы комплексной геоструктурной интерпретации первичных геолого-геофизических данных на исследуемой территории была принята «Новая ротационная гипотеза структурообразования в земной коре» проф. Тяпкина К.Ф. [3, 4 и др.]. Подчеркнем ряд характерных особенностей разломных структур, непосредственно вытекающих из этой концепции.

1. Разломы земной коры располагаются в пространстве не произвольно, а укладываются в определенные системы. Под системой понимаются разломы двух взаимно-ортогональных направлений. В пределах системы разломов наблюдается некоторая иерархическая соподчиненность разломов, заключающаяся в определенном чередовании относительно крупных и мелких разломов. Каждая система разломов возникает в процессе определенной тектонической эпохи. Ранее проведенными исследованиями в пределах Украинского щита установлено, по крайней мере, шесть систем разломов, характеризующихся следующими азимутами простираций: 0 и 270, 17 и 287°, 35 и 305, 45 и 315, 62 и 332, 77 и 347° [3, 4 и др.]. В процессе выявления и изучения пространственного положения индикаторов разломов в физических полях и особенностях геологического строения мы исходили из условий наличия этих шести систем и достоверности установленной ранее ориентировки осевых линий слагающих их разломных структур, допуская возможные отклонения отдельных элементов в пределах  $\pm 2-3^\circ$ .

2. Разломы прослеживаются на поверхности Земли в виде отдельных фрагментов. Фрагментарность разломов является следствием возникновения очередной системы разломов земной коры на гетерогенном (блоковом) основании и нарушении возникающих разломов в процессе последующих эпох тектонических активизаций Земли. В данном случае важно подчеркнуть, что каждая разломная структура состоит из отдельных далеко не однородных фрагментов, объединенных единой осевой линией выдержанного простираения. При этом особенность фрагментов в физических полях может быть слабо выражена либо сменой индикаторов разломов, либо шириной зоны их проявлений, либо и тем и другим одновременно.

3. Одной из особенностей разломов является их «трансформность». Под этим термином понимается одна из особенностей разломов, заключающаяся в том, что отдельные их фрагменты оказываются параллельно смещенными относительно осевой линии на ограниченные расстояния вдоль поперечных разломов этой же системы или диагональных разломов других систем.

4. Установленный закон «унаследованной активизации разломов» [2] заключается в том, что в процессе последующих тектонических активизаций разрывное нарушение земной коры, уже разбитой на блоки, осуществляется с учетом предыдущих блокировок. Образование новой системы разломов происходит частично за счет раскалывания блоков, а частично – за счет обновления (активизации движения) фрагментов разломов ранее возникших систем, но так, что осевые линии вдоль формируемых разломов совпадают с направлением разрядки планетарных напряжений в соответствующую тектоническую эпоху.

Из приведенных в трех первых пунктах особенностей формирования структур земной коры следует, что если вынести на карту все индикаторы разломов, то они должны отражать поле планетарных напряжений соответствующей тектонической эпохи, в результате разрядки которого и происходила ломка земной коры. Современное проявление разломных структур на этой карте должно соответствовать полосам концентрации индикаторов, состоящим из фрагментов разной ширины, смещенным относительно осевой линии и представленным различными сочетаниями этих индикаторов.

Четвертая особенность разломов имеет существенное значение для восстановления последующей истории развития фрагментов разломов ранее возникших систем в более поздних тектонических активизациях движения по ним.

Установление систем разломов по геолого-геофизическим данным происходило в три этапа: 1 – выявление характерных признаков (индикаторов) разломных структур в физических полях, рельефе докембрийского фундамента и земной поверхности, речной и балочной сети; 2 – восстановление фрагментов разломов (зон концентрации индикаторов на плоскости наблюдений); 3 – объединение фрагментов в единые разломные структуры.

Геолого-геофизические признаки (индикаторы) разломных структур и их выражение в физических полях подробно рассмотрены в многочисленной специальной литературе. В этой главе нами ниже приведен перечень тех из них, которые непосредственно использовались при выявлении признаков разломов, с их краткой характеристикой.

Было выявлено, что в долине р. Днепр между городами Днепропетровск и Запорожье фундамент Украинского кристаллического щита сложен пятью комплексами пород: Днепропетровским, Славгородским, Александровским, Мокромосковским и Демуринским. В результате комплексной геоструктурной интерпретации первичных геолого-геофизических данных установлено, что на участке каждого из порогов расположено пересечение от 2 до 4 глубинных разломов. В то же время, масштабы первичных геолого-геофизических материалов в большинстве случаев не позволяли однозначно классифицировать породы, слагающие пороги, и определить их формационную принадлежность, а также особенности минералого-петрографического состава.

Для установления минералого-петрографического состава и структурно-текстурных особенностей пород формирующих участки Днепровских порогов, классификации пород и определение принадлежности их к ранее установленным в регионе комплексам была выполнена фотодокументация естественных и искусственных обнажений и проведен отбор проб для минералого-петрографических исследований.

В результате выполненных работ установлено, что все Днепровские пороги сформированы гранитоидами Днепропетровского комплекса ( $Ar_1dn$ ) Нижнеархейского возраста, образовавшимися 3,2-3,4 миллиардов лет назад. Это биотитовые граниты, роговообманково-биотитовые граниты (Кодацкий, Вовниговский пороги), гранодиориты (Сурский, Лоханский пороги), биотитовые плагиограниты (Лоханский, Звонецкий, Ненасытецкий пороги), двуслюдяными гранитами (Вовниговский порог), эпидот-биотит-микроклиновыми плагиогранитами (Звонецкий порог), микроклиновыми гранитами (Вовниговский порог), выветрелыми плагиогранитами (Кодацкий, Звонецкий, Ненасытецкий, Будилковский пороги), эпидотизированными биотитовыми гранитами (Кодацкий порог), и эпидозитом (рис. 2) (Кодацкий порог). Формационная принадлежность пород образующих Лишний и Вольный порог из-за большой степени затопленности территории определялась на основании результатов комплексной геолого-геофизической интерпретации первичных материалов.



Рис. 2. Эпидозит

В гранитоидах на участках порогов наиболее часто наблюдаются массивные, гнейсовидные (рис. 3), пятнистые и полосчатые текстуры, реже – биотит-роговообманковые рститы (рис. 4). На границах участков порогов широко развиты зоны катаклаза представленные как субпараллельными (рис. 5), так и взаимно-ортогональными (рис. 6) жилами микроклина, эпидота и кварца. Жильные образования часто полиминеральны и характеризуются сложным строением (рис. 7). В этом случае обычно наблюдается следующая зональность от центра к зальбандам: кварц, эпидот, микроклин. В естественных обнажениях у границ порогов встречены линейные участки повышенной трещиноватости сформированные взаимно ортогональными трещинами.





Рис. 3. Биотит-роговообманковые гранитоиды с гнейсовидной, полосчатой текстурой и неравномерно зернистой структурой



Рис. 4. Биотит-роговообманковый рестит

Микроскопически породы характеризуются большим количеством полихронных реакционных взаимоотношений между минералами, пертитов и антитертитов, включений хадакристаллов в ойокристаллах (рис. 8, 9) и различно ориентированных микротрещин с мономинеральными (рис. 10) полиминеральными (рис. 11) прожилками.



Рис. 5. Субпараллельные прожилки микроклина, формирующие зоны микроклинизации

Полученные результаты позволяют сформулировать следующие основные выводы:

1. Несмотря на то, что в долине р. Днепр между городами Днепропетровск и Запорожье фундамент Украинского кристаллического щита сложен 5 комплексами пород (Днепропетровским, Славгородским, Александровским, Мокромосковским и Демуриным), все Днепровские пороги сложены одними и теми же горными породами – гранитоидами Днепропетровского комплекса ( $Ar_1dn$ ) Нижнеархейского возраста, образовавшимися 3,2-3,4 миллиардов лет назад. Это одни из древнейших пород не только Украины, но и планеты, естественным образом выходящие на земную поверхность. Их формирование дало начало истории протоконтинентов Земли.

2. Геологическими границами порогов являются зоны тектонических разрывных нарушений, установленные по геоморфологическим и геофизическим признакам (данные грави- и магниторазведки М 1:200 000 и М 1:50 000). Выявленные системы разломов являются границами блоков и формируют блоковое строение земной коры на территории расположения Днепровских порогов.



Рис. 6. Полихронные и преимущественно взаимно-ортогональные зоны микроклинизации, эпидотизации и окварцевания



Рис. 7. Сложное строение полиминеральной жилы



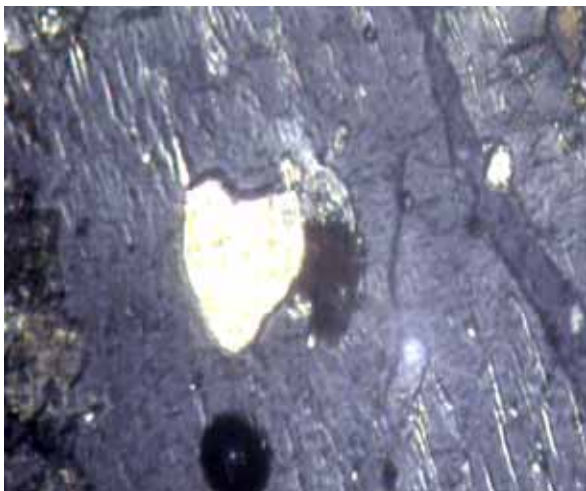


Рис. 8. Зерно хадакрystalла кварца в ойкокристалле плагиоклаза. Николи скрещены. Ув. x 105

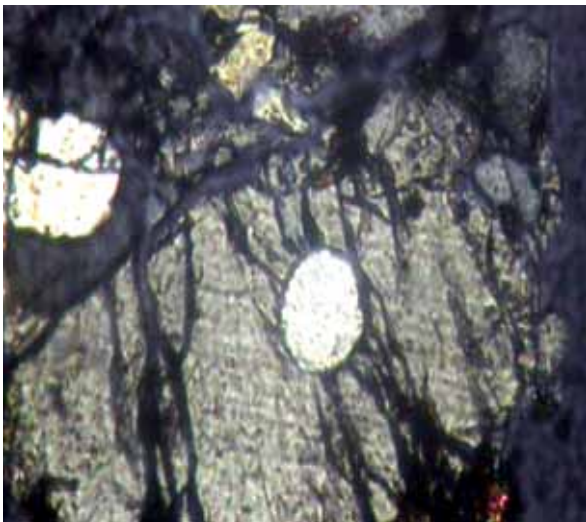


Рис. 9. Включение хадакрystalла кварца изометрической формы в ойкокристалле кварца другой генерации. Николи скрещены. Ув. x 105

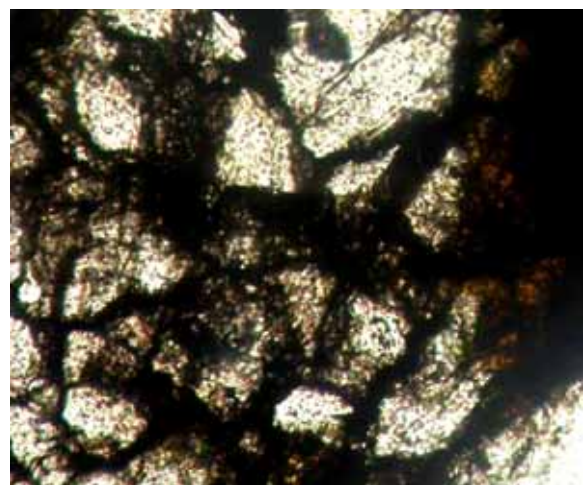


Рис. 10. Микропрожилки, выполненные гематитом. Ув. x 90

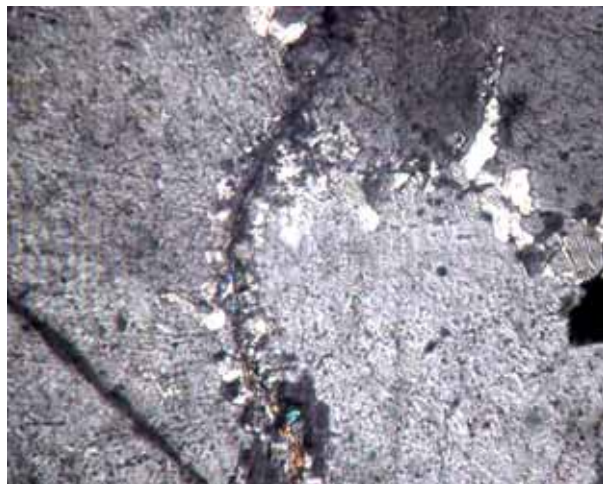


Рис. 11. Микротрещина, заполненная клиноцоизитом, по зальбандам развиваются кварц и микроклин. Николи скрещенные. Ув. x 120

3. Исследования вещественного состава и текстурно-структурных особенностей горных пород свидетельствуют о неоднократных процессах активизации движения блоков земной коры по разломам на участках расположения порогов. В то же время, анализ индикаторов тектонических движений в рельефе на примыкающей к порогам территории показывает, что вертикально-восходящее перемещение локальных блоков земной коры, которые, собственно, и образовали своей верхней частью пороги в долине р. Днепр, продолжается и в настоящее время.

4. Находящиеся непосредственно на участках расположения Днепровских порогов, тектонические разломы земной коры являются наиболее проницаемыми зонами, а следовательно массо- и энерготранспортными «артериями» из глубин Земли к ее поверхности.

5. Доказанные в ходе выполненных исследований многократные этапы активизации движения блоков земной коры, сопровождающиеся различными типами деформаций и изменяющимися напряженное состояние массивов горных пород, служат своеобразными «генераторами» вариаций электромагнитного поля.

6. Перемещение пород различной плотности в процессе движения блоков земной коры по тектоническим разломам, существенным образом, отражается в положении и характере локальных аномалий поля силы тяжести.

7. Потенциальная и внутренняя энергия, накопленная при образовании минералов и структур горных пород, переходят в другие виды энергии, выделяющиеся в результате последующих этапов минералообразования и деформационных процессов земной коры на участках Днепровских порогов.

Основное научное значение полученных результатов заключается в том, что впервые были установлены основные особенности геологического строения участков расположения Днепровских порогов.

Практическое значение полученных результатов состоит в следующем.

Уникальность рассматриваемых участков, слагающего их комплекса горных пород и геолого-структурных особенностей территорий расположения Днепровских порогов, уже на данном этапе изучения, позволяет рассматривать эти образования как один из наиболее перспективных туристических объектов региона.

Результаты комплекса дальнейших геолого-геофизических исследований территории Днепровских порогов могут лечь в основу создания международного научного полигона по изучению процессов тектономагматической активизации и минералообразования в древнейший период формирования планеты. Организация работы международного научного полигона будет способствовать привлечению инвестиций в экономику региона.

Полученные результаты позволили Днепропетровскому общинному фонду (E-mail: [nppsw@optima.com.ua](mailto:nppsw@optima.com.ua), сайт: [www.dniproviporogy.org](http://www.dniproviporogy.org)) разработать план комплексных научных исследований территорий расположения Днепров-

ских порогов на 2009 г. с привлечением ученых в области химии, физики, астрофизики, биологии, медицины и аграрных наук.

#### Список литературы

1. Геродот. История. В 9-ти кн. / Пер. Г.А. Стратоновского. – М.: ООО “Изд-во АСТ”, “Ладомир”, 2001. – 752 с. – (Классическая мысль).
2. Константин Багрянородный. Об управлении Империей / Пер. Г.Г. Литаврина. – М.: Наука, 1991. – 496 с. – (Древнейшие источники по истории народов СССР).
3. Тяпкин К.Ф., Кивелюк Т.Т. Изучение разломных структур геолого-геофизическими методами. – М.: Недра, 1982. – 239 с.
4. Тяпкин К.Ф. Изучение разломных и складчатых структур докембрия геолого-геофизическими методами. – К.: Наукова думка, 1986. – 168 с.

*Рекомендовано до публікації д.г.-м.н. В.М. Нагорним 25.02.09*

УДК 549:553.31(477.63)

**С.В. Карпенко, В.Д. Евтехов, А.В. Евтехова**

### **АУТИГЕННО-МЕТАМОРФОГЕННАЯ МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ЗОНАЛЬНОСТЬ ПРОДУКТИВНОЙ ТОЛЩИ АННОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (КРИВОРОЖСКИЙ БАССЕЙН)**

Викладено результати петрохімічного вивчення особливостей зональної будови продуктивної товщі Ганнівського родовища, яка складена об'єднаним п'ятим-шостим залізистими горизонтами саксаганської світи.

Изложены результаты петрохимического изучения особенностей зонального строения продуктивной толщи Анновского месторождения, представленной объединенным пятым-шестым железистым горизонтом саксаганской свиты.

Results of petrochemical studies of zone structure peculiarities at Annovka deposit rock mass represented by integral fifth-sixth ferruginous horizon of Saksagan suite have been described.

Аутигенно-метаморфогенная зональность является основным проявлением минералогической и геохимической неоднородности железисто-кремнистой формации докембрия. Существует несколько суждений о причинах зональности. К наиболее известным относится гипотеза Н.М. Страхова [1], по мнению которого, транспортирование железа в палео- и мезопротерозое производилось речными водами в виде гидроксидов – частично в виде тонкой суспензии – «ржавца», частично – в виде коллоидного растворов совместно с золем кремнезема. На дне бассейна происходило осаждение гидроксидов трехвалентного железа, которые затем частично или полностью восстанавливались до закисной формы в процессе диагенеза осадков под влиянием органического вещества. Содержание последнего с глубиной возрастало от песков к глинам, а затем снова уменьшалось от гли-

нистых отложений к пелагическим хемогенным осадкам. Соответственно, степень восстановления железа росла в направлении от песков к глинистым осадкам, а затем уменьшалась от них к кремнисто-железистым образованиям.

Ритмика зоны седиментации обуславливала ритмичность состава железистых осадочных образований. Хемогенным железисто-кремнистым осадкам, преобразованным в результате динамотермального метаморфизма в железнослюдко-магнетитовые, магнетитовые и близкие по составу кварциты, отвечают центральные зоны железистых горизонтов. Примесь хемогенно-кластогенного и кластогенного материала в осадках обусловила образование в результате метаморфизма силикат-карбонат-магнетитовых, магнетит-силикат-карбонатных кварцитов, характерных для периферийных зон железистых горизонтов. Про-

дуктами метаморфизма песчано-глинистых осадков являются разного состава сланцы, слагающие сланцевые горизонты железисто-кремнистой формации.

Часть исследователей [2-4] связывает образование железисто-кремнистой формации докембрия с вулканическими процессами. Ритмическое строение железорудных толщ с этих позиций объясняется сменой соотношения вулканогенно-кластогенного (вулканический пепел, туфы) и вулканогенно-хемогенного (продукты фумарольной деятельности) материала.

Детальное исследование строения разрезов сланцевых и железистых горизонтов дало основание ряду геологов [4-8] сделать вывод о закономерной вариативности минерального состава железорудных толщ. Обобщенный разрез железистого и сланцевого горизонтов в направлении от центральной части первого к центральной части второго изображен на рис. 1.

В разрезах конкретных стратиграфических горизонтов идеальная зональность полностью не проявлена в связи с отсутствием в их составе одного или нескольких пластов, сложенных породами, входящими в состав идеального аутигенно-метаморфогенного ритма. Например, для центральных зон железистых горизонтов саксаганской свиты всех месторождений

Криворожского бассейна не характерно присутствие железистых кварцитов с количественным преобладанием железной слюдки над магнетитом. В то же время центральные зоны артемовской свиты, являющейся продуктивной толщей Петровского месторождения, сложены, преимущественно, магнетит-железнослюдковыми, иногда железнослюдковыми кварцитами. Однако в разрезе ее периферийных зон слабо проявлены силикат-магнетитовые и магнетит-силикатные кварциты.

Как следует из результатов предыдущих исследований [8-11], минералогическая зональность железорудных толщ эффективно моделируется с использованием петрохимической диаграммы с координатами  $M_o$ - $M_m$ , где

$$M_o = Fe_2O_3 / (FeO + Fe_2O_3),$$

$$M_m = Fe_{магн.} / Fe_{общ.}$$

Диаграмма показала высокую информативность при изучении продуктивных толщ Ингулецкого, Анновского и других месторождений Криворожского бассейна [10-12].

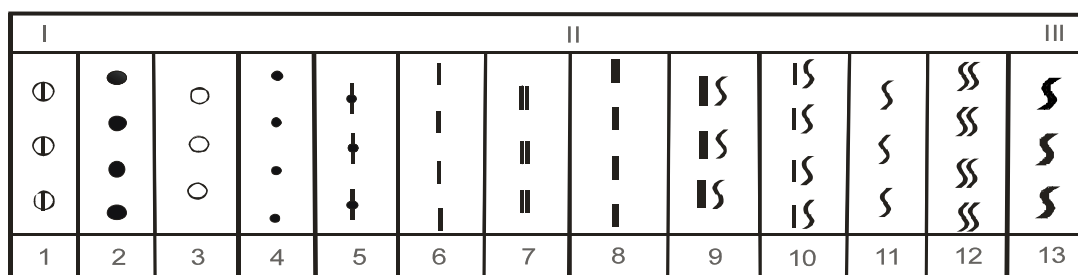


Рис. 1. Схема аутигенно-метаморфогенной минералогической зональности железисто-кремнистой формации Криворожского бассейна (в разрезе от центральной части железистого горизонта до центральной части сланцевого горизонта). Железистые породы: 1 – кварциты железнослюдковые с магнетитом; 2 – кварциты магнетит-железнослюдковые; 3 – кварциты железнослюдко-магнетитовые; 4 – кварциты магнетитовые с железной слюдкой; 5 – кварциты магнетитовые с силикатами и карбонатами; 6 – кварциты силикат-карбонат-магнетитовые (зеленосланцевая фация метаморфизма) или силикат-магнетитовые (эпидот-амфиболитовая фация); 7 – кварциты магнетит-силикат-карбонатные, магнетит-карбонат-силикатные или магнетит-силикатные; 8 – сланцы и силикатные, карбонат-силикатные кварциты с магнетитом; 9 – сланцы кварц-карбонат-хлоритовые или гранат-биотит-кварц-куммингтонитовые; 10 – сланцы кварц-хлоритовые с карбонатом или куммингтонит-гранат-кварц-биотитовые; 11 – сланцы кварц-хлоритовые или гранат-кварц-биотитовые; 12 – сланцы серицит-кварц-хлоритовые или мусковит-кварц-биотитовые; 13 – сланцы хлорит-кварц-серицитовые или биотит-кварц-мусковитовые. I – центральная часть железистого горизонта; II – линия контакта горизонтов; III – центральная часть сланцевого горизонта

Для идеального варианта зонального строения железорудной толщи диаграмма имеет вид, изображенный на рис. 2.

В верхней части диаграммы расположена точка, отвечающая идеальному составу магнетитовых кварцитов (6), на ее левой ветви – отрезки распространения фигуративных точек силикат- и карбонат-содержащих железистых кварцитов: магнетитовых кварцитов с карбонатами и силикатами (5), силикат-карбонат-магнетитовых или силикат-магнетитовых (4), магнетит-силикат-карбонатных,

магнетит-карбонат-силикатных или магнетит-силикатных (3) кварцитов, а также силикатных, карбонат-силикатных с магнетитом (2) и силикатных (1) сланцев и кварцитов. На правой ветви диаграммы расположены отрезки магнетитовых с железной слюдкой (7), железнослюдко-магнетитовых (8), магнетит-железнослюдковых (9), железнослюдковых с магнетитом (10) и железнослюдковых (11) кварцитов.

Задачей авторов был поиск закономерностей зонального строения продуктивной толщи



Анновского месторождения Северного горнобогатительного комбината (СевГОКа), представленной объединенным пятым-шестым железистыми горизонтами саксаганской свиты.

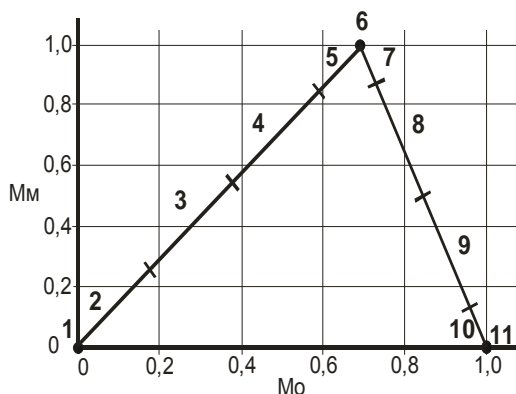


Рис. 2. Идеальный вариант диаграммы  $M_o-M_m$ , характеризующий полную аутигенно-метаморфогенную минералого-геохимическую зональность толщи пород железисто-кремнистой формации

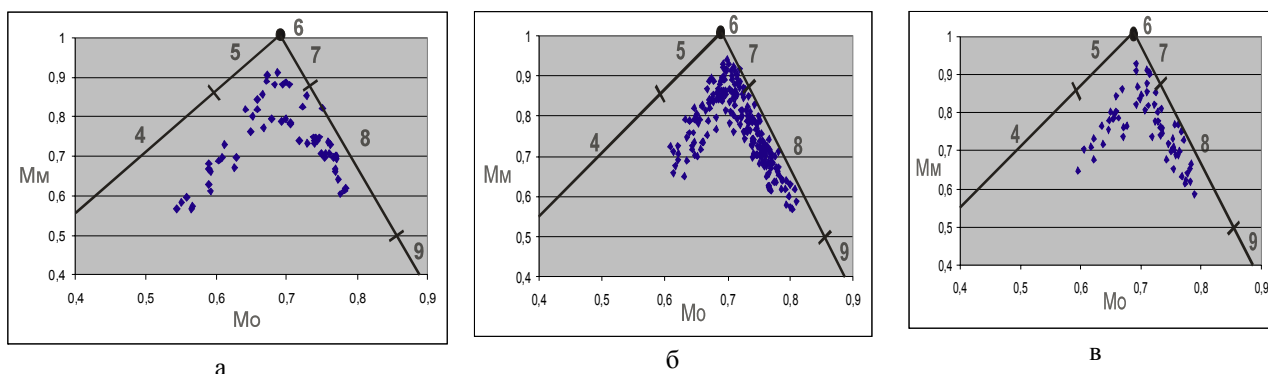


Рис. 3. Диаграммы  $M_o-M_m$  для железистых кварцитов продуктивной толщи Анновского месторождения: а – северная часть; б – центральная часть; в – южная часть месторождения

В разрезе продуктивной толщи первые присутствуют в виде маломощных (обычно не более 5 м) линзовидных и пластообразных тел среди железнослюдко-магнетитовых кварцитов. Из-за их незначительной мощности при опробовании, проводящемся в связи с эксплуатационной разведкой месторождения, магнетит-железнослюдковые кварциты, как правило, объединяются в пробах с железнослюдко-магнетитовыми. Магнетит-силикатные кварциты, представленные на месторождении магнетит-куммингтонитовой, реже биотит-магнетит-куммингтонитовой разновидностями, также образуют маломощные пропластки в базальной части разреза пятого железистого горизонта. Сотрудники геологической службы комбината выделяют их в качестве «переходной пачки» между продуктивной толщей и залегающим ниже по разрезу третьим-пятым сланцевым горизонтом. При картировании рудных тел магнетит-силикатные кварциты, в связи с низким содержанием в их составе магнетита,

При построении диаграммы  $M_o-M_m$  для продуктивной толщи Анновского месторождения авторы использовали результаты химических анализов железистых кварцитов трех участков месторождения: северного, центрального и южного (рис. 3).

Фигуративные точки проб железистых кварцитов расположились на диаграммах в соответствии с представлениями о стандартной зональности железисто-кремнистой формации, однако с ограничениями, обусловленными особенностями минерального и петрографического состава продуктивной толщи месторождения в границах изученных участков.

Четко выделяются поля локализации фигуративных точек трех основных минеральных разновидностей железистых кварцитов, слагающих продуктивную толщу: железнослюдко-магнетитовых (правая ветвь, индекс 8), магнетитовых (центральное положение на диаграмме, индексы 5, 6, 7) и силикат-магнетитовых (левая ветвь, индекс 4). Отсутствуют фигуративные точки магнетит-железнослюдковых кварцитов (индекс 9 на диаграмме рис. 2) и магнетит-силикатных кварцитов (индекс 3 на диаграмме рис. 2).

как правило, относятся к сланцевой толще, пробы из сложенных ими пластов не отбираются.

Этими двумя обстоятельствами объясняется отсутствие в фондах геологической службы Северного ГОКа данных о химическом составе магнетит-железнослюдковых и магнетит-силикатных кварцитов продуктивной толщи месторождения.

Результаты петрохимических исследований и топоминералогических наблюдений в забоях Анновского карьера явились основанием для составления схемы минералогической зональности продуктивной толщи месторождения (рис. 4).

Как видно, разрезы пятого и шестого железистых горизонтов несколько отличаются. В разрезе шестого железистого горизонта отсутствуют железнослюдко-магнетитовые кварциты (индекс 8), а также магнетит-куммингтонитовые кварциты и магнетит-кварц-куммингтонитовые сланцы (индекс 3), выделяемые, как отмечалось выше, только в базальной части разреза пятого железистого горизонта. Основная часть



разреза обоих железистых горизонтов сложена магнетитовыми кварцитами с железной слюдкой (индекс 7) и с куммингтонитом (индекс 5). Биминеральные (кварц + магнетит) магнетитовые кварциты (индекс 6 на диаграммах рис. 2 и 3) в разрезах центральных

частей обоих железистых горизонтов присутствуют редко и при опробовании объединяются с силикат- или железослюдко-содержащими магнетитовыми кварцитами.

|      |    |    |   |   |   |    |    |   |    |   |   |   |   |      |  |
|------|----|----|---|---|---|----|----|---|----|---|---|---|---|------|--|
|      | I  | II |   |   |   | I  |    | I | II |   |   |   |   | I    |  |
|      | 4  | 5  | 7 | 5 | 4 | 2  | 4  | 5 | 7  | 8 | 7 | 5 | 4 | 3    |  |
| 7s-f | 6f |    |   |   |   | 6s | 5f |   |    |   |   |   |   | 3-5s |  |

Рис. 4. Схема минералогической зональности продуктивной толщи Анновского месторождения. Индексы минеральных разновидностей железистых кварцитов на разрезе: 8 – кварциты железослюдко-магнетитовые; 7 – кварциты магнетитовые с железной слюдкой; 5 – кварциты магнетитовые с куммингтонитом; 4 – кварциты куммингтонит-магнетитовые; 3 – кварциты магнетит-куммингтонитовые и сланцы магнетит-кварц-куммингтонитовые; 2 – кварциты магнетит-биотит-куммингтонитовые и сланцы магнетит-биотит-кварц-куммингтонитовые. Стратиграфические горизонты саксаганской свиты: 7s-f – седьмой сланцево-железистый; 6f – шестой железистый; 5f – пятый железистый; 3-5s – третий-пятый сланцевый. I – периферийные зоны горизонтов; II – центральные зоны горизонтов

Толщи двух железистых горизонтов разделены маломощным шестым сланцевым горизонтом, сложенным некондиционными магнетит-биотит-куммингтонитовыми кварцитами с редкими прослоями магнетит-биотит-кварц-куммингтонитовых сланцев.

Схема минералогической зональности продуктивной толщи месторождения используется для уточнения и пополнения геологических разрезов месторождения, идентификации минеральных разновидностей руд, а также для прогнозирования их обогатимости без использования трудоемких минералогических и минерало-технологических исследований.

#### Список литературы

1. Страхов Н.М. Основы теории литогенеза. – М.: Изд. АН СССР, 1962. – Т. 2. – 575 с.
2. Белевцев Я.Н. Криворожский железорудный бассейн. Геологическое строение. – М.: Госгеолиздат. – 1951. – Т. 1. – 152 с.
3. Плаксенко Н.М. Главнейшие закономерности железорудного осадканакпления в докембрии. – Воронеж: Изд. Воронежского госун-та, 1966. – 264 с.
4. Ходюш Л.Я. Аутигенно-минералогическая зональность как один из критериев расчленения и сопоставления железорудных толщ в железисто-кремнистых формациях докембрия (на примере Белозерского железорудного бассейна) // Проблемы изучения геологии докембрия. – Л.: Наука, 1967. – С. 243-249.
5. Белевцев Р.Я. Метаморфическая зональность Криворожского бассейна // Геологический журнал. – 1970. – № 4. – С. 25-38.

6. Геология криворожских железорудных месторождений / Белевцев Я.Н., Тохтуев Г.В., Стрыгин А.Н. и др. – К.: Изд. АН УССР, 1962. – Т. 1. – 484 с.; Т. 2. – 567 с.

7. Пирогов Б.И. Геолого-минералогические факторы, определяющие обогатимость железистых кварцитов. – М.: Недра, 1969. – 240 с.

8. Технологическая минералогия железных руд / Пирогов Б.И., Поротов Г.С., Холошин И.В., Тарасенко В.Н. – Л.: Наука, 1988. – 302 с.

9. Евтехов В.Д. Минералогические особенности метасоматических изменений железистых кварцитов Северного Криворожья (на примере Первомайского месторождения): Автореф. дис ... канд. геол. наук // Львов: Львовский гос. ун-т, 1978. – 25 с.

10. Евтехов В.Д., Карпенко С.В., Евтехова А.В. Использование петрохимической диаграммы Мо-Мм при изучении аутигенной зональности железисто-кремнистой формации докембрия. // Геолого-минералогічний вісник Криворізького техн. ун-ту. – 2007. – № 2. – С. 30-44.

11. Железисто-кремнистые формации докембрия Европейской части СССР / Пирогов Б.И., Стебновская Ю.М., Евтехов В.Д. и др. // Минералогия. – К.: Наукова думка, 1989. – 168 с.

12. Чубаров В.А., Евтехов В.Д. Идентификация минеральных разновидностей и технологических сортов руд Кривбасса // Горный журнал. – 1996. – № 11-12. – С. 14-17.

Рекомендовано до публікації д.г.-м.н. М.О. Доброгорським 20.02.09

## АНАЛИЗ МОДЕЛЬНЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД В БАРАБАННОЙ ВНУТРИВАЛКОВОЙ МЕЛЬНИЦЕ

Виконано аналіз математичного моделювання руйнування гірських порід при деформації стиску й удару та визначено найбільш загальні закономірності для моделювання руйнування у внутрішньовалковому млині.

Выполнен анализ математического моделирования разрушения горных пород при деформации сжатия и удара, определены наиболее общие закономерности для моделирования разрушения во внутривалковой мельнице.

The analysis of mathematical modeling of destruction of rocks is executed at deformation of compression and impact and the most general laws for modeling destruction inside rollers mill are determined.

Частный случай разрушения горной массы в барабанной внутривалковой мельнице рассматривается на основе многочисленных гипотез и исследований разрушения материала при измельчении как усталостно-хрупкого тела. При обосновании параметров мельниц новой конструкции или модернизируемых возникает необходимость их модельных представлений с учетом особенностей конструкции и изменившейся кинетики разрушения с позиций современных представлений моделирования процесса измельчения. Адекватное моделирование позволяет выполнить большой объем исследований на модельном уровне, но кроме того оно позволяет определять показатели измельчения в проектируемых мельницах на основании полученных зависимостей в лабораторных условиях на масштабных моделях. При этом конкретизируются методы расчета параметров машины и процесса.

Целью выполняемого анализа является подбор наиболее физически обусловленных модельных представлений новой конструкции внутривалковой конусной мельницы, в которой реализуется разрушение горной массы при измельчении на основе деформации сдвига со сжатием. Известно, что затраты энергии на разрушение материала могут изменяться в широких пределах. В работах [1, 2] указаны основные факторы, влияющие на уровень потребления энергии: крупность зерен, проявление пластических деформаций, трение тонких частиц материала, образование и разрушение агрегатов. При этом доминирующими являются крупность зерен (масштабный фактор) и проявление пластических деформаций.

Энергетика разрушения частиц изучена довольно подробно [1, 3]. Основной особенностью является то, что при повторяющихся нагрузках в объеме частиц накапливаются изменения в виде микро- и макротрещин, пластические микроразрушения. Указывается, что суммирование этих изменений в частицах приводит к предельным концентрациям напряжений в зоне имеющихся в объеме частиц микродефектов и к образованию усталостных трещин [2].

По гипотезе П.А. Ребиндера [1, 2] полная энергия разрушения равна

$$A = A_y + A_s,$$

где  $A_y = \frac{\sigma_n^2}{2E}$  ( $\sigma_n$  – предел прочности;  $\sigma_n$  – временное сопротивление;  $E$  – модуль Юнга) – предельная энергия упругой деформации [4];  $A_s$  – энергия вновь образованной поверхности.

Основы теории разрушения твердых тел были развиты А. Гриффитсом в 1921 году. Как основное положение Гриффитсом принят известный в механике принцип минимальной энергии, по которому равновесное состояние деформируемого тела соответствует минимуму потенциальной энергии системы [3]. Горные породы относятся к хрупким породам, однако при образовании микротрещин значительную роль играют пластические деформации. Особенно возрастает их влияние при разрушении мелких частиц. При тонком измельчении на пластические деформации затрачивается энергия, близкая по значению к энергии предельного упругого деформирования.

Кроме затрат энергии на упругие и пластические деформации и образование новых поверхностей имеют место затраты энергии на трение, образование и разрушение агрегатов. Предельный размер частиц, склонных к агрегированию, составляет 100 мкм. Расход энергии на нагрев может в 10-100 раз превышать расход энергии на образование новой поверхности [1]. Поэтому С.Ф. Шинкоренко [3] затраты энергии на образование зерна конечной крупности выразил как сумму

$$A = A_y + A_d + \sum A_y' + A_s,$$

где  $A_d$  – энергия пластической деформации частицы заданной крупности;  $\sum A_y'$  – энергия упругих деформаций, предшествовавших предельным. При этом автор работы делает вывод, что минимум энергии, затрачиваемой на измельчение, достигается при  $\sum A_y' \rightarrow 0$ . Это возможно в тех случаях, когда упругая деформация, предельная для зерна заданного минимального размера, распространяется со скоро-

стью, превышающей скорость образования отдельных трещин в объеме разрушаемого куска, до момента массового образования трещин в элементарных объемах, равных объемам заданной крупности, т.е. при высоких скоростях нагружения. Отсюда следует, что снижение затрат энергии на измельчение возможно при условии больших скоростей приложения силовых нагрузок, обеспечивающих высокую степень дробления куска при каждом его нагружении [3].

Одной из важнейших составляющих математического моделирования измельчения является уравнение кинетики разрушения. Известно универсальное уравнение кинетики Товара В.В. – Перова В.А. [5], выражающее взаимосвязь крупности материала и времени измельчения. В работах В.В. Товара, Г.С. Ходакова [6] уравнение кинетики выражает изменения поверхности измельчаемого порошка во времени. Они основаны на следующих представлениях. Пусть  $R(t)$  – количество материала данной фракции в дробилке. Предполагается, что абсолютная скорость  $\frac{dR}{dt}$  уменьшения количества материала данной фракции пропорциональна его количеству в мельнице в данный момент времени. Если эта зависимость выражается прямой пропорциональностью, то уравнение кинетики принимает вид

$$\frac{dR}{dt} = -kR \quad (1)$$

с некоторым коэффициентом пропорциональности  $k$ . Известна [7] также непрямо пропорциональность скорости и количества материала, называемая уравнением Разумова К.И., Перова В.А., Зверевича В.В., Биленко Л.Ф., в виде

$$\frac{dR}{dt} = -k'_p R^{m+1}. \quad (2)$$

Частный вид уравнения (2) тех же авторов:

$$\frac{dR}{dt} = -k''_p \left[ p + \frac{1-p}{R_0} R \right] R,$$

где  $R_0$  – количество материала до начала измельчения (при  $t = 0$ );  $p$ ,  $k''_p$  – коэффициенты пропорциональности, определяемые опытным путем.

Линейное уравнение (1) связывают дополнительно с количеством материала до начала измельчения и называют его комбинированным уравнением

$$\frac{dR}{dt} = -\phi k_1 R + (1-\phi) k_0 R_0,$$

где  $\phi$  – долевой коэффициент линейного уравнения кинетики;  $k_1, k_0$  – коэффициенты уравнения кинети-

ки (относительные скорости измельчения);  $k_0 R_0$  – величина постоянной скорости измельчения (доли единиц);  $R, R_0$  – остатки на контрольном сите, соответственно, в данный момент времени и до начала измельчения;  $k, k'_p, m$  и  $p$  – коэффициенты (параметры), определяемые опытным путем.

Наконец, в уравнение кинетики вводят дополнительное время. К таким уравнениям относится уравнение Товара В.В. [3]:

$$\frac{dR}{dt} = -k_1 m t^{m-1} R.$$

Известны две концепции при разработке математических моделей измельчения горной массы. Первая концепция разработана и обоснована под руководством К.А. Разумова и В.А. Перова [7]. Основным положением является независимость измельчения отдельных фракций материала в мельнице. Это позволяет рассматривать процесс измельчения отдельной порции руды от начальной до конечной крупности как непрерывный. Эта концепция подтверждена для определенных условий многочисленными исследованиями [7, 3].

Согласно второй концепции, изложенной в работах Д. Клесалла, А. Годуэна, Д. Фюрстенау и др. [8-10], учитывается значительное взаимовлияние различных классов и продуктов в процессе измельчения. Основной задачей при моделировании в этом случае является выражение гранулометрического состава конечного продукта в зависимости от крупности питания мельницы и времени измельчения. В работе [8] представлено моделирование порционного измельчения, а также непрерывного измельчения в открытом и замкнутом циклах. Модель порционного измельчения с дискретным гранулометрическим составом строится на основе дифференциального уравнения типа (1) материального баланса каждого класса крупности. Параметрами этой модели являются функция отбора и функция измельчения.

Функция отбора (или селективная функция) представляет собой относительную скорость (скорость, отнесенную к единице размалываемого материала) измельчения материала данного класса, отмеченного индексом  $i$ , которая с учетом (1) равна

$$k_i = \frac{dg_i}{g_i}, \quad (3)$$

где  $g_i$  – масса материала класса крупности  $i$ .

Функция измельчения (или функция размола) представляет собой отношение абсолютных скоростей уменьшения материала фракции  $i$  и фракции  $j$  при  $j < i$

$$b_{i-j} = \frac{dg_i}{k_j g_i}, \quad (4)$$

где  $b_{i-j}$  – относительная скорость образования класса крупности в пределах сит  $i-j$ ;  $\frac{dg_i}{dt}$  – скорость образования узкого класса крупности на сите  $i$  из классов  $j$  (крупнее  $i$ );  $g_i$  – масса материала узкого класса на сите  $j$  крупнее  $i$ ;  $k_j$  – относительная скорость измельчения узких классов, крупнее класса  $i$ .

Зависимость (4) с учетом (3) имеет вид

$$b_{i-j} = \frac{\frac{dg_i}{dt}}{\frac{dg_j}{dt}} \quad (5)$$

Здесь предполагается, что фракции нумеруются, начиная от самой крупной, по мере убывания размера. В формулах (4) и (5) наблюдается противоречие, поскольку формула (4) отличается от формулы (1) знаком. Точнее было бы записать ее так:

$$k_i = -\frac{\frac{dg_i}{dt}}{g_i},$$

тогда в формуле (5) необходимо изменить знак

$$b_{i-j} = -\frac{\frac{dg_i}{dt}}{k_j g_i} = \frac{\frac{dg_i}{dt}}{\frac{dg_j}{dt}} \quad (6)$$

Далее в работах [3, 9] утверждается допущение, что величины  $b_{i-j}$  численно равны доле размолотого продукта  $j$ -го класса крупности, переходящего в  $i$ -й класс. С этим можно согласиться лишь частично, поскольку размол может быть любым, например, сразу самым мелким. Постулируя это допущение со ссылкой на Т. Мелая и А. Годуэна [9], рассматривается модель кинетики, в которой скорость образования материала данного класса равна скорости образования частиц этого класса из всех классов, крупнее данного, минус скорость разрушения частиц данного класса. В линейном варианте эта модель выглядит следующим образом:

– для частиц самого крупного класса

$$\frac{dg_1}{dt} = -k_1 g_1;$$

– для частиц второго класса крупности

$$\frac{dg_2}{dt} = -k_2 g_2 + b_1 k_1 g_1;$$

– для частиц третьего класса крупности

$$\frac{dg_3}{dt} = -k_3 g_3 + b_1 k_2 g_2 + b_2 k_1 g_1;$$

– для частиц  $i$ -го класса крупности

$$\frac{dg_i}{dt} = -k_i g_i + \sum_{j=1}^{i-1} b_{i-j} k_j g_j, \quad (8)$$

где  $g_1, g_2, g_3$  – масса самого крупного, второго и третьего классов крупности; относительные скорости измельчения каждого класса –  $k_1, k_2, k_3$ ;  $\frac{dg_i}{dt}$  – скорость измельчения данного узкого класса крупности;  $i-1$  – верхний предел;  $i$  – порядковый номер сита;  $j-1$  – нижний предел;  $j$  – порядковый номер сита, крупнее  $i$ . Первый член правой части уравнения (8) выражает функцию отбора – скорость измельчения зерен данного размера. Второй член выражает скорость образования материала данной крупности из всех частиц, крупнее данных.

Зная величины  $b, k$  и  $g$ , можно, таким образом, рассчитать гранулометрический состав материала после заданной продолжительности его измельчения. Для этого необходимо экспериментально определить относительную скорость измельчения зерен имеющих размеров  $k_i$ , общую зависимость относительной скорости образования классов от крупности материала, распределение времени пребывания материала в мельнице, гранулометрический состав питания.

Однако в формуле (8) наблюдается некоторое несоответствие. Если в (8) подставить  $b_1$  из (6) или из (5) и  $k_1 g_1$  из (3) или (7), то получим

$$\frac{dg_2}{dt} = -k_2 g_2 \pm \frac{\frac{dg_2}{dt}}{\frac{dg_1}{dt}} \cdot \frac{dg_1}{dt} = -k_2 g_2 \pm \frac{dg_2}{dt} \quad (9)$$

При знаке "+" в формуле (9) должно быть  $k_2 g_2 = 0$ , что необъяснимо физически. При знаке "-"

в формуле (9) получается  $\frac{dg_2}{dt} = -\frac{1}{2} k_2 g_2$ , что означает прибавление материала при измельчении, а скорость размола уменьшается по модулю. Поэтому рассматриваемая модель кинетики измельчения требует уточнения, особенно в области допущений. Например, задан материал с частицами, распределенными по одному из набора распределений. При этом вводится набор распределения вероятностей образования более мелких частиц из частиц более крупных классов. В правой части уравнений кинетики учитывается образование дополнительных частиц из более крупных. Если цикл измельчения замкнут, как в шаровой мельнице, это позволит установить, через какой промежуток времени в мельнице образуются

нужные фракции. Если цикл непрерывный, то можно учесть дополнительно поступление и выход материала. Это позволяет добиваться необходимого распределения для получения на выходе нужного состава продуктов измельчения.

Для корректировки модели измельчения, точной ее адаптации к конкретной кинематической схеме мельницы необходимо определить закон распределения мелких частиц из более крупных в процессе дробления, поскольку уравнение кинетики учитывает образование дополнительных частиц из более крупных. В то же время кривая распределения крупности мельницы является ее постоянной характеристикой. Для выбора нужного распределения в валковой мельнице изучался имеющийся опыт его определения из существующего набора распределения вероятностей.

Статистическая обработка грансостава порошков подробно изучена экспериментально. Из многочисленных наблюдений [6, 11] известно, что функция распределения частиц по фракциям (по их размерам) в большинстве случаев имеет один хорошо выраженный максимум с крутым спадом в сторону мелких частиц и пологим – в сторону крупных. Были неоднократно представлены математические описания кривых распределения.

Асимметричные кривые распределения в общем случае [5] описываются уравнением вида

$$\frac{dN}{dX} = F \left( \frac{(X - X_{min})(X_{max} - X)}{X_{max} - X_{min}} \right) = F(X), \quad (10)$$

где  $F(X)$  – логарифмически нормальная функция;  $X$  – размер частиц, изменяющихся в пределах  $X_{min} < X < X_{max}$ ;  $N(X)$  – число частиц.

Распределение (10) называется неидеальным логарифмическим нормальным законом. Обычно его упрощают, полагая  $X_{min} = 0$ , а  $X_{max} = \infty$ . Тогда получается логарифмический нормальный закон распределения, впервые выведенный применительно к продуктам разрушения твердых материалов А.Н. Колмогоровым:

$$F(X) = \frac{A}{X} \cdot \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\ln \frac{X}{\xi}}{\sigma} \right)^2 \right],$$

где  $A$  – постоянная нормирования;  $\xi$  – медиана;  $\sigma$  – дисперсия распределения. Нормирование заключается в выборе такого значения постоянной  $A$ , при котором

$$\int_0^{\infty} F(X) dX = 1.$$

Медиана  $\xi$  равна такому размеру частиц, для которого вероятность  $P(\xi) = 0,5$ .

В тех же предположениях, а именно, что  $X_{min} = 0$ , а  $X_{max} = \infty$ , кривая распределения может быть аппроксимирована и степенным выражением, наиболее общая форма которого такова:

$$F(X) = AX^m \exp(-\alpha X^p), \quad (11)$$

где параметры  $m$ ,  $\alpha$ ,  $p$  – определяют остроту максимума и степень асимметричности кривой распределения.

Наибольшее практическое применение из всех частных видов степенного закона (11) имеет уравнение Разина-Рамлера в дифференциальной форме (распределение объемов или масс). Его удобно записать в виде [6]:

$$F(X) = \alpha p A X^{p-1} \exp(-\alpha X^p).$$

Столь же широкой общностью обладает и формула Свенсона

$$F(X) = A \exp \left[ -\left( \frac{X}{X_0} \right)^{n/p} \right] \cdot \left( \frac{X}{X_0} \right)^{n-1},$$

где  $\alpha$ ,  $p$ ,  $n$ ,  $X_0$  – параметры распределения.

По Г.С. Ходакову [6, 11] зависимость между дисперсностью измельчения твердых тел и затратами энергии на процесс измельчения принято называть законом измельчения. В настоящее время известно несколько таких экспериментально найденных законов, каждый из которых справедлив только в области достаточно грубой дисперсности. Как было показано Р.И. Чарльзом [12], многие из них могут быть формально выражены следующим, эмпирически установленным соотношением:

$$d\varepsilon = -C'' \frac{dX}{X^m} = C' \frac{dS}{S^{2-m}}, \quad (12)$$

где  $\varepsilon$  – энергия, сообщаемая единице объема разрушаемого тела;  $X$  – средний размер зерен;  $S$  – удельная поверхность (поверхность единицы объема);  $C''$ ,  $C'$ ,  $m$  – эмпирически подбираемые постоянные. Из (12) при  $m = 1$  следует

$$\varepsilon = C' \ln \frac{S}{S_0}, \quad (13)$$

где  $S_0$  – удельная поверхность твердого тела до его измельчения.

Формула (13) представляет собой известный закон Кирпичева-Кика, полученный при дополнительном допущении о независимости спектра осколков

дробления от исходных размеров частиц. При  $m = 2$  из (13) получают закон Риттингера, при  $m = 1,5$  – закон Бонда. Используют и другие значения  $m$  ( $m = 3, m = 4$  и др.). Закон Кирпичева-Кика получают из теории упругости, согласно которой для разрушения идеально хрупкого тела объемом  $V$  требуется затратить энергию, равную

$$v_0 = \frac{\sigma_0}{2E} V = eV,$$

где  $\sigma_0$  – предел прочности;  $E$  – модуль Юнга.

Закон Кирпичева-Кика наиболее пригоден при дроблении; при измельчении рекомендуется использовать закон Риттингера [6].

Известны уравнения кинетики измельчения руд, в которых не учитываются термодинамические явления, происходящие при измельчении. Это обстоятельство учтено Шинкоренко С.Ф. и Кармазиным В.И. [3, 13]. Термодинамическая вероятность конечного состояния пропорциональна энтропии системы. Авторы применяют этот закон к определению энергии шаровой загрузки, умножают ее на коэффициент энтропии и считают, что таким путем можно определить энергию разрушения. Поэтому вероятный расход энергии на собственно разрушение зерен предлагается выразить как

$$\mathcal{E} = k_1 \mathcal{E}_m S_s,$$

где  $k_1$  – коэффициент пропорциональности (безразмерный);  $\mathcal{E}_m$  – расход энергии на движение шаровой загрузки;  $S_s$  – коэффициент энтропии. Таким образом, принимается, что какая-то часть энергии шаров расходуется на разрушение.

В данной работе такой подход не может быть использован, поскольку речь идет о механическом бесшаровом измельчении и, неизвестно, какая часть энтропии шаров расходуется на разрушение.

Для представления кинетики измельчения очень важно изучить распределение напряжений и механизм разрушения твердых тел. Этим вопросам уделено внимание значительного количества исследователей. В [14] предложен вариант определения распределения напряжений при разрушении единичного куска горной массы. При этом утверждается, что все многообразие форм контактных поверхностей сводится к двум видам контактных площадок: круг и прямоугольник. Этим допущением задача упрощается не только по форме контактирующих поверхностей, но и сводится к плоской задаче. В этом случае при определении контактных напряжений рассматривается соприкосновение двух твердых тел из однородных и изотропных материалов, ограниченных некоторыми криволинейными поверхностями. Оба эти тела воспринимают нагрузку, направленную по нормали к поверхностям контакта. Первоначальный контакт предполагается точечным.

По мере деформирования материалов возникает контактная поверхность. Предполагается, что деформации чисто упругие и площадка контакта имеет форму эллипса или, в частности, круга. На поверхности контакта отсутствуют касательные усилия. Здесь ссылка на работы И.Я. Штаермана, М.М. Саверина, С.Д. Пономарева, Л.А. Галина, С.В. Пинегина, С.П. Тимошенко и др. [14].

Начальная точка контакта двух поверхностей (точнее, кривых)  $Z_1 = f_1(x)$  и  $Z_2 = -f_2(x)$  в плоскости  $(X, Z)$  принимается за начало координат. Предполагается, что плоскость  $xOy$  является в точке начального контакта касательной плоскостью к обеим поверхностям и в точке контакта обе поверхности имеют общую нормаль. Породоразрушающий элемент обозначается индексом 1, разрушаемый – индексом 2. Индексами  $U_i$  и  $W_i$  обозначаются упругие перемещения вдоль осей  $X$  и  $Z$ , соответственно. Индексами  $\delta_i$  обозначаются сближения точек поверхностей из-за деформации зоны контакта. Координата  $Z$  породоразрушающего инструмента определяется после деформации как

$$f_1(x) + W_1 - \delta_1.$$

Уравнение кривой  $f_2(x)$  и все компоненты деформаций задаются так, как если бы для разрушаемого материала ось  $Z$  была направлена в сторону этого материала. Но так как ось  $Z$  для системы общая и направлена в сторону породоразрушающего инструмента, то координата  $Z$  материала определяется после деформации как

$$-f_2(x) + W_2 - \delta_2.$$

Исходя из этих уравнений, зона контакта определяется равенством

$$W_1 + W_2 = \delta - f_1(x) - f_2(x), \quad (14)$$

где  $\delta = \delta_1 + \delta_2$  – сумма перемещений точек (сближения тел). Затем обе кривые  $Z_1 = f_1(x)$  и  $Z_2 = -f_2(x)$  заменяются упругими полупространствами, и для них решается суперпозиция задач Бусине. Именно, если в точке  $(x_0, z_0)$  границы полуплоскости приложена сила  $Q$ , то перемещение любой точки полуплоскости  $(x, z)$  определяется выражением

$$W = -Q\theta \ln \frac{1}{r} + const,$$

где  $r = \sqrt{(x-x_0)^2 + (z-z_0)^2}$ ;  $\theta = \frac{2}{\pi E}(1-\mu^2)$  – коэффициент эластичности, характеризующий упругие

свойства сопротивляющихся поверхностей;  $n$  – расстояние между точками  $x$  и  $k$ ,  $r = |k - x|$ ;  $E$  – модуль упругости;  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $Q$  – приложенная сила в точке  $x$ .

Если площадка контакта  $F$  и в каждой ее точке действует сила  $P(x)$ , то в этом случае перемещения определяются в виде:

$$W_1 = \theta_1 \int_F P(x) \ln \frac{1}{r_1} dx + C_1; W_2 = \theta_2 \int_F P(x) \ln \frac{1}{r_2} dx + C_2, \quad (15)$$

где  $r_1 = \sqrt{(x - x_0)^2}$ , то есть полагают, что площадка контакта остается в плоскости  $z = 0$ . Подставляя (15) в (14) получаем

$$\int_F P(x) \ln \frac{1}{r_1} dx = f(x), \quad (16)$$

где  $\eta = \theta_1 + \theta_2$ ;  $\theta_1 = \frac{2}{\pi E_1} (1 - \mu_1^2)$ ;  $\theta_2 = \frac{2}{\pi E_2} (1 - \mu_2^2)$ ;

$E_1, E_2, \mu_1$  и  $\mu_2$  – упругие постоянные материала породоразрушающих элементов и разрушаемого материала

$$f(x) = \frac{-c_1 - c_2 - f_1(x) - f_2(x)}{\eta},$$

где  $c_1$  и  $c_2$  – константы.

При этом принято предположение, что на площадке контакта  $\delta = 0$ .

Из интегрального уравнения (16) необходимо определить закон распределения давления на площадке контакта и характер самой площадки. Учитывая, что по условиям постановки задачи  $f_1(0) = f_1'(0) = 0$ , по формуле Тейлора представляем

$$f_1(x) + f_2(x) = \frac{1}{2} [f_1''(x) + f_2''(x)] x^2 + + 0(x^3) = 0,5Rx^2 + 0(x^3).$$

Тогда, допуская, что площадка контакта есть интервал  $(-a, a)$ , уравнение (16) приведем к виду

$$\int_{-a}^a P(x) \ln \frac{1}{r_1} dx = c - Ax^2, \quad (17)$$

где  $c = \frac{-c_1 - c_2}{\eta}$ ;  $A = \frac{R}{2\eta}$ .

Решением интегрального уравнения (17) есть

$$P(x) = \frac{Q + Aa^2 - 2Ax^2}{\pi\sqrt{a^2 - x^2}},$$

$$\text{где } Q = \int_{-a}^a P(x) dx. \quad (18)$$

Чтобы определить  $a$  (полуширина площадки контакта), полагают  $Q = Aa^2$ . Тогда

$$P(x) = \frac{2Q}{\pi a^2} \sqrt{a^2 - x^2}; \quad (19)$$

$$a = \sqrt{\frac{2Q\eta}{R}}. \quad (20)$$

Таким образом, (18) показывает, как нагрузка  $Q$ , приложенная к дробящему элементу, связана с давлением по площади контакта. Параметр  $a$  определяется из условия ограниченности давления  $P(x)$  по всей площади контакта. Полученные зависимости (19), (20) полностью характеризуют контактную напряженность куска дробимого материала (плоская задача) при наличии начального соприкосновения инструмента с куском в области контакта.

Для пространственной контактной задачи расчетные формулы по определению давления  $P(x, y)$ , в любой точке зоны контакта будут [8]:

а) площадь контакта – эллипс с полуосями  $a_1$  и  $b_1$

$$P(x, y) = \frac{3Q}{2\pi a_1 b_1} \sqrt{1 - \frac{x^2}{a_1^2} - \frac{y^2}{b_1^2}},$$

где  $x, y$  – текущие координаты точки внутри зоны контакта;

б) область контакта – круг с  $a_1 = b_1$

$$P(x, y) = \frac{3Q}{2\pi a_1^2} \sqrt{1 - \frac{r^2}{a_1^2}} = \frac{P_0}{a_1} (a_1^2 - x^2 - y^2)^{1/2},$$

где  $P_0$  – максимальное давление

$$P_0 = \frac{3Q}{2\pi a_1^2}; \quad r = \sqrt{x^2 + y^2};$$

в) зона контакта – площадка с поперечным размером вдоль оси  $Y$ , равным  $2b_1$  (начальный контакт по линии соприкосновения поверхностей, образованных параллельными цилиндрами)

$$P(x, y) = \frac{2g}{\pi b_1} \sqrt{1 - \frac{y^2}{b_1^2}},$$

где  $g$  – нагрузка, приходящаяся на единицу длины поверхности контакта,  $g = \frac{Q}{L}$ .



**Выводы**

Таким образом, полученные выражения позволяют производить оценку напряженного состояния измельчаемого единичного куска и определять значения действующих напряжений  $\sigma_c$  на контакте взаимодействующих тел.

**Список литературы**

1. Измельчение. Энергетика и технология: Учебное пособие для вузов / Пивняк Г.Г., Вайсберг Л.А., Кириченко В.И. и др. – М.: Изд. дом “Руда и Металлы”, 2007. – 296 с.
2. Ребиндер П.А. Физико-химическая механика. – М.: Знание, 1958.
3. Шинкоренко С.Ф. Технология измельчения руд черных металлов. – М.: Недра, 1982. – 213 с.
4. Ржевский В.В., Новик Г.Я. Основы физики горных пород. – М.: Недра, 1978.
5. Андреев С.Е., Товаров В.В., Перов В.А. Закономерности измельчения и исчисление характеристик гранулометрического состава. – М.: Metallurgizdat, 1959.
6. Ходаков Г.С. Физика измельчения. – М.: Наука, 1972. – 307 с.

7. Разумов К.И., Перов В.А. Закономерности измельчения в шаровых мельницах // VIII Международных конгресс по обогащению полезных ископаемых. – Т. 1, 1969.
8. Keisall D., Reid K. The Derivation of the Mathematical Model for Breakage in a Small, Continuous, Wet Ball Mill. Paper 4, 2. Joint American Institute of Chemical Engineers – Institution of Chemical Engineers Meeting. London, June. 1965.
9. Gaudin A., Meloy T. Model and Comminuting Distribution Equation for Single Fracture // Trans. AIME. – 1962. – 223. – № 3.
10. Fuerstenau D., Somasundaran P. Comminuting Kinetics. Mineral Processing, Roberts A., ed., Pergamon Press. – Oxford, 1963.
11. Уэрт У., Томсон Р. Физика твердого тела. – М.: Мир, 1969.
12. Charles R.I. Min. Eng. 9, 80 (1957).
13. Шмидт Э. Введение в техническую термодинамику. – М.-Л.: Энергия, 1965.
14. Блохин В.С., Большаков В.И., Малич Н.Г. Основные параметры технологических машин. Машины для дезинтеграции твердых материалов. Ч. 1: Учебное пособие. – Д.: УМА-пресс, 2006. – 404 с.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Є.С. Лапшиним 02.03.09*

УДК 621.893

**Р.П. Дидык, В.А. Безрукавая**

**МОДИФИЦИРОВАНИЕ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН НА ПУТИ ПРЕОДОЛЕНИЯ ТРИБОЛОГИЧЕСКОГО БАРЬЕРА**

Актуальність даної публікації обумовлена тим, що вперше зроблена спроба на підставі наукового і системного аналізу, як першого етапу, пояснити ефект низького тертя при використанні природних мінералів як модифікаторів поверхонь деталей машин.

Актуальность настоящей публикации обусловлена тем, что впервые предпринята попытка на основании научного и системного анализа, как первого этапа, объяснить эффект низкого трения при использовании природных минералов в качестве модификаторов поверхностей деталей машин.

Actuality of the this publication is conditioned to those, that an attempt is first undertaken on the basis of systems analysis scientific and, as the first stage, to account for the effect of low friction at the use of natural minerals as the modifiers of surfaces of details of machines.

Общеизвестно, что значительная часть связанных с техникой затрат приходится на ее обслуживание и ремонт, а капитальный ремонт по затратам часто сравним со стоимостью нового механизма. Увеличение срока службы основных видов машин и оборудования, снижение их металлоемкости зависит, в том числе и от решения трибологической проблемы, включающей задачи трения, износа, смазки, новых технологий обработки и модификаций поверхностей.

Новым направлением в решении этой проблемы является механохимическое воздействие на рабо-

чие поверхности деталей машин триботехнических порошковых составов – геомодификаторов трения (ГМТ), которые представляют комплекс измельченных природных материалов, содержащих минералы ультраосновных пород, происходящих на стыках тектонических платформ, используемых самой природой в качестве материалов для трибопроцессов [1].

В табл. 1 приведен химический состав, в том числе и украинских месторождений серпентина (Новомосковский район и Приазовье).

Таблиця 1

Химический состав геоактиваторов различных геологических проб, %

| Химический элемент                 | Марка порошка  |                |                          |   |                                      |
|------------------------------------|----------------|----------------|--------------------------|---|--------------------------------------|
|                                    | НИОД-5, Россия | НИОД-2, Россия | Серпентинит SW, Германия | Геоактиватор №1 (Новомосковск), Украина | Геоактиватор №2 (Приазовье), Украина |
| SiO <sub>2</sub>                   | 38,6           | 36,0           | 39,05                    | 33,4                                    | 44,5                                 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>     | 1,5            | 2,4            | 0,66                     | 2,5                                     | 3,2                                  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>     | 4,7            | 4,7            | 7,4                      | 4,0                                     | 6,6                                  |
| FeO                                | 3,0            | 11,0           | -                        | 2,6                                     | 3,3                                  |
| TiO <sub>2</sub>                   | 0,035          | 0,87           | 0,016                    | 0,03                                    | 0,12                                 |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>      | 0,03           | 0,1            | -                        | >0,1                                    | 0,10                                 |
| MnO                                | 0,07           | 0,16           | 0,083                    | 0,04                                    | 0,15                                 |
| CaO                                | 0,09           | 1,2            | 0,18                     | 0,15                                    | 9,4                                  |
| MgO                                | 38,2           | 30,4           | 38,5                     | 38,0                                    | 25,6                                 |
| Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O | 0,11           | 0,12           | 0,0013                   | >0,1                                    | >0,2                                 |
| SO <sub>3</sub> звл.               | -              | 0,40           | -                        | -                                       | -                                    |
| SO <sub>3</sub> об.                | 0,27           | 2,47           | -                        | 0,025                                   | 0,022                                |
| nnn                                | 12,3           | 12,2           | 13,6                     | 20,0                                    | 7,6                                  |
| Cu                                 | >0,001         | 0,058          | 0,0007                   | >0,001                                  | >0,001                               |
| Ni                                 | 0,21           | 0,28           | 0,225                    | 0,21                                    | 0,17                                 |
| Pb                                 | н/о            | н/о            | н/о                      | н/о                                     | н/о                                  |
| Zn                                 | 0,0018         | 0,007          | 0,0008                   | н/о                                     | н/о                                  |
| Co                                 | 0,013          | 0,015          | 0,01                     | 0,013                                   | 0,01                                 |
| Cr                                 | 0,66           | 0,18           | 0,254                    | 0,16                                    | 0,40                                 |
| V                                  | >0,02          | >0,02          | 0,0019                   | н/о                                     | -                                    |
| ΣTR <sub>2</sub> O <sub>3</sub>    | 0,061          | 0,080          | н/о                      | н/о                                     | -                                    |
| Si                                 | 18,1           | 16,8           | 39,05                    | 15,6                                    | 20,8                                 |
| Al                                 | 0,79           | 1,23           | 0,66                     | 1,3                                     | 1,7                                  |
| Fe <sup>3+</sup>                   | 3,3            | 3,3            | -                        | 2,8                                     | 4,6                                  |
| Fe <sup>2+</sup>                   | 2,3            | 8,5            | -                        | 2,0                                     | 7,7                                  |
| Ti                                 | 0,02           | 0,52           | 0,016                    | 0,018                                   | 0,072                                |
| P                                  | 0,0130         | 0,044          | -                        | >0,05                                   | >0,1                                 |
| Mn                                 | 0,054          | 0,12           | 0,083                    | 0,03                                    | 0,12                                 |
| Ca                                 | 0,64           | 0,86           | 0,18                     | 0,11                                    | 6,7                                  |
| Mg                                 | 23,0           | 18,2           | 38,5                     | 22,8                                    | 15,4                                 |
| K+Na                               | >0,1           | >0,1           | 0,013                    | >0,07                                   | >0,1                                 |
| SO <sub>3</sub> звл.               | -              | 0,16           | -                        | -                                       | -                                    |
| S <sub>об.</sub>                   | 0,11           | 0,99           | -                        | 0,01                                    | -                                    |

Отметим, что эффект низкого трения гидроксидов по стали был открыт группой ленинградских ученых в 1985 – 1991 гг. при использовании коммерческими фирмами трибологических составов НИОД-1, 2...5, РЮ-11, МТТ и других в практических задачах повышения ресурса различных узлов деталей машин.

Этот способ измельчения при сравнении с другими (барабанный) позволил получить суммарный адсорбционный потенциал в 2,5 раза выше, чем при дроблении серпентина в барабанной мельнице мелющими шарами (для сравнения: в первом случае  $\Delta\mu_{\Sigma} = 1,52$  кДж/моль, во втором –  $\Delta\mu_{\Sigma} = 0,6$ ).

Результат полученного эффекта механоактивации, проявился на последующих стадиях технологического процесса изготовления геомодификаторов трения. Измельченные в виброударных мельницах и прошедшие стадию механоактивации тонкодисперсные порошки (размер 2,0-2,5 мкм) вместе со смазкой, по-

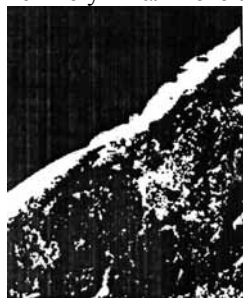
падая в зону трения, вносят структурные изменения в поверхность трения, которые способны ее модифицировать в триботехнически выгодном направлении.

Задача достижения высокоадсорбционного потенциала ГМТ, который служит мерой механоактивации, была решена путем измельчения серпентина виброударным способом. [2] Результаты измерений измельченного серпентина приведены в табл. 2.

При изготовлении и в ходе последующей работы узла трения на поверхностях трения образуется дефектный слой металла. Частицы ГМТ, введенные в зону трения, и имеющие абразивные свойства, удаляют этот слой. Далее, в процессе трения происходит микронаклеп поверхностей. На этом этапе в точках физического контакта имеют место микрометаллургические процессы. Возможный механизм формирования переходной зоны связан с процессами диффузии в поверхностные слои материала, образо-

ванием твердых растворов и пограничной структуры в виде нетравящегося «белого слоя». На поверхности образуются аморфизированный слой металлокерамики, обладающий высокими износостойкими характеристиками, состоящий из исходного материала трибуозла и материала тонкодисперсного природного минерала (рис. 1). Входящие в состав порошка Al и Fe являются катализаторами образования пиролитического углерода по границам зерен до подповерхностного слоя, а основной состав ГМТ модифицирует граничный слой с высокой степенью свободных связей присоединяющих "потерянный" материал из дисперсной среды.

Одинаковая микротвердость в сочетании с низкой шероховатостью поверхностей приводит к возникновению уникального антифрикционного эффекта.



x400

Рис. 1. Образование поверхностного «белого слоя» при испытании пар трения из стали 45 с ГМТ в течение 15 часов

Таблица 2  
Результаты исследований измельченного серпентина

| Тип мельницы                  | Барабанный | Вибрационный   |              |
|-------------------------------|------------|----------------|--------------|
|                               |            | горизонтальный | вертикальный |
| Время измельчения, ч          | 10         | 1,5            | 1,5          |
| $d_{ср}$ , мкм                | 3,4        | 2,7            | 2,4          |
| $\Sigma n_{10}$ , %           | 60         | 75             | 79           |
| $d_{max}$ , мкм               | 2          | 32             | 32           |
| $S_{уд}$ , см <sup>2</sup> /г | 12833      | 15960          | 16564        |
| $\Delta \mu_{с}$ , кДж/моль   | 0,6        | 1,41           | 1,52         |

В табл. 3 приведены триботехнические показатели активированного серпентина.

Таблица 3  
Триботехнические показатели активированного серпентина

| № пробы (образца)   | Измельчение в барабанной мельнице | Измельчение в виброударной мельнице |
|---|-----------------------------------|-------------------------------------|
| Скорость износа образца, мг/час                                       | 0,35                              | 0,22                                |
| Коэффициент трения  | 0,010                             | 0,0055                              |
| Площадь пятна контакта, мм <sup>2</sup>                               | 4                                 | 4                                   |
| Предельная нагрузка до образования задира при $\omega = 1600$ об/м, Н | 700                               | 830                                 |
| Продолжительность работы после слива масла, мин                       | 60                                | 85                                  |
| Коэффициент увеличения скорости износа                                | 1,37                              | 1,25                                |

При этом диффузия ГТМ в более твердую поверхность происходит медленнее, что приводит в итоге к полному выравниванию микротвердости поверхностных слоев контактирующих деталей.

Одновременно происходит процесс микрошлифования соприкасающихся поверхностей, приводящих к существенному уменьшению их шероховатости. На поверхности трения образуется характерный текстурированный микрорельеф, имеющий микровпадины, хорошо удерживающие масло.

Происходящие при этом изменения приводят к значительному увеличению линейных размеров деталей.

Процесс увеличения линейных размеров является саморегулирующимся, так как продолжается до тех пор, пока не будут выбраны существующие зазоры. Способность к саморегуляции открывает широкие перспективы применения геомодификаторов. Их использование позволяет восстанавливать изношенные зубчатые передачи, подшипники качения и скольжения, плунжерные пары. (На Басанском карьере Марганецкого ГОКа была произведена обработка открытой зубчатой передачи тяговой лебедки шагающего экскаватора ЭШ-15/90. Замер зубьев через два месяца после обработки показал прирост толщины зуба на 0,14 мм (соответственно толщина была 31,64 мм – стала 31,78 мм), тогда как износ зубьев необработанных колес за эти два месяца составил 0,4 мм.) Высокие антифрикционные свойства образующихся поверхностей дают возможность значительно снизить энергозатраты, повысить КПД машин и механизмов.

Таким образом, основными преимуществами геомодификаторов трения являются способность создавать в зонах трения динамические защитные пленки, образованные тонкодисперсными продуктами износа и самого ГМТ; равномерно упрочнять поверхность трения в процессе проработки трибуозла; существенно снижать коэффициент трения (в 4-6 раз), а следовательно, и механических потерь; многократно снижать скорость изнашивания поверхностей трения; увеличивать предельно допустимые нагрузки в трибуозле.

Модифицирование поверхности в направлении снижения шероховатости и существенного повышения эксплуатационных характеристик деталей машин было достигнуто при совместном использовании высокоэнергетической размерной ультразвуковой обработки деталей с одновременным внесением в поверхностные слои металла геомодификаторов трения [3].

В процессе обработки под действием ультразвука происходит упрочнение поверхности и частиц геомодификаторов трения, которые находятся во впадинах микронеровностей обрабатываемой поверхности. [4] Акустическая энергия, передаваемая системой чередующихся волн сжатия и разрежения, создает благоприятное поле остаточных напряжений в поверхностных слоях материала детали. При наклепе твер-

дых составляющих геомодификатора трения на основе серпентина частично происходит распад конгломерата, в результате которого выделяются мелкие части новых структурных образований, которые, попав на поверхность скольжения, блокируют развитие разрушений. Это способствует существенному повышению плотности дислокаций, искажению зерен, увеличению степени наклепа и, как следствие, к значительному увеличению твердости поверхности. Структурные изменения, которые происходят в приповерхностных слоях, приводят к значительному повышению их эксплуатационных характеристик, таких как контактная выносливость, износостойкость.

Измерения на профилографе «TAIYSURE-5» микропрофиля поверхности дали следующие результаты; шероховатость участка вала после обработки ультразвуком уменьшился в 3,5 раза, после обработки ультразвуком совместно с геомодификатором шероховатость поверхности снизилась в 6 раз.

Результаты исследований проиллюстрированы на примере комбинированной обработки вала диаметром 50 мм из стали 45, при исходном значении поверхностной твердости 180HV и шероховатости  $Ra=3,7$  мкм. Исходная структура поверхностного слоя состоит из крупнозернистых феррито-перлитных зерен (рис. 2,а).

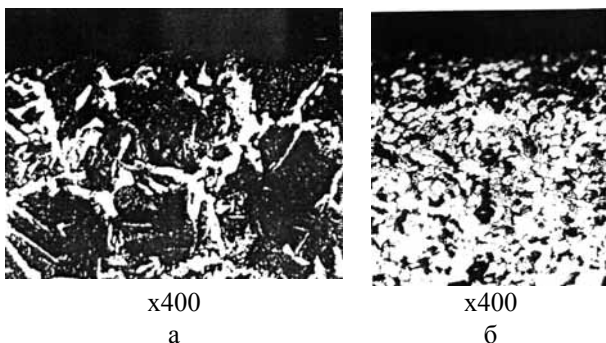


Рис. 2. Исходная структура стали 45 (а) и структура после совместного действия ультразвука и ГМТ (б)

На поверхность вала был предварительно нанесен слой ГМТ (на сухую или в смазке) после финишного прохода акустической головки. Микротвердость обработанного участка вала увеличилась в два и более раза по сравнению с исходной и составила 450 HV.

Анализ структуры (рис. 2,б) после обработки показал, что зерна в поверхностном слое мельче, сменилась их ориентация. Совместное действие высокоэнергетической обработки ультразвуком и ГМТ на заключительной стадии упрочняюще-чистовой обработки валов изготовленных из стали 30ХГСА насосов 8НД для объединения «Криворожсталь» показало высокую результативность, которые приведены в табл. 4.

Результаты сравнительных испытаний были проведены на машине трения СМЦ-2 на образцах из стали 45 (ролик по колодке) показали увеличение изно-

состойкости в 3,5-5 раза по сравнению с другими видами предварительной обработки (рис. 3).

Таблица 4  
Результаты исследования шеек вала из стали 30ХГСА при различных видах обработки

| № обработки | Вид обработки  | Шероховатость поверхности, мкм |
|-------------|--|--------------------------------|
| 555         | Токарная обработка   | 3,7                            |
| 777         | <b>Обработка ультразвуком</b>                              | 0,97                           |
| 333         | Обработка ультразвуком совместно с геомодификатором трения | 0,6                            |

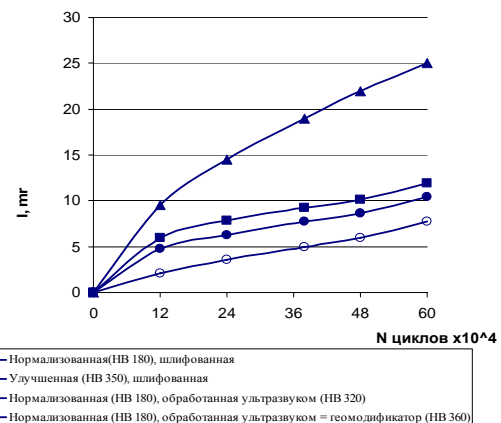


Рис. 3. Сравнительная характеристика показателей износа для различных способов обработки образцов из стали 40Х

**Выводы.** Использование ГМТ в качестве составов для восстановления изношенных узлов трения, без остановки действующего оборудования, позволяют существенно сократить затраты, связанные с ремонтом машин и оборудования, снизить энергопотребление, увеличить жизненный цикл машин и механизмов.

Комбинированная размерная чистовая обработка с использованием мощных источников ультразвука, с одновременным внесением в обрабатываемую поверхность геомодификаторов трения, позволяет на локальных участках деталей (что очень важно) модифицировать рабочую поверхность с высокими эксплуатационными показателями.

#### Список литературы

1. Дидык Р.П. Новая технология восстановления узлов трения и модифицирования поверхностей деталей машин // Сб. научн. тр. / ЧСМ НАН Украины. – К., 2003. – С. 23-27.
2. Патент Украины № 56546 Способ получения наполнителя для антифрикционной смазки / Дидык Р.П., Анциферов А.В. – Бюл. № 5. – 2003.
3. Патент Украины № 51394 Способ упрочняющей чистовой обработки деталей машин / Р.П. Дидык, Д.В. Лоскутов и др. – Бюл. № 11. – 2002.
4. Бабей Ю.И. Физические основы импульсного упрочнения стали и чугуна. – К.: Наукова думка, 1988. – 240 с.

Рекомендовано до публікації д.т.н. В.А. Ропасюк 16.02.09

УДК 622.24.05:62-752

А.А. Титов, В.Ф. Ганкевич, А.Н. Коцупей

## АНАЛИЗ ВАРИАНТОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СИСТЕМЫ КОЛЕСО – ВАГОНЕТКА ПРИ НАЕЗДЕ НА СТЫК РЕЛЬСОВ

Запропоновано модель вертикальних вібрацій системи колесо – вагонетка та проаналізовано її параметри під час наїзду на стик висотою до 50 мм. Розглянуто випадки жорсткої підвіски, застосування гумометалевих та пружинних амортизаторів.

Предложена модель вертикальных колебаний системы колесо – вагонетка и проанализировано ее параметры при наезде на стик высотой до 50 мм. Рассмотрены случаи жесткой подвески, применения резинометаллических и пружинных амортизаторов.

The model of vertical oscillations of the wheel-trolley system is proposed. Its parameters during driving onto the rail joint of height to 50 mm is analysed. The cases of rigid pendant, usage of rubber-metal and spring shock absorbers are considered.

**Введение.** Применение карьерного и шахтного локомотивного транспорта зачастую является преобладающим способом транспортирования полезных ископаемых из добычных забоев, на который сегодня приходится не менее половины грузопотока горных предприятий [1]. Несмотря на огромный накопленный опыт эксплуатации и многочисленные научные исследования в области локомотивного транспорта, существует множество проблем, которые мешают его нормальному использованию. В частности, это состояние путей, которые имеют многочисленные геометрические несовершенства, как сразу после прокладки, так и их усугубление в процесс прохождения тяжелогрузных составов. Например, еще в [2] указано, что независимо от способа соединения между собой соседних рельсов происходит расшатывание стыков, что наряду с уширением, сужением рельсов, колебаний по высоте между головками рельсов и прочими факторами приводит к преждевременному выходу из строя как самого рельсового пути, так и элементов подвижного состава. Таким образом, любые рассчитанные ресурсы колесных пар, осей и других элементов подвергаются практической ревизии в сторону их уменьшения.

Как мера борьбы с указанными явлениями применяются различные типы амортизаторов между ходовой частью и кузовом вагонеток, например, резинометаллические амортизаторы, пружинные недемпфированные и пружинные сильнодемпфированные амортизаторы [3]. Зачастую условия работы амортизаторов не гарантируют того, что они проработают заявленный срок службы, что приводит, например, к разрушению опорных пружин, чрезмерному повышению жесткости резинового амортизатора вследствие его релаксации и ползучести. Выход один – перед принятием решения о применении определенного типа амортизаторов необходимо знать их реакцию на нагрузки, обусловленные реальной геометрией пути и кинематикой движения состава, т.е. действующие нагрузки и деформации.

В данной работе подробно рассматривается только один вид работы системы колесо-вагонетка – на-

езд на стик, а также возникающие вследствие этого вертикальные колебания.

**Цель работы** – составить математическую модель колебаний опоры вагонетки при наезде на стик рельсов с определением перемещений и ускорений основной массы вагонетки, а также деформаций упругой связи, проанализировать результаты для случаев жесткого крепления колес, их подвески на резинометаллических и пружинных амортизаторах.

**Предпосылки исследований.** Способы соединения колесных пар вагонеток и проходческих вагонов ВПК с рамой или кузовом практически не отличаются по принципу устройства от амортизаторов вибрационных машин и устройств, которые подробно описаны во многих источниках, например [4]. Однако здесь кардинально отличается характер нагружения, который является не упорядоченным вибрационным или виброударным, а характеризуется случайными импульсными нагрузками. При этом оценка величины этих нагрузок имеет не очень высокую достоверность, ее сложно предсказать теоретически и достаточно трудоемко определить на практике, для чего используются специальные измерительные лаборатории. Мы покажем, что наша аналитическая оценка уровня максимальных усилий и деформаций в упругих связях ставит под сомнение целесообразность применения отдельных типов соединений колеса и рельса.

В качестве отправной точки используем результаты измерений перепадов в стыках между рельсами, которые в условиях горного производства достигают 10...30 мм [2], а иногда доходят и до 50 мм.

Известно, что коэффициент динамического усиления, рекомендованный для расчета колесных пар лабораторией института Гипрорудмаш, оценивался в 2,0 единицы для случая использования пружинных амортизаторов. В отличие от них, применение в качестве основного виброгасящего элемента резинового массива, как в виде подкладок из конвейерной ленты на стик между рамой и вагонеткой, так и отдельных резинометаллических амортизаторов имеет

свои ограничения. Так, для вагонеток с большой вместимостью кузова невозможно обеспечить необходимый срок службы таких виброгасящих элементов, так как, очевидно, повышенная жесткость, динамические нагрузки и естественное старение резины приводят к их быстрому выходу из строя. Однако соответствующая аналитическая база в данном случае представлена слабо.

**Аналитическая часть.** Применение опорного амортизатора вагонетки (или непосредственно ее жесткого каркаса, который имеет ненулевую величину податливости) при наезде на стык рельсов можно классифицировать как работу в условиях кинематического возбуждения. Общая для всех случаев расчетная схема представлена на рис. 1.

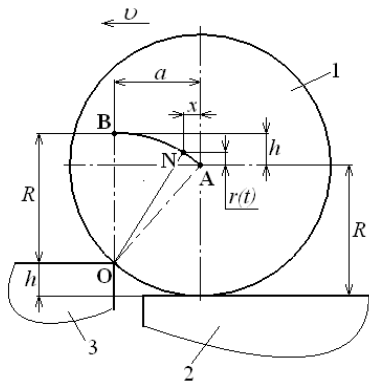


Рис. 1. Схема к определению геометрических параметров

Колесо вагонетки 1 радиусом  $R$  катится по рельсу 2 и на стыке наезжает на угловую точку  $O$  рельса 3, высота стыка равняется  $h$ . При этом ось колеса перемещается по дуге из точки  $A$  в точку  $B$ . Для определения параметров кинематического возбуждения колебаний системы колесо-вагонетка рассматриваем изменение с течением времени координат произвольной точки  $N$ , обозначенных как  $x$  и  $r(t)$ .

Здесь принимаем следующие допущения: колесо и рельсы являются абсолютно жесткими; горизонтальная скорость колеса  $v$  является постоянной как при движении по рельсам, так и при прохождении стыка по дуге  $AB$ ; проскальзывание колеса по рельсу отсутствует; амортизатор имеет близкие к линейным характеристики сопротивления.

Для равномерного движения колеса справедливо следующее соотношение:

$$x = v \cdot t,$$

где  $t$  – текущее время с момента наезда на стык.

Очевидно, также выполняется геометрическое соотношение (см. рис. 1):

$$(x - a)^2 + (R - h + r(t))^2 = R^2,$$

откуда при  $x = 0$  получим

$$a^2 + (R - h)^2 = R^2.$$

После несложных преобразований определим полное время нахождения колеса на стыке при  $x = a$

$$t_0 = \frac{\sqrt{h \cdot (2R - h)}}{v},$$

а также функцию вертикального перемещения оси колеса

$$r(t) = \sqrt{R^2 - (v \cdot t - \sqrt{h \cdot (2R - h)})^2} - R + h.$$

Для определения параметров вертикальных колебаний была использована динамическая расчетная схема, изображенная на рис. 2.

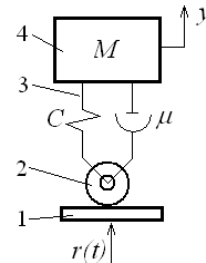


Рис. 2. Динамическая расчетная схема

При наезде на стык профиль рельсового пути 1 таков, что ось колеса 2 совершает вертикальное перемещение по закону  $r(t)$  в течение времени  $t_0$ . Нагрузка передается на корпус (раму) вагонетки 4 с приведенной массой  $M$  через амортизатор 3 с приведенным коэффициентом жесткости  $C$  и коэффициентом вязких сопротивлений  $\mu$ . После прохождения стыка масса  $M$  совершает свободные вертикальные колебания, при этом  $r(t) = h$ .

Дифференциальное уравнение движения имеет вид

$$M \cdot \ddot{y} + [C - r(t)] \cdot y = 0,$$

где функция кинематического возбуждения выражается так:

$$r(t) = \begin{cases} \sqrt{R^2 - (v \cdot t - \sqrt{h \cdot (2R - h)})^2} - R + h, & t \leq t_0 \\ h, & t > t_0 \end{cases}$$

Исходные данные для расчетов были выбраны следующие:  $R = 200$  мм;  $h = 50$  мм; максимальная скорость пустой вагонетки  $v = 15$  км/ч, грузовой –  $v = 7$  км/ч; масса порожней вагонетки  $M = 5$  т, грузовой –  $M = 15$  т.

Анализировались варианты жесткого крепления колес, применения резиновых амортизаторов диаметром 140 мм и пружинных амортизаторов диаметром 200 мм. Результаты представляют собой зависимости перемещений приведенной массы вагонетки  $M$  от времени, которые показаны на рис. 3-8 соответственно для указанных трех вариантов крепления колес, а также для вариантов пустой и грузовой вагонетки.

Сплошными линиями изображены зависимости для перемещения вагонетки, а пунктирными – для перемещения колеса.

Построенные графики перемещений пригодны для случая безотрывного движения колеса по рельсу при прохождении стыка. Однако в действительности такой отрыв имеет место, что приводит к отрицательным последствиям, так как нарушает устойчивость и предсказуемость движения состава.

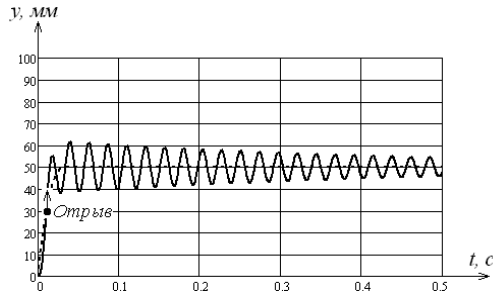


Рис. 3. Вертикальное перемещение порожней вагонетки с жестким креплением колес

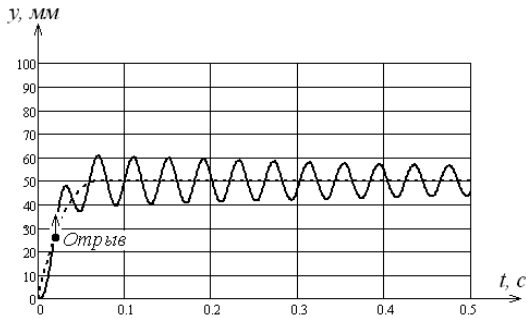


Рис. 4. Вертикальное перемещение грузовой вагонетки с жестким креплением колес

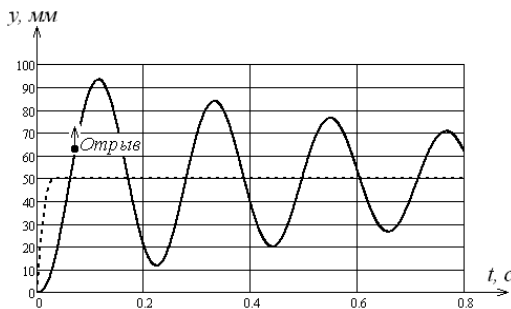


Рис. 5. Вертикальное перемещение пустой вагонетки с креплением колес на резиновых амортизаторах

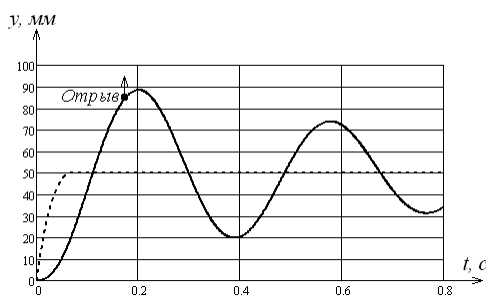


Рис. 6. Вертикальное перемещение грузовой вагонетки с креплением колес на резиновых амортизаторах

Будем полагать, что момент возникновения деформации растяжения в опорных амортизаторах соответствует моменту отрыва колес от рельса. Это справедливо для абсолютно жесткого способа крепления колес, хотя приемлемо и для случаев примене-

ния реальных амортизаторов без внесения какой-либо ощутимой погрешности.

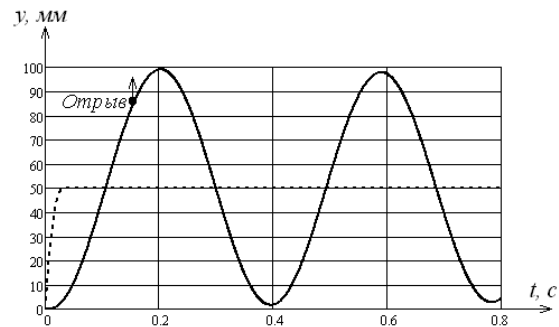


Рис. 7. Вертикальное перемещение порожней вагонетки с креплением колес на пружинных амортизаторах

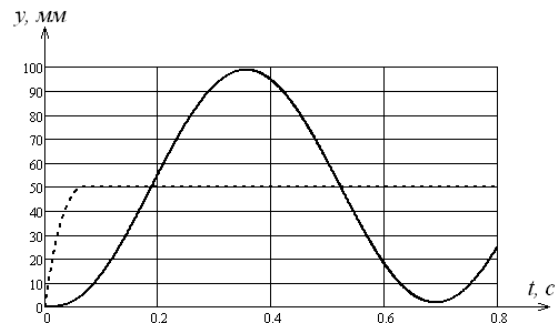


Рис. 8. Вертикальное перемещение грузовой вагонетки с креплением колес на пружинных амортизаторах

Условие отрыва колес от рельса выглядит следующим образом:

$$y - r(t) > \delta_{ст},$$

где  $\delta_{ст}$  – статическая осадка амортизатора.

Таким образом, полученные зависимости вертикальных перемещений справедливы до момента первого отрыва колеса. Этот момент обозначен стрелкой на рис. 3-8.

Как видно из графиков, безотрывно прохождение стыка осуществляется только грузовой вагонеткой на пружинных амортизаторах. В остальных случаях осуществляется подбрасывание, причем максимальная относительная деформация резиновых амортизаторов грузовой вагонетки до момента отрыва достигает 60%, что абсолютно неприемлемо.

Для полноты картины необходимо иметь сведения о величине максимального ускорения, которое испытывает вагонетка. Соответствующие зависимости для отношения максимального ускорения к ускорению силы тяжести до момента отрыва представлены на рис. 9-14.

Максимальные значения относительного ускорения  $a/g$  до момента отрыва для приведенных составляют соответственно: рис. 9 – 82,7; рис. 10 – 23,0; рис. 11 – 3,5; рис. 12 – 1,1; рис. 13 – 1,3; рис. 14 – 0,43.



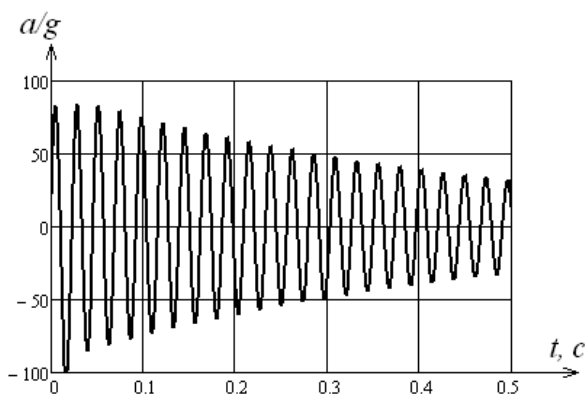


Рис. 9. Относительное ускорение порожней вагонетки с жестким креплением колес

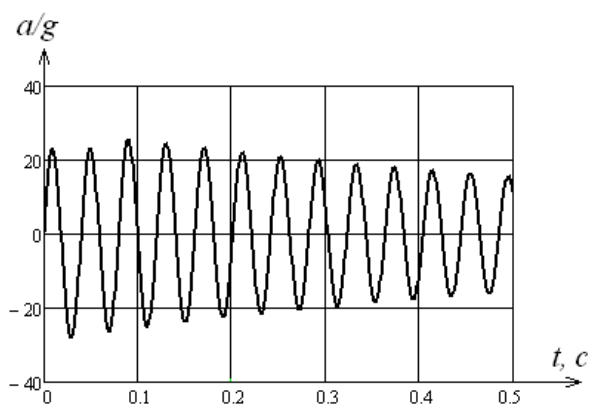


Рис. 10. Относительное ускорение грузеной вагонетки с жестким креплением колес

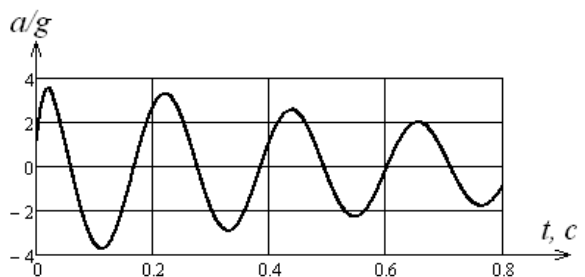


Рис. 11. Относительное ускорение порожней вагонетки с креплением колес на резиновых амортизаторах

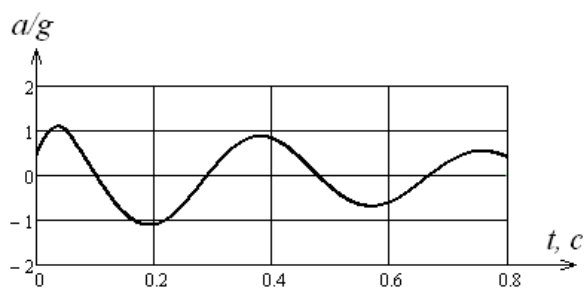


Рис. 12. Относительное ускорение грузеной вагонетки с креплением колес на резиновых амортизаторах

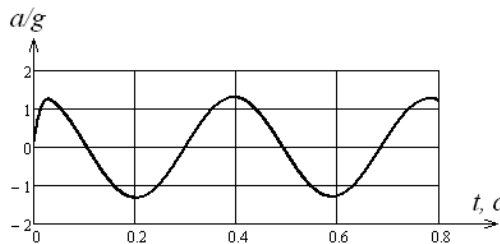


Рис. 13. Относительное ускорение порожней вагонетки с креплением колес на пружинных амортизаторах

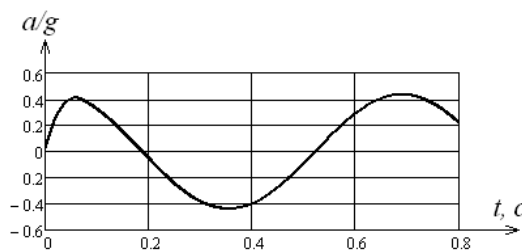


Рис. 14. Относительное ускорение грузеной вагонетки с креплением колес на пружинных амортизаторах

**Выводы.** Создана модель для оценки параметров вертикальных колебаний вагонеток с жестким креплением колес и для вариантов применения резинометаллических и пружинных упругих амортизаторов.

Оценка значений усилий, развиваемых в элементах конструкции вагонетки с жестким креплением колес при наезде на стык такового, что их кратковременные максимальные значения приведут как минимум к пластическим деформациям элементов.

Усилия и деформации, испытываемые рассмотренными резинометаллическими амортизаторами, приведут к резкому сокращению их срока службы и выходу из строя.

Пружинные амортизаторы обеспечивают удовлетворительное безотрывное прохождение стыков высотой 50 мм только грузеными вагонетками и стыков 30 мм порожними вагонетками.

Усилия, испытываемые опорными амортизаторами порожних вагонеток при прохождении стыков высотой 50 мм, превышают усилия при наезде на стык порожних вагонеток.

### Список литературы

1. Ржевский В.В. Технология и комплексная механизация открытых горных работ: Учебник. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1980. – 631 с.
2. Рекомендации по повышению производительности и снижению затрат на внутришахтном транспорте / А.М. Балута, В.Ф. Калиниченко, В.Н. Пшеничный и др. – Кривой Рог: НИГРИ, 1970. – 17 с.
3. Кузнецов Б.А. Транспорт на горных предприятиях. – М.: Недра, 1976. – 552 с.
4. Вибрации в технике: Справочник. Т.4. – Вибрационные процессы и машины / Под ред. Э.Э. Лавендела. – М.: Машиностроение, 1981. – 509 с.

Рекомендовано до публікації д.т.н. В.П. Надутим 03.03.2009

## МЕТОД ВОЗМУЩЕНИЙ В ЗАДАЧЕ О ВОЛОКНИСТОМ КОМПОЗИТЕ С ТРЕЩИНОЙ

Розглянуто плоский напряжено-деформований стан волокнистого композиту з тріщиною в матриці, яка підходить до центрального волокна. Припускаємо, що сусідні волокна при деформації не переміщуються уздовж осі. Піднімається питання можливого руйнування композиту.

Рассмотрено плоское напряженно-деформированное состояние композита с трещиной в матрице, примыкающей к центральному волокну. Предполагается, что соседние волокна при деформации не перемещаются вдоль оси. Обсуждается вопрос о возможном разрушении композита.

It was considered the stress-strain state of fiber composite with matrix crack. The main power characteristics were found for the plane problem with influence of neighbour fibers. The case of fibers gap in crack cross-section is also analysed.

**Актуальность проблемы.** Задача о влиянии подкрепляющих элементов (стрингеров, волокон и т.п.) на напряженное состояние пластины с трещиной изучались рядом авторов [1-10]. В частности, Сэндерс [3] на основе упрощенной модели, в которой пластинка предполагается не удлиняющейся в направлении, параллельном трещине, исследовал влияние непрерывным образом закрепленного стрингера на коэффициент интенсивности напряжений в вершине симметричной трещины. В работе приведены соответствующие численные результаты для целого и сломанного в сечении трещины стрингера. Однако в такой постановке задачи граничное условие по касательным напряжениям вдоль трещины остаются неудовлетворенными. В [9] изучено влияние на коэффициенты интенсивности напряжений на концах трещин, периодически расположенных вдоль прямой, оказываемое стрингерами конечных размеров, ортогональными к этой прямой. В последние годы интенсивно изучается расслоение, как особый присущий слоистым композитам вид разрушения [10]. Практика показывает, что в большинстве случаев именно разрушение матрицы или поверхности раздела между волокном и матрицей, а не разрушение волокон арматуры является причиной выхода из строя изделий из композитных материалов. Углубленное понимание этих явлений позволит полнее использовать свойства композитов.

**Постановка задачи.** Рассмотрим находящийся в плоском напряженно-деформированном состоянии композит с трещиной в матрице, примыкающей к центральному волокну. Будем предполагать, что соседние волокна, расположенные на расстоянии  $b_1$  от центрального, при деформации не перемещаются вдоль оси  $y_1$  ( $v = 0$  при  $y_1 = \pm b_1$ ), т.е. имеет место периодическая в направлении оси  $y_1$  задача. В силу симметричности задачи достаточно рассмотреть один период и ограничиться областью  $x_1 \geq 0$ ,  $0 \leq y_1 \leq b_1$ .

Для решения необходимо интегрировать уравнения равновесия

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 u}{\partial \xi^2} + \frac{G}{E_1} \frac{\partial^2 u}{\partial \eta^2} + m \frac{G}{E_1} \frac{\partial^2 v}{\partial \xi \partial \eta} &= 0; \\ \frac{G}{E_1} \frac{\partial^2 v}{\partial \xi^2} + q \frac{\partial^2 v}{\partial \eta^2} + m \frac{G}{E} \frac{\partial^2 u}{\partial \xi \partial \eta} &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

при следующих граничных условиях

$$\begin{aligned} \sigma_{11} &= 0 \quad \text{при } x_1 = 0, \quad 0 \leq y_1 \leq l, \\ \tau_{11} &= 0 \quad \text{при } x_1 = 0, \quad 0 < y_1 < b_1, \\ u &= 0 \quad \text{при } x_1 = 0, \quad y_1 = 0, \quad x_1 = 0, \quad l \leq y_1 \leq b_1, \\ u &= u_c, \quad v = \text{const} \quad \text{при } y_1 = 0, \quad y = b_1, \\ \sigma_{11} &= \sigma_0 \quad \text{при } x_1 \rightarrow \infty. \end{aligned} \quad (2)$$

**Метод решения.** Согласно предложенному в [1, 2] подходу в результате расщепления напряженно-деформированного состояния приходим к интегрированию уравнения

$$E_1 \frac{\partial^2 u}{\partial x_1^2} + G \frac{\partial^2 u}{\partial y_1^2} = 0 \quad (3)$$

и соотношений для напряжений

$$\sigma_{11} = E_1 \frac{\partial u}{\partial x_1}, \quad \tau_{11} = G \frac{\partial u}{\partial y_1} \quad (4)$$

Сравнивая (3) и (4), получаем

$$\frac{\partial \sigma_{11}}{\partial x_1} + \frac{\partial \tau_{11}}{\partial y_1} = 0 \quad (5)$$

Граничные условия (2) сохраняются. Уравнение (5) удовлетворяется, если ввести функцию  $F$  такую, что

$$\sigma_{11} = \frac{\partial F}{\partial y_1}, \quad \tau_{11} = -\frac{\partial F}{\partial x_1} \quad (6)$$

Напряжения в волокнах примут значения  $\sigma_{11}(x_1, 0)E_c/E_1$ ,  $\sigma_{11}(x_1, b_1)E_c/E_1$ , а усилия  $P_0^*$  и

$P_1^*$  в сеченні  $x_1$  на основанні вимоги рівноваги будуть відповідно

$$P_0^* = \sigma_{11}(x, 0) \frac{A E_c}{2 E_1} + \int_0^{x_1} \delta \tau_1 dx_1 = \frac{A E_c}{2 E_1} \frac{\partial F}{\partial y_1} - \delta \int_0^{x_1} \frac{\partial F}{\partial x_1} dx_1 = \frac{A E_c}{2 E_1} \frac{\partial F}{\partial y_1} - \delta F \quad (y_1 = 0); \quad (7)$$

$$P_1^* = \sigma_{11}(x_1, b_1) \frac{A E_c}{2 E_1} + \int_0^{x_1} \delta \tau_1 dx_1 = \frac{A E_c}{2 E_1} \frac{\partial F}{\partial y_1} - \delta \int_0^{x_1} \frac{\partial F}{\partial x_1} dx_1 = \frac{A E_c}{2 E_1} \frac{\partial F}{\partial y_1} - \delta F \quad (y_1 = b_1), \quad (8)$$

де  $E_c$ ,  $A$  – модуль пружності і площа поперечного сечення волокна;  $\delta$  – товщина пластини.

Введемо безрозмірні змінні

$$x = \sqrt{\frac{G}{E_1}} \frac{x_1}{l}, \quad y = \frac{y_1}{l}, \quad F = \sigma_0 l \varphi, \quad u = -\frac{\sigma_0 l}{\sqrt{E_1 G}} \Psi, \\ \sigma_{11} = \sigma_0 \frac{\partial \varphi}{\partial y}, \quad \tau_1 = -\sigma_0 \sqrt{\frac{G}{E_1}} \frac{\partial \varphi}{\partial x}.$$

Тоді, ухитившись (4) і (6), отримаємо умови Коши-Римана

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x} = \frac{\partial \psi}{\partial y}, \quad \frac{\partial \varphi}{\partial y} = -\frac{\partial \psi}{\partial x}.$$

Следовательно,  $\Phi(z) = \varphi + i\psi$  є аналітичною функцією комплексного змінного  $z$ .

Із рівнянь (7), (8) слідує, що

$$\frac{\partial \varphi}{\partial y} - \mu \varphi = P_0 \quad (y = 0), \quad \frac{\partial \varphi}{\partial y} - \mu \varphi = P_1 \quad (y = b), \quad (9)$$

$$\mu = \frac{2\delta l E_1}{E_c A}, \quad P_0 = \frac{2P_0^* E_1}{\sigma_0 E_c A}, \quad P_1 = \frac{2P_1^* E_1}{\sigma_0 E_c A}, \quad b = \frac{b_1}{l} > 1.$$

Так як на тріщині  $\sigma_{11} = 0$ , то

$$\varphi = 0 \quad (x = 0, y \leq 1), \quad (10)$$

а в точці  $x = 0, y = 0$  і на лінії  $x = 0, 1 \leq y \leq b$  зміщення  $u = 0$ , следовательно,

$$\psi = 0, \quad x = 0, \quad y = 0; \quad x = 0, \quad 1 \leq y \leq b. \quad (11)$$

Таким образом, рішення задачі зводиться до знаходження аналітичної в напівплощі функції  $\Phi(z) = \varphi + i\psi$ , що задовольняє умовам (9) - (10), а з того, що на нескінченності  $\tau_1 = 0, \sigma_{11} = \sigma_0$ , для цієї функції  $\Phi(z)$

$$\Phi(z) \sim -iz \quad (x \rightarrow \infty). \quad (12)$$

Введемо функцію  $f(z)$ , пов'язану з  $\Phi(z)$  співвідношенням

$$f(z) = \Phi'(z) + i\mu\Phi(z) + i(P_0 + P_1) = \left( \frac{\partial \psi}{\partial y} - \mu\psi \right) - i \left( \frac{\partial \varphi}{\partial y} - \mu\varphi - P_0 - P_1 \right). \quad (13)$$

Граничні умови для  $f(z)$  на основанні (9) - (13) формулюються наступним чином:

$$\operatorname{Re} f(z) = 0, \quad x = 0, \quad 1 < y < b; \quad \operatorname{Im} f(z) = P_1, \quad y = 0; \\ \operatorname{Im} f(z) = P_0 + P_1, \quad x = 0, \quad y < 1; \quad f(z) \sim \mu z, \quad x \rightarrow \infty.$$

Отобразимо напівплощу на верхню напівплощу з допомогою функції

$$\zeta = \xi + i\eta = \operatorname{ch} \frac{\pi z}{b} = \operatorname{ch} \frac{\pi x}{b} \cos \frac{\pi y}{b} + i \operatorname{sh} \frac{\pi x}{b} \sin \frac{\pi y}{b}.$$

При цьому точки з координатами  $x = 0, y = 0; x = 0, y = 1$  і  $x = 0, y = b$  переходять відповідно в точки  $\xi = 1, \eta = 0; \xi = \alpha, \eta = 0; \xi = -1, \eta = 0$  ( $\alpha = \cos \pi/b$ ). Прямі  $y = 0$  і  $y = b$  зображуються на промені  $1 \leq \xi < \infty, \eta = 0$  і  $-1 \geq \xi > -\infty, \eta = 0$ .

Рішенням цієї задачі є функція

$$f(\zeta) = iP_1 + \frac{P_0}{\pi} \ln(\zeta - 1) - \frac{P_1}{\pi} \ln(\zeta + 1) + C \sqrt{\frac{\zeta + 1}{\zeta - \alpha}} + \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\zeta + 1}{\zeta - \alpha}} \int_{-1}^{\alpha} \left[ \frac{P_1}{\pi} \ln(t + 1) - \frac{P_0}{\pi} \ln(1 - t) \right] \sqrt{\frac{\alpha - t}{t + 1} \frac{dt}{t - \zeta}},$$

де  $C$  – довільна дійсвна константа; корінь приймається додативним при додативних дійсвних значеннях змінної. Із характеру поведінки  $f(z)$  на нескінченності слідує,

$$f(\zeta) \sim \mu \frac{b}{\pi} \ln \zeta \quad (\zeta \rightarrow \infty). \quad \text{Тоді}$$

$$P_0 - P_1 = \mu b.$$

З урахування рівності (13) для змінної  $\zeta$  маємо

$$\frac{\pi}{b} \sqrt{\zeta^2 - 1} \Phi'(\zeta) + i\mu \Phi(\zeta) = f(\zeta) - i(P_0 + P_1). \quad (14)$$

Рішенням відповідного однорідного рівняння є функція

$$\Phi_{одн.} = A_1 \left( \zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1} \right)^{-i\mu b/\pi} \quad (A_1 = \text{const}).$$

Рішення рівняння (14) будемо шукати в такому ж вигляді, но припустимо, що  $A_1 = A_1(\zeta)$ . Підставляючи це рішення в (14), отримуємо

$$\Phi(\zeta) = \frac{b}{\pi} \left( \zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1} \right)^{-i\mu b/\pi} \times \int_{-\infty}^{\zeta} \frac{\left( \tau + \sqrt{\tau^2 + 1} \right)^{i\mu b/\pi}}{\sqrt{\tau^2 - 1}} f(\tau) d\tau - \frac{P_0 - P_1}{\mu}. \quad (15)$$

Після знаходження дійсвної і мнимой частей  $\Phi(\zeta)$  із (15) можна визначити функцію  $F$ , а следовательно, і напруження  $\sigma_{11}$  в волокнах.

При  $b \rightarrow \infty$  отримане рішення відповідає випадку, коли сусідні волокна не впливають на напружене стан в околиці тріщини. В цьому випадку вказане рішення

соответствует решению задачи о растяжении в направлении волокна бесконечной ортотропной пластинки с симметричной трещиной.

Для последнего случая решение сводится к нахождению аналитической в верхней полуплоскости функции  $\Phi(z)$ , удовлетворяющей условиям

$$\varphi_y - \mu\varphi = P_* \quad (y = 0), \quad \varphi = 0 \quad (x = 0, 0 \leq y \leq 1), \quad \varphi = 0 \quad (x = 0, y \geq 1), \quad (x = 0, y = 0), \quad \Phi(z) \sim -iz \quad (z \rightarrow \infty).$$

где  $\mu = 2l\delta E_1 / (E_c A)$ ,  $P_* = PE_1 / (\sigma_c E_c A)$ .  $v = 0$

$$(y = 0), \quad x_2 = \sqrt{\frac{E_2}{G}} \frac{x_1}{l}, \quad y = \frac{y_1}{l}. \quad (20)$$

Напряжения находятся по формулам

$$\sigma_{22} = \frac{E_2}{l} v_y, \quad \tau^{(2)} = \frac{\sqrt{E_2 G}}{l} v_{x_2}. \quad (21)$$

После применения синус-преобразования Фурье по координате  $y$  к уравнению (19) и граничным условиям (20), возвращения к оригиналам, получим: функция  $f(z)$  имеет вид (13), где нужно принять  $P_0 + P_1 = P_*$ . Граничные условия для ее нахождения будут такими:

$$\operatorname{Re} f(z) = 0, \quad (x = 0, y > 1), \quad \operatorname{Im} f(z) = 0, \quad (y = 0),$$

$$\operatorname{Im} f(z) = P_*, \quad (x = 0, y < 1), \quad f(z) \sim \mu z, \quad (z \rightarrow \infty).$$

Решением полученной краевой задачи является функция

$$f(z) = \frac{2P_*}{\pi} \ln \frac{\sqrt{z^2 + 1} - 1}{z} + \mu \sqrt{z^2 + 1} + \frac{C}{\sqrt{z^2 + 1}}.$$

При этом корень принимается положительным при положительных действительных значениях переменной. Тогда

$$\Phi'(z) + i\mu\Phi(z) = f(z) - iP_*. \quad (16)$$

Общее решение уравнения (16) может быть записано в виде

$$\Phi(z) = -\mu^{-1} P_* - i\sqrt{z^2 + 1} + e^{-\mu iz} \int_{i\infty}^z \left( \frac{2P_*}{\pi} \ln \frac{\sqrt{\xi^2 + 1} - 1}{\xi} + \frac{i\xi + C}{\sqrt{\xi^2 + 1}} \right) e^{i\mu\xi} d\xi.$$

Напряжения  $\sigma_{11}$ ,  $\tau^{(1)}$  и перемещения  $u$  выражаются через действительную и мнимую части функции  $\Phi(z)$  по формулам (14).

Решение задачи о напряженно-деформированном состоянии второго типа сводится к решению краевой задачи

$$Gv_{x_1 x_1} + E_2 v_{y_1 y_1} = 0; \quad (17)$$

$$\tau = 0, \quad \tau^{(2)} = -\tau^{(1)}, \quad (x = 0), \quad v = 0, \quad (y_1 = 0) \quad (18)$$

при условии, что на бесконечности все функции обращаются в нуль.

После введения новых независимых переменных краевая задача (17) и (18) принимает вид

$$v_{x_2 x_2} + v_{yy} = 0; \quad (19)$$

$$v_{x_2} = \frac{\sigma_0 l}{\sqrt{E_1 E_2}} \omega(y) \quad (x_2 = 0, 0 < y < 1);$$

$$v_{x_2} = 0 \quad (x_2 = 0, y > 1);$$

$$v(x_2, y) = -\frac{2}{\pi} \frac{\sigma_0 l}{\sqrt{E_1 E_2}} \int_0^\infty \frac{\omega^*(s)}{s} e^{-x_2 s} \sin ys ds;$$

$$\omega^*(s) = \int_0^1 \omega(y) \sin sy dy.$$

Напряжения  $\sigma_{22}$ ,  $\tau^{(2)}$  определяются по формулам (21), полное касательное напряжение  $\tau = \tau^{(1)} + \tau^{(2)}$  удовлетворяет нулевым граничным условиям вдоль трещины. Постоянные  $C, P_*$  определяются из условий, что  $u = 0$  при  $x = 0$ ,  $y = 0$  и  $\sigma_{11} = 0$  на трещине и у ее вершины ( $y = 1$ ). В результате решения полученной системы уравнений находим

$$C = \frac{BK_1 - B_2 \int_0^\infty K_0(s) ds}{BK_0 + B_1 \int_0^\infty K_0(s) ds};$$

$$P_* = \frac{\pi\mu}{2} \frac{B_1 K_1 + B_2 K_0}{BK_0 + B_1 \int_0^\infty K_0(s) ds}; \quad (22)$$

$$B(\mu) = \frac{\pi}{2} \int_0^\mu [I_0(s) - L_0(s)] ds;$$

$$B_1(\mu) = \frac{\pi}{2} [I_0(\mu) - L_0(\mu)];$$

$$B_2(\mu) = \frac{\pi}{2} [I_1(\mu) - L_1(\mu)].$$

Здесь  $I_\nu(x)$ ,  $K_\nu(x)$  – модифицированные функции Бесселя;  $L_\nu(x)$  – функция Струве.

Если в сечении  $x = x_1 = 0$  волокно разорвано, то коэффициент  $C$  будет отличным от (22) (обозначим этот коэффициент через  $C^*$ ). При этом условие  $u = 0$  при  $x = y = 0$  не выполняется, а  $P_* = 0$ . В этом случае

$$C^* = \frac{K_1(\mu)}{K_0(\mu)}, \quad \mu = \frac{2l\delta E_1}{E_c A}, \quad P_* = \frac{PE_1}{\sigma_0 E_c A}.$$

Формулы (22) совпадают с аналогичными формулами, полученными Сэндерсом [3] в предположении, что деформации пластинки в направлении, параллельном трещине, равны нулю.

Коэффициент  $C$  представляет собой отношение коэффициентов интенсивности напряжений в вершине трещины для матрицы с волокном и без него.

На рис. 1 показано распределение нормальных напряжений на линии трещины при  $y > 1$  (кривая 1 – при  $C = 0,658, P = 1,168$ , кривая 2 – при  $C = 0,718, P = 2,32$ ).

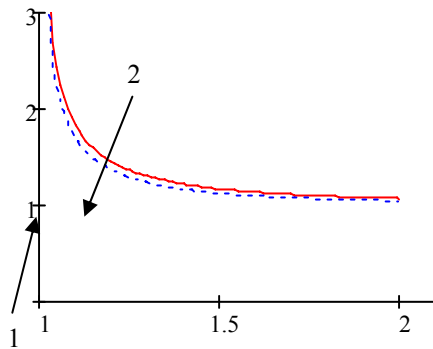


Рис. 1. Розподілення нормальних напружень

Так як коефіцієнт  $C^*$  значительно превосходит соответствующий коэффициент  $C$  (особенно при малых значениях параметра  $\mu$ ), то дальнейшее продвижение трещины в матрице возможно лишь при разорванном волокне. Критерий локального разрушения в этом случае может быть записан в виде

$$C^* = K_{Ic}.$$

Если волокно не разорвано, то при известном значении  $P_*$  вопрос о разрушении будет связан с оценкой адгезионной прочности при вытягивании волокна из композита [4].

## Список литературы

1. Маневич Л.И., Павленко А.В., Коблик С.Г. Асимптотические методы в теории упругости ортотропного тела. – К.: Вища шк., 1982. – 153 с.
2. Маневич Л.И., Павленко А.В. Асимптотический метод в микромеханике композиционных материалов. – К.: Вища шк., 1991. – 131 с.
3. Sanders I.L. Effect of a stringer on the stress concentration due to a crack in thin sheet// Tech. Report. – 1959. – Vol. 13. – P. 1-10.
4. Кагадий Т. С. Метод возмущений в механике упругих (вязкоупругих) анизотропных и композиционных материалов. – Д., НГА Украины, 1998. – 260 с.
5. Михайлов С.Е. Сингулярность напряжений в составном произвольно-анизотропном теле и приложения к композитам // Изв. АН СССР. – 1979. – № 6. – С. 33-42.
6. Мовчан А.А. О влиянии подкрепляющих элементов на коэффициент интенсивности напряжений в вершине острой трещины // Изв. АН СССР. МТТ. – 1977. – № 2. – С. 113-119.
7. Муки Р., Штернберг Э. Поглощение нагрузки разорванным включением в армированном волокнами композите // Механика. Сб. переводов. – 1972. – № 6. – С. 150-165.
8. Підстригач Я.С. Вибрані праці. – К.: Наук. думка, 1995. – 460 с.
9. Суздальницкий И.Д. Периодическая задача о крепении стрингерами пластины, ослабленной системой разрезов // Прикладная математика и механика. – 1979. – Т. 43. – Вып. 4. – С. 730-736.
10. McCartney L.N. New theoretical model of stress transfer between fibre and matrix in a uniaxially fibre-reinforced composite//Proc.R.Lond.A 425. – 1989.

Рекомендовано до публікації д.т.н. Л.В. Новіковою 04.03.09

УДК 624.078.2.046:69.011.5(083.75)

А.В. Паршин, С.А. Жуков, С.А. Харченко, А.Д. Гук

## ОСОБЕННОСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ СМЯТИЮ ЭЛЕМЕНТОВ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ АРМИРОВКИ СТВОЛА, СОЕДИНЯЕМЫХ БОЛТАМИ

Установлено, що при розрахунках і конструюванні будівельних конструкцій приймають занижені опори зминанню. Тому виникла необхідність дослідження опірності елементів сталевих конструкцій зминанню, результати яких наведено в статті.

Установлено, что при расчетах и конструировании строительных конструкций принимают заниженные сопротивления смятию. Поэтому возникла необходимость исследования сопротивляемости элементов стальных конструкций смятию, результаты которых приведены в статье.

It is set that at computations and constructing of building constructions adopt the understated resistances to crumpling. Therefore there was the necessity of resistances research of steel constructions elements to crumpling, the results of which are resulted in the article.

За последнее время в шахтном строительстве конструкции с соединениями на болтах находят все более широкое применение. Объясняется это тем, что они обладают такими преимуществами, как простота изготовления, возможность осуществления монтажа без трудоемких сварочных работ и высокая эксплуатационная надежность [1].

При наличии в конструкции болтовых соединений несущая способность определяется, главным образом, прочностью ослабленных отверстием элементов при вязком, хрупком или усталостном разрушении, а также сопротивляемостью соединительных болтов срезу и сопротивляемостью элементов местному смятию.

Для получения наиболее эффективной конструкции необходимо добиться, чтобы перечисленные несущие способности были одинаковыми. Однако практика показала, что в большинстве случаев, характерных для шахтного строительства (прикрепление малым количеством болтов, располагаемых вблизи обреза), это важное требование не выполняется. Обусловлено это тем, что несущая способность, определяемая сопротивляемостью элементов смятию, существенно ниже других. На основе литературных данных, а также из сопоставления отечественных и зарубежных нормативных документов установлено, что причиной этого является то, что в Украине принимают заниженные сопротивления смятию [1-3]. Поэтому возникла необходимость исследования сопротивляемости элементов стальных конструкций смятию, результаты которых приведены в статье.

Сопротивляемость элемента смятию – это количественный показатель прочности, выраженный в напряжениях, который определяется деформативностью отверстия, воспринимающего нагрузку от стержня [3]. Иначе, сопротивление смятию – это показатель прочности элемента, который воспринимает нагрузку по площади контакта, возникающей при соприкосновении стержня болта с внутренней поверхностью отверстия. Поэтому иногда сопротивляемость смятию называют еще контактной прочностью. Для определения сопротивления смятию необходимо иметь диаграмму «нагрузка – деформация отверстия», которую целесообразно представлять в координатах: напряжения смятия ( $\sigma_{BP}$ , МПа – нагрузка,

отнесенная к площади смятия) – относительная деформация отверстия ( $\varepsilon_d$ , 1 % – отношение приращенного диаметра к его начальному размеру).

С целью получения указанных диаграмм были изготовлены и испытаны образцы, представляющие собой в одном случае равнобокий уголок, а в другом – пластину. Размеры рисок, обреза, расстояния между отверстиями, а также диаметры болтов назначались по соответствующим требованиям действующих норм. Образцы из пластин и уголков имитировали работу болтовых соединений соответственно при центральном и внецентренном нагружении.

Для уменьшения деформаций среза болтов соединения уголков и пластин с нагрузочными приспособлениями (фасонками) осуществлялось термообработанными болтами из стали 40Х. Деформации отверстия измерялись с помощью специально сконструированного приспособления, включающего индикатор часового типа с точностью 0,01 мм. На каждый образец устанавливали по два приспособления, что позволяло в одном испытании получить две диаграммы деформирования.

В соответствии с определением сопротивления смятию в качестве критерия необходимо принимать начало неупругого (пластического) деформирования отверстия. Однако с помощью диаграммы  $\sigma_{BP}$  определить начало неупругого деформирования отверстия сложно, поскольку на этих диаграммах не видно перехода с прямолинейного участка на криволинейный (см. рисунок). Поэтому трудно отделить упругую стадию деформирования от пластической. Это усложняет определение предела текучести, который при смятии необходимо рассматривать как условный, поскольку он характеризуется деформацией отверстия.

В начале эксперимента были выполнены специальные исследования по определению нагрузки, вызывающей начало неупругого деформирования отверстия. Для этого образцы испытывались с остановкой на определенных, предварительно назначенных уровнях (ступенях) нагружения. По достижении заданного уровня нагружения испытания прекращались и образец разбирался. С помощью штангельциркуля тщательно измеряли диаметр отверстия в направлении приложения нагрузки.

Таблица 1

Характеристики испытанных образцов

| Марка стали, профиль | ТУ (ГОСТ)       | $\sigma_B$ , МПа | $\sigma_{B_0}$ , МПа | Экспериментальные значения, МПа |             |            | $R_{ep}$ , МПа | $\frac{(R_{ep}^3 - R_{ep})}{R_{ep} \times 100\%}$ |
|----------------------|-----------------|------------------|----------------------|---------------------------------|-------------|------------|----------------|---|
|                      |                 |                  |                      | $X_{Rep}^3$                     | $X_{Rep}^2$ | $R_{ep}^3$ |                |   |
| уголок 63×63×6       | ТУ 14-1-3023-80 | 383              | 365                  | 482                             | 23,5        | 443        | 365            | 21,4  |
| полка 65×8           | ТУ 14-1-3023-80 | 410              | 370                  | 525                             | 31,0        | 474        | 370            | 28,1  |
| 09Г2С уголок 80×80×6 | ТУ 14-1-3023-80 | 547              | 490                  | 754                             | 34,7        | 697        | 570            | 22,3  |
| 09Г2С – 65×6         | ТУ 14-1-3023-80 | 510              | 470                  | 708                             | 32,2        | 655        | 535            | 22,4  |
| 09Г2С – 65×8         | ТУ 14-1-3023-80 | 549              | 490                  | 724                             | 37,5        | 662        | 570            | 16,1  |
| 12ГС-4 – 65×5        | ТУ 14-1-3023-80 | 513              | 470                  | 715                             | 31,4        | 633        | 535            | 18,3  |
| 10Г2С – 65×7         | ГОСТ 19282-73   | 640              | 590                  | 846                             | 46,1        | 770        | 760            | –1,3  |
| 12Г2СМФ – 65×8       | ТУ 14-1-1308-75 | 727              | 685                  | 998                             | 52,4        | 912        | 1064           | –4,3  |

На основании этих исследований было установлено, что начало неупругого деформирования наступает в тот момент, когда на диаграмме последующее приращение деформаций превышает предыдущее в 2 и более раз (см. рис. 1).

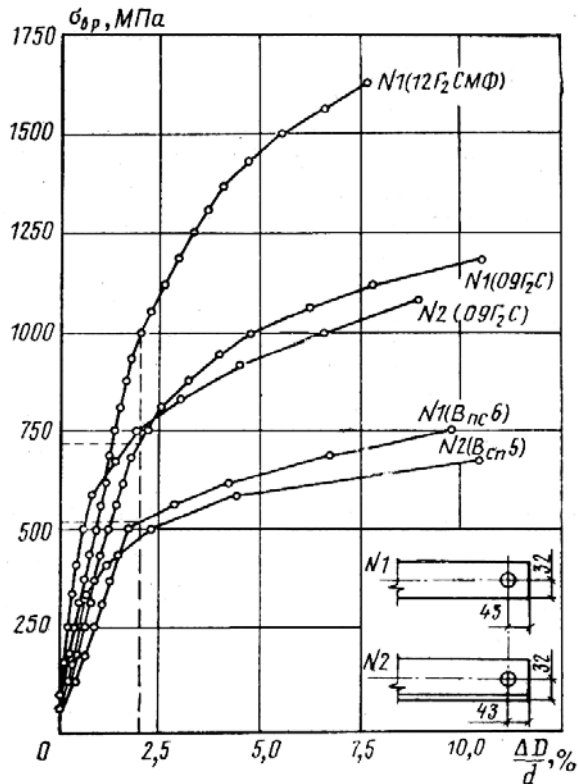


Рис. 1. Диаграмма приращения деформаций испытываемых образцов

Для повышения точности определения пределов текучести при смятии разности между выбранными уровнями нагрузок принимались минимально возможными.

Основными факторами, которые оказывают влияние на сопротивление смятию, являются: механические характеристики материала элементов, количество и диаметр болтов, расстояние от центра до края элемента вдоль и поперек линии приложения нагрузки, зазор между болтом и отверстием, вид загрузки образца (центральный или внецентренный). В статье показано влияние на величину сопротивления смятию всех перечисленных факторов.

При изучении сопротивления смятию в зависимости от прочностных характеристик элементов все строительные стали условно сгруппировали в три класса прочности: малоуглеродистые стали с временным сопротивлением разрыву  $R_{un} \leq 410$  МПа, низколегированные с  $410 < R_{un} \leq 550$  МПа и термоупрочненные с  $R_{un} > 550$  МПа. В соответствии с этим требованием по заводским сертификатам был отобран листовой и фасонный прокат. Затем для каждого вида проката дополнительно определяли фактические значения временного сопротивления.

Наиболее полная оценка такой качественной характеристики стали, как сопротивляемость смятию, может быть получена только на основе использования статистических методов. Поэтому испытания проводили в объемах, допускающих статистическую обработку результатов. Всего было испытано восемь серий образцов и получено 2360 значений условных пределов текучести при смятии.

Количество образцов для каждой серии определялось в соответствии с требованиями обеспечения необходимой достоверности оценки величины среднего и стандарта. В качестве доверительной принималась вероятность 95%. Точность оценки среднего задавалась таким образом, чтобы предельное отклонение ее не превысило погрешностей при испытаниях. Точность оценки стандарта устанавливалась из условия обеспечения 10% погрешности. Фактический объем каждой серии превышал необходимый. Гипотеза о нормальности распределения пределов текучести при смятии проверялась с помощью критерия Пирсона  $\chi^2$ .

Для каждого массива данных определяли математическое ожидание стандарт  $X_{Rep}^2$  и  $X_{Rep}^2$  условных пределов текучести при смятии. Расчетные сопротивления назначались путем соответствующих вычислений с обеспеченностью 0,95 (табл. 1).

Из полученных результатов видно, что с увеличением прочности элементов возрастает сопротивление смятию. Это свидетельствует о том, что в используемой в СНиПах формуле  $R_{ep} = [0,5 + 280(R_{un}/E)]R_{un}$  зависимость сопротивления смятию  $R_{Бр}$  от временного сопротивления стали разрыву  $R_{un}$  закономерна.

Значения расчетных сопротивлений смятию устанавливались без учета коэффициента надежности по материалу  $\gamma_m$ . Объясняется это тем, что исходные величины, т.е. условные пределы текучести при смятии, определялись по деформационному критерию, который обуславливает не саморазрушение элемента, а лишь начало неупругого (пластического) деформирования отверстия. Во всех рассмотренных случаях несущая способность элемента по прочности выше несущей способности, определяемой по смятию более чем на 50%, что обеспечивает требуемую надежность болтовых соединений.

В табл. 1 сопоставлены расчетные сопротивления смятию, определенные экспериментально и согласно требованиям СНиП. Результаты сопоставления показывают, что расчетные сопротивления смятию, которые рекомендуются СНиП, могут быть повышены.

С целью изучения влияния на сопротивление смятию диаметра соединительных болтов были испытаны четыре серии образцов из уголка 63×6. При диаметрах болтов, равных 24, 20, 16, 12 мм, сопротивления смятию были соответственно равны 525, 542, 567 и 583 МПа. Полученные результаты показывают, что увеличение диаметра болта приводит к небольшому снижению сопротивления элемента смятию.

В металлоконструкциях подземных объектов и шахтных копров обычно применяются болты диаметром 20-24 мм. Изменение диаметра болта в этих пределах приводит к снижению сопротивления смя-



тию, на 3%. Очевидно, что учитывать это в расчетах нецелесообразно.

Для оценки влияния на сопротивление смятию расстояния от центра отверстия до края элемента испытывалось шесть серий образцов из уголка 63×6 с величиной обреза  $(1,0-2,25)d$ ,  $d = 21,5$  мм, риска – 32 мм и пять серий из уголка такого же калибра с величиной риски, изменяющейся от 2,25 до 1,25  $d$ ,  $d = 21,5$  мм, величина обреза – 43 мм. Величины  $A'_{вр}$  (МПа) приведены соответственно в табл. 2 и 3 (в числителе). Полученные данные в полной мере соотносятся с рекомендованными СНиП.

Согласно действующим нормативам в зависимости от назначения конструкции, болты в отверстия можно устанавливать с зазором 1,5 или 3 мм.

Таблица 2

Величина обреза, мм

| 1 $d$ | 1,25 $d$ | 1,5 $d$ | 1,75 $d$ | 2 $d$ | 2,25 $d$ |
|-------|----------|---------|----------|-------|----------|
| 300   | 392      | 467     | 525      | 567   | 608      |
| 53%   | 69%      | 82%     | 93%      | 100%  | 108%     |

Таблица 3

Величина риски, мм

| 2,25 $d$ | 2,0 $d$ | 1,75 $d$ | 1,5 $d$ | 1,25 $d$ |
|----------|---------|----------|---------|----------|
| 241      | 374     | 476      | 567     | 607      |
| 43%      | 66%     | 84%      | 100%    | 107%     |

Исследования показали, что для одноболтовых соединений изменение зазора в указанных пределах

не влияет на сопротивление смятию. Иначе обстоит дело с многоболтовыми соединениями. Установка болтов с зазором 3 мм приводит к повышению общей деформативности таких соединений на 10% и, что особенно важно, при этом резко возрастает неравномерность включения болтов в работу на срез. Первое обстоятельство учитывается путем снижения на 10% сопротивлений смятию. Второе должно учитываться при оценке хрупкой прочности многоболтовых соединений.

**Выводы.** На основании выполненных экспериментальных исследований были повышены в СНиП на 20% расчетные сопротивления смятию и уточнены зависимости сопротивлений смятию от геометрических параметров болтовых соединений.

### Список литературы

1. Горпинченко В.М., Кондрахов Е.Я. Прочность болтовых стыков при отрицательных температурах // Энергетическое строительство. – 1981. – № 6. – С. 11-13.
2. WG 22-08. Single bolt connections on angles in transmission line tower. Recommendation for calculation of the strength of longitudinal and transverse edge distances. August, 1984. I. Van Bodegom.
3. Беленя Е.И. Металлические конструкции. – М.: Стройиздат, 1986. – 559 с.

Рекомендовано до публікації д.т.н. Б.М. Андреевим 23.02.09

УДК 622.271

А.О. Бондаренко, Г.І. Пономаренко

## ЗАСТОСУВАННЯ ПОХИЛИХ ГРОХОТІВ ПРИ РОЗРОБЦІ РОДОВИЩ НЕРУДНИХ ПІСКІВ

Обгрунтована раціональність використання похилих нерухомих грохотів при переробці нерудних пісків, які добувають плавучими землесосними снарядами. З метою підвищення технологічності конструкції розроблено грохот похилий колосниковий ГПК 00.000.

Обоснована рациональность применения наклонных неподвижных грохотов при переработке нерудных песков, разрабатываемых плавучими землесосными снарядами. С целью повышения технологичности конструкции разработан грохот наклонный колосниковый ГПК 00.000.

Rationality of riddle sloping immobile grate application at non-metallic sands processing, developed floating shallow dredge is grounded. With the purpose of construction technologicalness increase riddle sloping grate GPK 00.000 is developed.

Природні та техногенні нерудні піски, за набором основних контрольованих фізико-механічних властивостей, рідко відповідають діючим в Україні нормативним документам ДСТУ БВ.2.7-32-95 «Пісок щільний натуральний для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій і робіт», ДСТУ БВ.2.7-29-95 «Мілкі

заповнювачі натуральні, з відходів промисловості, штучні для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій і робіт». Основний обсяг нерудних пісків, що розробляється в Україні, видобувається з підводних річкових, обводнених родовищ та шламовідстійників, з використанням плавучих землесосних снарядів. У

зв'язку з цим актуальним є питання застосування технічних і технологічних засобів для збагачення нерудних пісків у складі пульпи безпосередньо в місці їх розробки.

Виконуючи вибір збагачувального обладнання для переробки пісчано-гравійної маси, яка видобувається з використанням плавучих землесосних снарядів, слід враховувати можливість відсутності централізованого енерго-, водо- та пневмопостачання ділянки переробки. При цьому раціональним є використання грохотів з нерухомою просіювальною поверхнею: колосниковий, дуговий, конічний. У них виділення з вихідної пульпи гравію, комової глини, сміття, черепашки та ін. виконується за рахунок взаємодії з просіювальною поверхнею потоку гетерогенної суміші, яка отримала кінетичну енергію в результаті роботи ґрунтового насоса землесосного снаряда.

Найбільш простим з точки зору конструктивного виконання, з представлених типів, є колосниковий

нерухомий похилий грохот, ефективність використання яких складає 85-95%, причому вона зростає при зниженні концентрації пульпи [1]. Колосникові грохоти встановлюються під кутом до горизонту та являють собою решітки, зібрані з колосників. Матеріал, який завантажується на верхній кінець решітки, рухається по ній під дією кінетичної енергії потоку пульпи та сили тяжіння. При цьому дрібна фракція провалюється через щілини решітки, а крупний клас рухається поверхнею донизу. За практичними даними, кут нахилу просіювальної поверхні складає 40-45°.

До недоліків колосникових похилих грохотів відносять швидке зношення сита, що є результатом великих швидкостей потоку пульпи, яка на них потрапляє. Не дивлячись на такий недолік, їх доволі часто застосовують для виділення з природних піщаних матеріалів і відсівів дроблення крупних фракцій +3...+5 мм (рис. 1).



а



б

Рис. 1. Використання похилого грохота при видобутку та переробці піску: а – Німеччина; б – Росія

Конструкція колосникових похилих грохотів, пристосована для роботи безпосередньо в місці видобутку гірської маси, може бути виконана у вигляді мобільного модуля і зважаючи на простоту конструкції не вимагає спеціального догляду та високої кваліфікації обслуговуючого персоналу.

Відомі конструкції таких грохотів включають станину рамної конструкції, на якій закріплені грохот з нерухомою просіювальною поверхнею, встановлений під кутом до горизонталі, і площадка обслуговування [1, 2]. При цьому під грохотом з нерухомою просіювальною поверхнею закріплені бункер для збору і відведення дрібної фракції зерен піску, а крупна фракція скачується по грохоту вниз (рис. 1,б). Недоліком відомих конструкцій колосникових похилих грохотів є їх низька технологічність, яка полягає в:

- неможливості досягнення великої висоти греблі карти наміву, що призводить до зменшення запасів підприємства за корисною копалиною;
- неможливості регулювання висоти намівної дамби карти наміву;
- неможливості одночасної обробки великих обсягів гірської маси у зв'язку з необхідністю заміни

стаціонарно встановленої просіювальної поверхні, що зношується;

– додаткових труднощів обслуговування, які виникають при необхідності заміни зношуваних елементів грохота.

З метою підвищення технологічності конструкції колосникових грохотів, які використовуються при відкритій гідромеханізованій розробці природних та техногенних пісків, зниження при цьому матеріальних і енергетичних витрат розроблена конструкція грохота похилого колосникового (ГПК) (рис. 2). Конструкція ГПК захищена патентом України [3].

Конструкція грохота включає станину рамної конструкції, на якій закріплені грохот з просіювальною поверхнею, встановлений під кутом до горизонталі, і площадка обслуговування. Окрім цього грохот додатково забезпечений транспортним жолобом, суміщеним з грохотом. Днище просіювальної поверхні може бути складене із змінних або жорсткозакріплених сит. Станина грохота може бути встановлена на полозах.

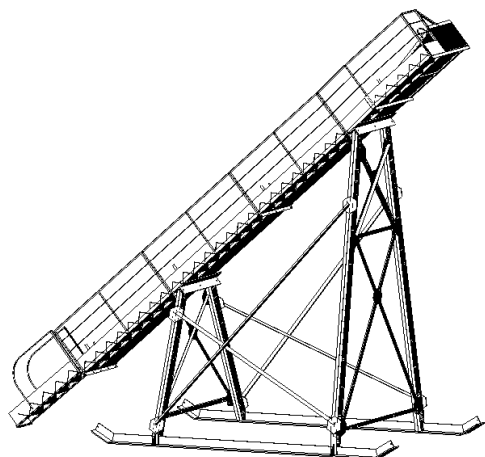


Рис. 2. Модель грохота похилого колосникового

Завдяки введенню в конструкцію пристрою транспортного жолоба, суміщеного з грохотом, можливе забезпечення максимальної висоти наливної дамби карти наміву та її регулювання, внаслідок чого досягається збільшення запасів підприємства за корисною копалиною.

Об'єднання грохота і транспортного жолоба з майданчиком обслуговування полегшує обслуговування пристрою при необхідності регулювання висоти наливної дамби карти наміву або заміни зношуваних елементів.

Таким чином, досягається підвищення технологічності грохота ГПК для розділення зернистих матеріалів, які розробляються за допомогою земснарядів, що призводить до зниження матеріальних і енергетичних витрат.

ГПК запропонованої конструкції працює наступним чином. Конструкцію монтують на місці проведення відкритої розробки родовища піску і встановлюють, розташовуючи просіювальну поверхню над картою наміву. На грохоті в стояках встановлюють пульпопровід. Вихідну пульпу від земснаряда по пульпопроводу подають на просіювальну поверхню грохота, де дрібна фракція пісків зливається з водою через отвори сит днища під грохот і заповнює карту наміву. Крупніші фракції скачуються по транспортному жолобу вниз і складаються у відвал. Після заповнення карти наміву грохот легко пересувають на наступну робочу площадку і робочий процес повторюється.

Випробування ГПК здійснені при розробці Олександрівського родовища піску у 2007-2008 рр. показали його високу ефективність: забезпечене зниження витрат паливно-мастильних матеріалів; зменшення площі, відведеної під карти наміву; зниження собівартості видобутку готового фракціонованого продукту і підвищення вартості реалізації готового фракціонованого продукту. Після випробування похилого грохота його рекомендовано використовувати при розробці Олександрівського родовища піску, що знайшло відображення при складанні "Робочого проекту розробки Олександрівського родовища піску" [4] (рис. 3).

Відповідно до технічного завдання розробка родовища передбачена двома розкривними уступами і одним видобувним уступом на всю потужність корисної копалини в межах затверджених запасів.



Рис. 3. Використання грохота ГПК 00.000 при розробці Олександрівського родовища піску (Україна)

Для цього застосована наступна технологічна схема:

– ґрунтово-рослинний шар потужністю 0,6 м розробляється бульдозером Б-10;

– розкривні породи потужністю 1,52 м розробляються фронтальним навантажувачем PetroNick-956 з навантаженням гірської маси в автосамоскиди Камаз 55111 і транспортуванням її в тимчасовий відвал;

– корисна копалина середньою потужністю 11,1 м розробляється плавучими землесосними снарядами 8МЗП II (з ґрунтовим насосом ГРУТ-800/40) та ґрунтовим насосом ГРУ-1600/25. Далі гірська маса гідро-

транспортується на пересувний грохот ГПК 00.000 де піддається переробці по крупності 10 мм. Фракція +10 мм транспортується у відвал, фракція –10 мм складується у карти наміву (рис. 4). Після заповнення та зневоднення карти наміву збагачений пісок розробляється фронтальними навантажувачами PetroNick-956 з навантаженням піску в автосамоскиди Камаз 55111 і транспортуванням його замовнику.

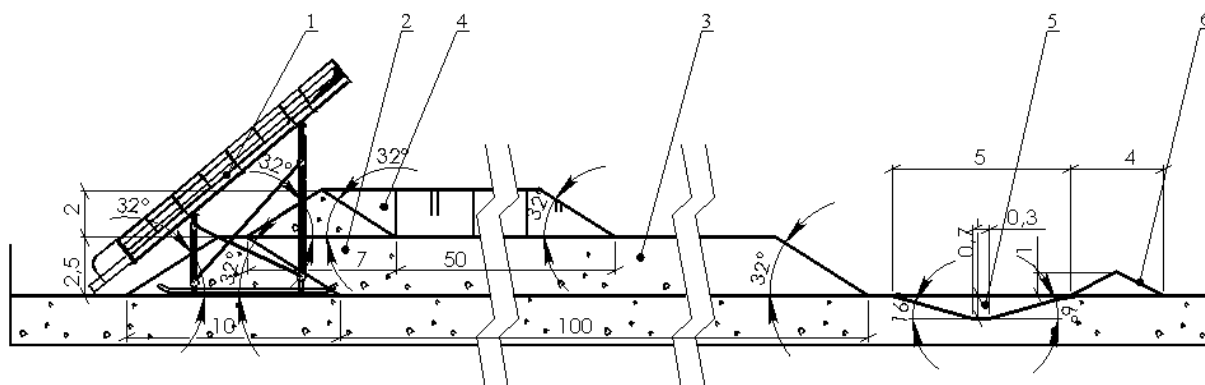


Рис. 4. Технологія укладання піску в карту наміву з використанням ГПК: 1 – грохот похилий колосниковий; 2 – карта наміву; 3 – первинна дамба обвалування; 4 – вторинна дамба обвалування; 5 – водовідвідна канава; 6 – запобіжний вал

Таким чином, в результаті збагачення на пересувному грохоті ГПК з піску видаляється гравій, а при складуванні на карти наміву – частково глинисті включення. Гравій направляють у відвал, а шлами зливаються назад у котлован земснаряда трубопроводом і канавою водовідведення самопливом.

При складанні робочого проекту була розроблена конструкція грохота похилого колосникового ГПК 00.000 з урахуванням: стійкості грохота від дії вітру, стійкості від провалювання у ґрунт, можливості пересування грохота в межах кар'єру з використанням бульдозера Б-10. Виконано силовий розрахунок конструкції: силовий розрахунок опорних полозів, розрахунок стійкості опорних стояків, розрахунок фундаментних болтів. Продумані питання експлуатації та технічного обслуговування ГПК, заходи з охорони праці та промсанітарії при використанні ГПК.

Загалом розроблена конструкція грохота ГПК 00.000 має такі технічні характеристики:

- продуктивність по пульпі – 800 м<sup>3</sup>/год;
- об'ємна концентрація пульпи, що переробляється, не більше 20%;
- габаритні розміри – 11215×4400×9958 мм;
- маса пустого – 4946 кг.

**Маса в робочому стані – 7052 кг.**

З січня 2008 р. грохот похилий колосниковий ГПК 00.000 використовується при розробці Олександрівського родовища піску. Впровадження запропонованого грохота показало його високу ефективність. Основні характеристики гірничих робіт за раніше використовуваною технологією розробки родовища (базовий варіант) та технологічною схемою розробки з використанням грохота ГПК 00.000 для переробки гірської маси (новий варіант), наведені у табл. 1.

Таблиця 1

| Найменування   | Розмірність              | Базовий варіант | Новий варіант |
|--|--------------------------|-----------------|---------------|
| Продуктивність з видобутку корисної копалини             | тис. м <sup>3</sup> /рік | 500             | 500           |
| Середня відстань гідротранспортування корисної копалини  | м                        | 250             | 250           |
| Витрати електроенергії                                   | тис. кВт·год/рік         | 1000            | 1000          |
| Витрати паливно-мастильних матеріалів                    | тис. л/рік               | 14,4            | 7,2           |
| Площа, відведена під карти наміву                        | га                       | 4,2             | 2,9           |
| Кількість виділених фракцій готової продукції            | шт.                      | 1               | 2             |
| Собівартість видобутку готового фракціонованого продукту | грн/м <sup>3</sup>       | 20,25           | 18,1          |
| Вартість реалізації готового фракціонованого продукту    | грн/м <sup>3</sup>       | 25              | 38            |

3 січня 2008 р. грохот похилий колосниковий ГПК 00.000 використовується при розробці Олександрівського родовища піску. Впровадження запропонованого грохота показало його високу ефективність. Основні характеристики гірничих робіт за раніше використовуваною технологією розробки родовища (базовий варіант) та технологічною схемою розробки з використанням грохота ГПК 00.000 для переробки гірської маси (новий варіант), наведені у табл. 1. Отже, технологічна схема розробки обводненого родовища піску з використанням грохота похилого колосникового ГПК 00.000 для переробки гірської маси в умовах розробки Олександрівського родовища піску забезпечила: зменшення витрат паливно-мастильних матеріалів (ПММ) на 7,2 тис. л/рік (50%); збільшення кількості фракцій готового продукту до 2; зменшення собівартості видобутку корисної копалини на 2,15 грн/м<sup>3</sup> (10,6%); збільшення вартості реалізації продукції за рахунок підвищення її якості на 13 грн/м<sup>3</sup> (52%).

Використання грохота ГПК 00.000 дозволило при збереженні виробничої потужності процесу видобутку піску забезпечити зменшення його собівартості та підвищити вартість реалізації піску. Це досягнуто за рахунок зменшення витрат на ПММ та підвищення якості товарного піску.

Від впровадження грохота похилого колосникового ГПК 00.000 за перше півріччя 2008 р. отриманий економічний ефект 3 787 500,00 грн.

## Висновок

При видобутку природних та техногенних нерудних пісків, що не відповідають нормативним документам, з підводних річкових, обводнених родовищ та шламовідстійників, з використанням плавучих землесосних снарядів раціональним та економічно обґрунтованим є використання грохотів похилих колосникових.

## Список літератури

1. Нурок Г.А. Процессы и технология гидромеханизации открытых горных работ. – М.: Недра, 1985. – 357 с.
2. Шкундин Б.М. Машины для гидромеханизации земляных работ. – М.: Стройиздат, 1982. – 184 с.
3. Бондаренко А.О., Симоненко В.І., Пономаренко Г.І., Яровик Ф.Ф. Пристрій для розділення зернистих матеріалів / Пат. 36610 України, В03В 5/00. Опубл 27.10.2008. – Бюл. № 20.
4. Робочий проект розробки Олександрівського родовища піску (ділянка “Нова” № 2) / Національний гірничий університет; Керівник А.О. Бондаренко. – № ДР 0107U009441 – Д., 2008.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. П.І. Піловим 15.02.09*



УДК 004.3

М.А. Алексеев, А.Г. Кигель, О.С. Шевцова

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГРАФИЧЕСКОГО ПРОЦЕССОРА ПРИ РЕШЕНИИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЗАДАЧ

Розглянута ефективність використання графічного процесора за для підвищення продуктивності обчислювальних систем.

Рассмотрена эффективность применения графического процессора для повышения производительности вычислительных систем.

Efficiency of application of the graphic processor for increase of productivity of computing systems is considered.

**Введение.** В соответствии с Государственной программой развития промышленности на 2003-2011 гг. предусматривается повышение технико-экономических показателей информационно-вычислительных систем, а также существенный рост их производительности.

На сегодняшний день потребители приобретают компьютерные системы, которые, скорее всего, будут удовлетворять средним или минимальным вычислительным запросам используемых приложений.

**Анализ существующих достижений и публикаций.** Проблему дефицита вычислительных мощностей для задач, которые невозможно разбить на параллельно выполняющиеся потоки, или, для которых разбиение не принесет ощутимого эффекта, решают повышением производительности центрального процессора ЭВМ [1,2].

Для задач, которые можно эффективно распараллелить, проблему решают повышением количества используемых процессоров [1,2].

В первом случае недостатком является ограничение по производительности процессоров. Во втором случае основной проблемой является стоимость аппаратной части [1,2].

**Формулировка цели и задачи исследований.** Целью статьи является исследование эффективности вычислений общего назначения на графическом процессоре (ГП) – General-Purpose on Graphic Processor Unit (GPGPU) [3].

**Изложение основного материала исследований.** В июне 2007 года корпорация nVidia представила технологию CUDA (Compute Unified Device Architecture – Архитектура Унифицированных Вычислительных Устройств). Данная технология позволяет использовать ГП для выполнения вычислений почти таким же образом, как при использовании ЦП. Эта технология является первой реализацией концепции GPGPU [3].

Изначально ГП представляли собой специализированные чипы, предназначенные для выполнения определенного набора функций. При таком принципе работы ГП содержал в своем составе отдельные наборы блоков для каждой из выполняемых задач. При этом регулярно возникала ситуация, когда один из блоков загружен полностью, а остальные простаива-

ют, поскольку предназначены для выполнения других функций

Решение данной проблемы, а также возможность использования ГП в вычислительных задачах появилась благодаря 10-му поколению графической библиотеки DirectX. В ней использован новый, универсальный подход по реализации различных функций. В библиотеку введена базовая функциональность, которая характерна для всех выполняемых задач, что позволило унифицировать вычислительные блоки ГП для балансировки нагрузки. Это позволило, в свою очередь, эффективно использовать максимальное количество блоков ГП независимо от типа выполняемой задачи. В результате графический конвейер ГП по своим функциям соответствует уровню x386 процессорам. Первым чипом с такой архитектурой стал ГП G80.

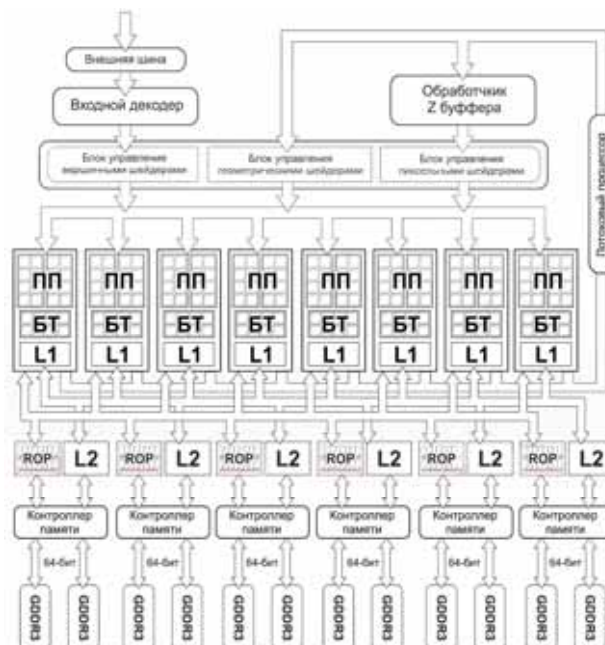


Рис. 1. Архитектура графического процессора G80

Основой нового чипа является универсальное вычислительное ядро, состоящее из 128 потоковых процессоров. Потоковые процессоры объединены в

группы по 16 единиц, каждая из которых называется мультипроцессором. В мультипроцессоре имеется один декодер команд. Каждому мультипроцессору доступна разделяемая в пределах мультипроцессора память. Все потоковые процессоры имеет доступ к общей памяти видеокарты, доступной всем мультипроцессорам. В результате этого результаты вычислений одного потокового процессора доступны другим.

С точки зрения программиста ГП представлен в виде множества 32-х разрядных SIMD (Single Instruction Multiply Data – одна инструкция, обрабатывающая несколько наборов данных) вычислителей. Отличием каждого вычислителя от полноценного ЦП заключается в наличии общего декодера команд на мультипроцессор. Этим достигается выполнение всеми вычислителями в пределах мультипроцессора одной и той же последовательности команд над разными потоками данных. Исходя из этого, наиболее оптимальным представляется решение задач, которые допускают разбиение на множество одновременно выполняемых копий функции, обрабатывающих различные потоки данных.

Основным понятием в концепции CUDA является функция-поток, бинарное представление которой выполняется на вычислителях. Множество функций-потоков, одновременно выполняющихся на вычислителях, объединено в «блок потоков». Выполнено это с целью кооперации и синхронизации между потоками. Каждый поток имеет уникальный в пределах блока идентификатор. Для удобства адресации блок может быть представлен как в виде одномерного массива, так и в виде матрицы и 3-х мерного массива.

Количество потоков внутри одного блока ограничено. Для преодоления этого ограничения в концепции введено понятие сети. Сеть объединяет в себе блоки потоков. Каждый блок в сети имеет свой уникальный идентификатор. Сеть может быть представлена как в виде одномерного массива, так и в виде матрицы. Существенное ограничение концепции состоит в том, что не существует способа синхронизации потоков из разных блоков, а также безопасного способа обмена информацией между блоками. Синхронизация и взаимодействие потоков внутри блока осуществляется посредством разделяемой памяти и точек синхронизации.

Программное обеспечение, использующее графический процессор, состоит из двух частей: кода который выполняется на центральном процессоре, и кода, который выполняется на ГП.

Каждому потоку доступна персональная локальная и регистровая память. Разделяемая память доступна всем потокам блока для взаимодействия между собой. Кроме того, доступна память, используемая ГП (память видеокарты: текстурная, константная, общая).

Сеть блоков, функционирующих на ГП, выполняется по принципу: один блок или несколько блоков на одном мультипроцессоре. Для обеспечения доступа всех потоков блока к разделяемой памяти мульти-

процессора используется квантование по времени, это позволяет обмениваться информацией и проводить синхронизацию в пределах блока.

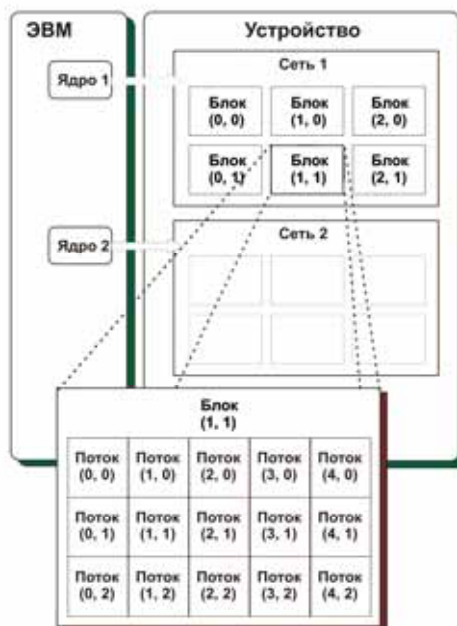


Рис. 2. Схема группирования потоков

Выполнение потоков на устройстве асинхронно, т.е. во время вычислений, производимых на ГП, центральный процессор может выполнять другие вычисления. Также возможно асинхронное выполнение разных задач на разных мультипроцессорах.

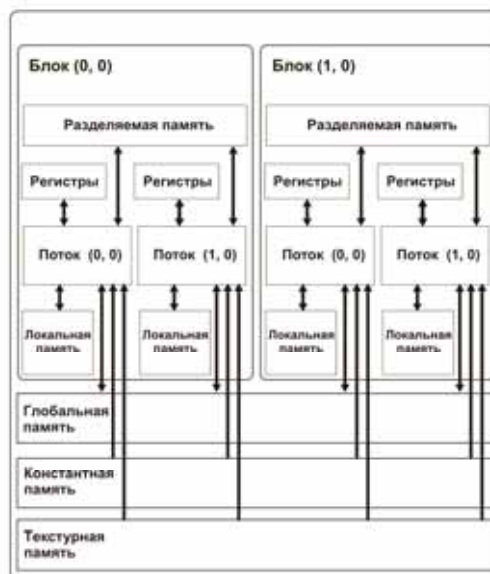


Рис. 3. Модель памяти приложений CUDA

На данный момент возможна работа с 32 битными числами, как целыми, так и с плавающей запятой. Это ограничение разработчики планируют устранить в следующем поколении ГП.

Таблиця 1

Производительность при умножении матриц

| Размер матриц | ГП (млс)  | ЦП (млс)   | ЦП/ГП     |
|---------------|-----------|------------|-----------|
| 32×32         | 1,476945  | 0,049171   | 0,033293  |
| 64×64         | 0,967501  | 0,366772   | 0,428969  |
| 128×128       | 1,039064  | 5,472043   | 5,266317  |
| 256×256       | 2,217252  | 43,717228  | 19,716847 |
| 512×512       | 10,501318 | 352,68249  | 33,584593 |
| 1024×1024     | 71,556824 | 7094,13671 | 99,139905 |
| 2048×2048     | 554,17828 | 153299,563 | 276,62499 |
| 4096×4096     | 4477,8754 | 1372252,36 | 306,45166 |

Особенности архитектуры вычислителя, повлияли на язык программирования, с помощью которого происходит управление процессом вычисления на ГП. Концепция CUDA предоставляет программисту ГП в виде самостоятельной вычислительной системы. Поэтому необходимо разделять код, выполняемый на центральном процессоре, и код, выполняемый на вычислителе, а также разделять адресные пространства, в которых хранятся переменные. За основу для написания программ в концепции CUDA принят язык С. В него внесены определенные изменения и дополнения. Разделение кода по месту выполнения реализовано использованием спецификаторов, которые указывают вид функции, где она выполняется, и возможности по её вызову.

**\_\_host\_\_** – указывает, что функция выполняется на ЦП ЭВМ и вызывается только из функций аналогичного типа. По своей сути они ничем не отличаются от «классических» функций языка С.

**\_\_device\_\_** – указывает, что функция выполняется на ГП и вызывается из функций типа **\_\_device\_\_** и **\_\_global\_\_**.

**\_\_global\_\_** – функция выполняется на ГП, вызывается исключительно из функций, выполняемых на ЦП.

Из-за специфики ГП на глобальные функции наложен ряд ограничений: не поддерживается рекурсия, не поддерживается переменное количество параметров, в глобальную функцию нельзя передавать параметры, размер которых более 256 байт, возвращаемый параметр глобальной функции должен быть void.

Указание места расположения переменной также решается с помощью спецификаторов, указывающих, где расположена переменная, и откуда переменная может быть доступна.

**\_\_device\_\_** – переменная расположена в памяти видеокарты, доступна всем потокам сети, а также доступна из функций хоста, с помощью соответствующих функций среды времени выполнения.

**\_\_constant\_\_** – используется совместно с **\_\_device\_\_** и имеет те же особенности. По своей сути это аналог констант в C/C++.

**\_\_shared\_\_** – располагается в разделяемой памяти мультипроцессора, доступна только в пределах исполняемого блока.

Основное нововведение касается вызова глобальных функций, которое выполняется согласно следующему синтаксису:

**Global\_Function**<<<Dg,Db,Ns>>>(Param),  
где

**Global\_Function** – имя глобальной функции;

**Param** – передаваемые параметры;

**Dg** – информация о размерности сети блоков потоков;

**Db** – информация о размерности блоков сети (суммарно не более 512 потоков на блок);

**Ns** – количество разделяемой памяти, которое необходимо выделить на каждый блок (аппаратное ограничение в 16 килобайт);

Для работы ГП в видеопамять необходимо загрузить данные, которые будут обрабатываться, и выгрузить их обратно в ОЗУ ЭВМ после завершения вычислений. Несмотря на то, что существует метод доступа ГП к ОЗУ ЭВМ, замедление скорости вычислений настолько значительно, что не позволяет добиться какого-либо прироста производительности в таком режиме работы.

В качестве теста производительности архитектуры CUDA выбраны задачи по умножению и транспонированию матриц, по причине их хорошей распараллеливаемости.

Таблиця 2

Данные по времени пересылки данных и вычисления на одном вычислителе при умножении матриц

| Размер матриц | Пересылка данных (млс) | Вычисления на одном вычислителе |
|---------------|------------------------|---------------------------------|
| 32×32         | 1,003994               | 7,5456                          |
| 64×64         | 0,428969               | 67,546                          |
| 128×128       | 0,703006               | 380,456                         |
| 256×256       | 2,152768               | 1173,457                        |
| 512×512       | 11,551728              | 4124,546                        |
| 1024×1024     | 75,436726              | –                               |
| 2048×2048     | 568.892669             | –                               |
| 4096×4096     | 4534,53284             | –                               |

Тест проводился на аппаратной платформе содержащей ЦП Intel Core 2 Duo E6550 (2,33 ГГц). В качестве ГП выступал G80 в модификации GeForce 8800 GTS 320M, содержащий 6 мультипроцессоров. Частота блока мультипроцессоров 1,35 ГГц.

Замеры проводились на матрицах различной размерности для определения эффективности архитектуры при увеличении количества вычислений. Также фиксировалось время пересылки данных из памяти ЭВМ в память видеокарты и назад. Для оценки прироста производительности аналогичные вычисления проводились на ЦП.



Таблиця 3

Производительность при транспонировании матриц

| Размер матриц | ГП(млс)    | ЦП (млс)   | ЦП/ГП     |
|---------------|------------|------------|-----------|
| 32×32         | 0,1837347  | 0,002695   | 0,014668  |
| 64×64         | 0,1773776  | 0,012478   | 0,070346  |
| 128×128       | 0,1840491  | 0,109799   | 0,596577  |
| 256×256       | 0,1731105  | 0,438707   | 2,534258  |
| 512×512       | 0,2393591  | 1,782493   | 7,446938  |
| 1024×1024     | 0,5237633  | 10,027519  | 19,145135 |
| 2048×2048     | 2,1191194  | 163,191284 | 77,009008 |
| 4096×4096     | 14,1896305 | 742,64301  | 52,337254 |

В результате экспериментального исследования установлено, что соотношение производительности центрального и графического процессоров зависит от сложности и объема выполняемых задач (рис. 5). При малых объемах вычислений производительность выше у центрального процессора, что объясняется значительным временем необходимым на инициализацию устройства. При возрастании объемов вычислений время, затрачиваемое на инициализацию устройства, несоизмеримо мало с временем, затрачиваемым на вычисления, поэтому преимущество получает ГП. После определенного объема вычислений, зависящего от сложности решаемой задачи, соотношение производительности графического и центрального процессоров стабилизируется.

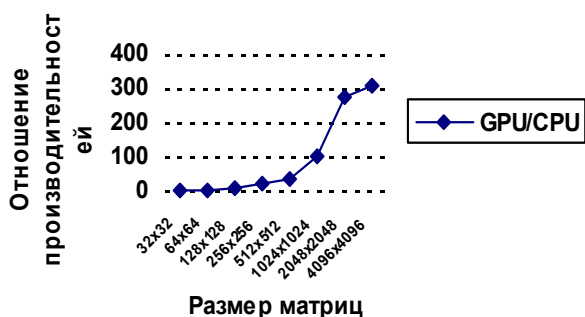


Рис. 5. График отношения производительности графического процессора к центральному процессору при умножении матриц

Спад производительности при транспонировании матрицы 4096×4096 (рис. 6) объясняется особенностями архитектуры ГП, которые разрабатывались для работы с текстурами, представляющими собой матрицу значений цвета, размерами до 2048×2048 включительно. Вычисления с применением одного вычислителя показывает его большое отставание от ЦП, поэтому использовать ГП для задач, не поддерживающих многопоточное решение, нецелесообразно. Результаты эксперимента приведены в табл. 1-3 и на рис. 5 и 6.

Выводы

Использование вычислительных мощностей ГП является эффективным и недорогим способом увеличения производительности ЭВМ. Поскольку современные ГП превосходят ЦП по теоретической производительности примерно в 6 раз дальнейшее исследование способов применения вычислительных мощностей ГП является перспективным. Подтверждается это также тем, что компания ATI (AMD) представила свою реализацию концепции GPGPU под названием STM.

Разработка ПО, адаптированного для работы на ГП, актуальна в настоящее время. Так, например, компания AMD представила проект Fusion, компания Intel – проект Larrabee, которые внедряют графический процессор в ЦП. Использование графических блоков исключительно в графических приложениях экономически нецелесообразно. По этой причине разработка соответствующего ПО может значительно повысить производительность вычислительных систем.

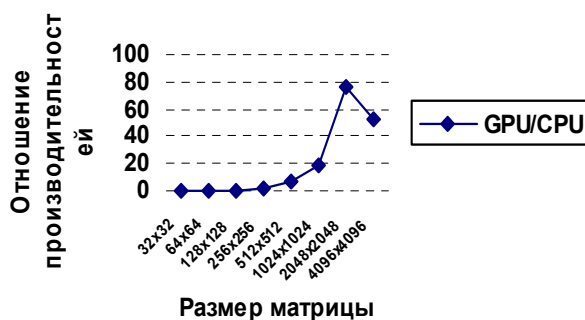


Рис. 6. График отношения производительности графического процессора к центральному процессору при транспонировании матриц

Список литературы

1. Грищак С.Б. AMD Opteron: дважды два не всегда четыре // Компьютерное обозрение. – 2005. – № 503. – С. 34-40.
2. Аляутдинов М.А., Троепольская Г.В. Использование современных многоядерных процессоров в нейрокompьютерах для решения задач математической физики // Нейрокompьютеры: разработка, применение. – 2007. – № 9. – С. 43-52.
3. GPGPU organization // <http://www.GPGPU.org/>
4. nVidia CUDA // <http://www.nvidia.com/cuda>
5. David Luebke, Greg Humphreys. How GPUs Work // IEEE Computer. – 2007. – № 2. – С. 43-47.
6. С.И. Аряшев, С.Г. Бобков, Е.А. Сидоров. Параллельный перепрограммируемый вычислитель для систем обработки информации и сигналов // НК. – 1998. – № 3, 4. – С. 24-38.

Рекомендовано до публікації д.т.н. В.В. Слесаревим 14.02.09

В.І. Корнієнко, Д.Ю. Скриль

### ІДЕНТИФІКАЦІЯ НЕЛІНІЙНИХ ПРОЦЕСІВ ПО ЧАСОВИХ РЕАЛІЗАЦІЯХ

Розроблено методику ідентифікації нелінійних процесів по часових реалізаціях. На прикладі технологічних процесів рудопідготовки показана ефективність цієї методики.

Разработана методика идентификации нелинейных процессов по временным реализациям. На примере технологических процессов рудоподготовки показана эффективность этой методики.

Designed methods to identifications of the nonlinear processes on temporary realization. Efficiency of this methods is shown on example of the technological communiton process.

**Вступ.** Ефективність керування визначається наявністю відповідних засобів, адекватних об'єктам керування (ОК). Тому для складних ОК, що характеризуються нестационарністю, стохастичністю і нелінійністю (включаючи хаотичну динаміку і фрактальну розмірність), актуальним є розробка засобів для їх ідентифікації і прогнозування. При цьому до складних ОК можна віднести, наприклад, процеси рудопідготовки (дроблення і здрібнювання), процеси в телекомунікаційних системах тощо.

**Постановка завдання.** Ідентифікація процесу, як динамічної системи, полягає [1] в одержанні чи уточненні за експериментальними даними математичної моделі цього процесу, вираженої за допомогою того чи іншого математичного апарата.

Нелінійний процес (динамічна система) зображається векторним рівнянням стану:

$$\dot{x} = \Phi(x, \lambda), \quad (1)$$

де  $\Phi$  – нелінійна функція розмірності  $d$ ;  $x$  і  $\lambda$  – вектори координат і параметрів системи.

Процес у вигляді потоку (1) може бути також представлений дискретним відображенням Пуанкаре:

$$x[k+1] = \Phi\{x[k], \lambda\}; x[k] = \{x_1[k], \dots, x_{d-1}[k]\}, \quad (2)$$

де  $k$  – такт часу  $t = k \cdot T$ ;  $T$  – період дискретизації.

Як відомо [2-5], рівняння виду (1) залежно від значень параметрів порядку  $\lambda$  мають чотири стійких рішення: стан рівноваги, коли після перехідного процесу система досягає стаціонарного стану; періодичне і квазіперіодичне рішення, а також хаос. Цим типам рішень відповідають аттрактори системи у вигляді стійкої рівноваги, граничного циклу, квазіперіодичного аттрактора і хаотичного (дивного) аттрактора.

Відмінною рисою останнього є його чутливість до початкових умов і дробова розмірність – фрактальність (властивість самоподоби на різних масштабах).

Зміна значень параметрів  $\lambda$  рівняння системи (1), (2) викликає втрату стійкості одного стану (режиму функціонування) системи і перехід (біфуркацію) її в інший стан.

Розглянутий формальний підхід про чотири стійкі режими добре погоджується з результатами теоретичних і експериментальних досліджень процесів дроб-

лення і здрібнювання [6-9], як нелінійних динамічних ОК зі змінною структурою (розмірністю, режимом динаміки) і параметрами, що залежать від властивостей руди, конструктивних і технологічних змінних.

Процеси дроблення в конусних дробарках і здрібнювання в барабанних млинах спрощено можуть бути представлені за допомогою відображення Ено (Henon), що описує рух частинок в умовах тертя й імпульсних впливів (зіткнень) [3, 5], а також – ротор зі збудженням [4]:

$$x_1[k+1] = 1 - ax_1^2[k] - bx_2[k]; \quad x_2[k+1] = x_1[k], \quad (3)$$

де  $a, b$  – параметри порядку  $\lambda = \{a, b\}$ .

Параметр  $a$  характеризує просторовий розподіл взаємодії (зіткнення) частинок, а параметр  $b$  – загасання в системі. Він обернено пропорційний коефіцієнту тертя (реальними є значення  $b > 0$ ).

Поводження системи (режими її роботи) наочно зображаються у вигляді карти динамічних режимів на площині параметрів системи  $(a, b)$ , яка для відображення Ено наведена на рис. 1.

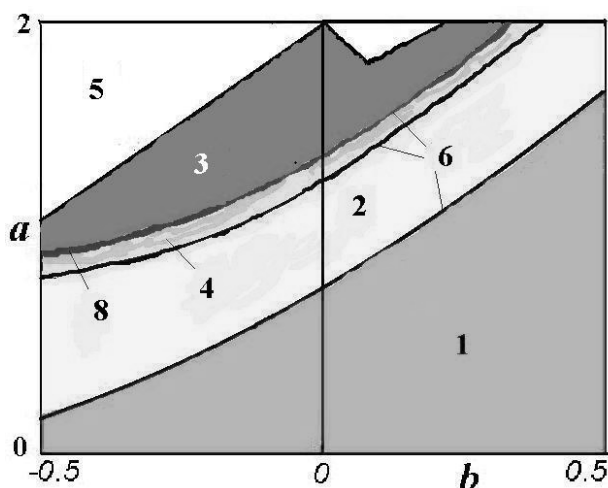


Рис. 1. Карта режимів відображення Ено

Нижня частина 1 карти відповідає встановленню стаціонарного стану рівноваги. З ростом параметра  $a$  і зменшенням  $b$  реалізуються режими періодич-

них коливань періоду 2, а потім спостерігається послідовність біфуркацій 6 подвоєння періоду 4, 8, ... і, нарешті, виникає режим хаосу 3.

Біла область 5 у верхній частині рис. 1 відповідає нестійкому стану.

Іншими спрощеними моделями процесів дроблення і здрібнювання є нелінійні дисипативні осцилятори із силовим чи параметричним збудженнями [3, 8]:

$$\ddot{x} + r\dot{x} + f(x) = a \sin \omega t ; \quad (4)$$

$$\ddot{x} + r\dot{x} + (1 + a \sin \omega t)f(x) = 0 , \quad (5)$$

де  $r$  – коефіцієнт тертя;  $a, \omega$  – амплітуда і частота збудження;  $f(x)$  – зворотна сила.

Як і відображення Ено (3), осцилятори (4)-(5) у просторі параметрів мають періодичні і хаотичні режими, однак їх вигляд значно складніший, ніж на рис. 1.

Процеси дроблення і здрібнювання мають фрактальний характер, оскільки їх функції руйнування (відповідно до модифікованого рівняння Розина-Рамлера [7]) не залежать від крупності частинок, що руйнуються. Внаслідок цього процеси руйнування частинок подібні на різних масштабах крупності.

Вочевидь реальні процеси дроблення і здрібнювання складніше розглянутих моделей (3)-(5): у дійсності вони стохастичні і мультифрактальні, а їх параметри порядку  $\lambda$  безпосередньо не спостерігаються. Тому актуальною є ідентифікація режимів і характеристик нелінійних процесів по експериментальним часовим реалізаціям. А оскільки методи ідентифікації регулярних режимів досить добре розроблені, то основну увагу варто приділити методам ідентифікації хаотичних режимів.

Ідентифікація таких складних ОК традиційними способами вимагає великих витрат на експериментальні дослідження. Методи ж нелінійної динаміки дозволяють з єдиних позицій визначати (класифікувати) і досліджувати режими функціонування технологічних процесів по окремих часових реалізаціях, а також оцінити структуру ОК і синтезувати його модель. При цьому для зниження витрат доцільно використовувати методи систем штучного інтелекту, зокрема, нейронні мережі і системи нечіткої логіки, що легко навчаються і є універсальними й ефективними апроксиматорами [10].

Таким чином, невирішеною задачею є розробка маловитратних і ефективних методів оцінювання й ідентифікації нелінійних динамічних ОК, що мають хаотичні режими.

**Мета статті.** Розробка методики ідентифікації нелінійних динамічних ОК по часових реалізаціях, що включає визначення режимів роботи ОК, їх характеристик і синтез математичних моделей, а також оцінка ефективності цієї методики.

**Характеристики нелінійних процесів.** Найважливішою характеристикою хаотичного руху у фазовому просторі довільної розмірності є ентропія Кол-

могорова  $K$ , що описує динамічне поведіння на дивному аттракторі.

Безладдя (хаос) є поняттям теорії інформації, тому ентропія Колмогорова  $K$  пропорційна швидкості втрати інформації про стан динамічної системи з часом і показує наскільки динамічна система хаотична [4]:

$$K = - \lim_{T \rightarrow 0} \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{NT} (K_{k+1} - K_k) = \\ = - \lim_{T \rightarrow 0} \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{NT} \sum_{i_0 \dots i_k} P_{i_0 \dots i_k} \ln P_{i_0 \dots i_k} , \quad (6)$$

де  $K_{k+1} - K_k$  – втрата інформації на інтервалі часу від  $k$  до  $k+1$ ;  $P_{i_0 \dots i_k}$  – спільна імовірність перебування точки  $x[0]$  в осередку фазового простору  $i_0$  розміром  $\varepsilon$ ,  $x[1T]$  – в  $i_1$ , ... і  $x[kT]$  – в  $i_k$ ;  $N$  – тривалість часової реалізації.

$K$ -ентропія дорівнює нулю для регулярного руху, нескінченна для випадкових систем, позитивна й обмежена для систем з детермінованим хаосом.

Колмогорівська  $K$ -ентропія дозволяє визначити середній час, на який можна передбачити стан системи з динамічним хаосом. Точне прогнозування стану цієї системи можливе тільки на інтервалі часу  $T_d$ , такому, що  $\varepsilon \cdot e^{KT_d} = 1$  [4], відкля

$$T_d = \frac{1}{K} \ln \left( \frac{1}{\varepsilon} \right) . \quad (7)$$

Точність визначення початкового стану системи характеризується величиною дискретизації фазового простору  $\varepsilon$  і впливає на  $T_d$  логарифмічно.

Відстань між найближчими точками аттрактора до і після біфуркацій знаходиться в універсальному відношенні. Самоподоба такого явища описується за допомогою фрактальної розмірності Хаусдорфа  $D_H$  [3], що характеризує швидкість росту числа осередків покриття  $N(\varepsilon)$  даної множини при зменшенні розміру осередків  $\varepsilon$ :

$$D_H = - \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\log N(\varepsilon)}{\log \varepsilon} , \quad (8)$$

де основа логарифма довільна.

**Методика ідентифікації.** Для рішення задачі ідентифікації необхідно визначити режим функціонування системи і її розмірність (порядок), а потім реконструювати модель системи (1) чи (2).

Експериментальний сигнал містить інформацію про режим роботи (аттрактор) системи, що породжує. Якісними ознаками хаотичності руху системи є: нерегулярність часового сигналу; смугові складові на низьких частотах у його спектрі; швидкий спад автокореляційної функції сигналу і самоподібна структура його часо-частотного (вейвлет) перетворення.

Для періодичних рухів спектр сигналу містить дискретні лінії, тоді як хаос через аперіодичність зображається смугою на низьких частотах.

Кореляційна функція для регулярних рухів постійна чи осцилює, а в хаотичному режимі експоненційно спадає.

Усі відомі дивні атрактори мають фрактальну розмірність (самоподібні) [11], що легко видно по вейвлет перетворенню сигналу.

Доведено [4, 5, 12], що по одній часовій реалізації (що спостерігається) можна визначити наступні характеристики:

- фазовий портрет атрактора (режиму роботи);
- кореляційну розмірність  $D_C$  (нижню границю розмірності Хаусдорфа  $D_C < D_H$ );
- розмірність вкладення атрактора  $d$  (розмірність фазового простору) динамічної системи;
- кореляційну ентропію  $K_C$  (нижню границю ентропії Колмогорова  $K_C < K$ ), що характеризує наскільки хаотичний сигнал.

По отриманій часовій реалізації (сигналу  $x = x(t)$ , що спостерігається), задавши затримку  $\tau$  і розмірність  $d$  фазового простору, будується його дискретне відображення:

$$x[k] = \{x[k], x[k-m], x[k-2m], \dots, x[k-(d-1)m]\}, \quad (9)$$

де  $m$  – ціле число ( $m = \tau/T$ ).

При переборі по  $k$  виходить дискретний набір точок у  $d$ -мірному просторі, що при сталому режимі системи відповідно до теореми Такенса [12] є фазовим портретом атрактора.

Чисельне визначення розмірності атрактора виконується за допомогою кореляційної розмірності [3-5]:

$$D_C = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\log(\sum_{i=0}^{N(\varepsilon)} p_i^2)}{\log \varepsilon} = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\log C(\varepsilon)}{\log \varepsilon}, \quad (10)$$

яка обчислюється по кореляційному інтегралу:

$$C(\varepsilon) = \lim_{N \rightarrow \infty} N^{-2} \sum_{i,j} \chi[\varepsilon - \|x_i - x_j\|], \quad (11)$$

оцінюваному по відображенню (9). Величина  $D_C$  пов'язана з  $C(\varepsilon)$  у такий спосіб:  $\sum_{i=0}^{N(\varepsilon)} p_i^2$  – імовірність того, що дві точки на атракторі лежать усередині осередку  $\varepsilon^D$  (імовірність того, що дві точки атрактора розділені відстанню, меншою  $\varepsilon$ );  $\sum_{i,j} \chi[\varepsilon - \|x_i - x_j\|]$  – число пар  $i$  і  $j$ , для яких відстань  $\|x_i - x_j\| < \varepsilon$ ;  $\chi$  – східчаста функція Хевісайда;  $x_i = x[iT]$ .

Значення розмірності  $D_C$  визначається по нахилу лінійної ділянки залежності  $\log C(\varepsilon)$  від  $\log \varepsilon$ . Крім того, будується залежність  $D_C(d)$  зі збільшенням  $d$  у виразі (9) доти, поки  $D_C$  не досягне насичення. Розмірність  $d$ , починаючи з якої  $D_C$  перестає змінюватися, є мінімальна розмірність вкладення атрактора, тобто найменша ціла розмірність фазового простору, що містить весь атрактор.

Разом з тим, із теореми про вкладення [4, 5] випливає, що оцінка розмірності фазового простору  $d$  визначається через оцінку розмірності атрактора  $D_C$  реальної динамічної системи (формула Мане):

$$d \geq 2D_C + 1. \quad (12)$$

На практиці значення  $d$  по виразу (12) для відображень виявляється завищеним, тому часто обмежуються простором розмірності  $d \geq D_C$ .

Оцінку (знизу) колмогорівської ентропії  $K$  можна одержати з урахуванням (6) і (11) у вигляді:

$$K_C = - \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \lim_{k \rightarrow \infty} \ln[C_k(\varepsilon)/C_{k+1}(\varepsilon)] \leq K, \quad (13)$$

де узагальнений кореляційний інтеграл  $C_k(\varepsilon)$  обчислюється по відображенню (9) відповідно до виразу:

$$C_k(\varepsilon) = \lim_{N \rightarrow \infty} N^{-2} \sum_{i,j} \chi[\varepsilon - \|x_i - x_j\|_k] = \sum_{i_1 \dots i_k} P_{i_1 \dots i_k}^2. \quad (14)$$

Тут  $\|x_i - x_j\|_k = \sqrt{\sum_{n=0}^{k-1} (x_{i+n} - x_{j+n})^2}$ .

Значення  $K_C = const > 0$  означає достатню умову існування хаотичного режиму (на рис. 1 це область хаосу 3).

Оцінка (зверху) інтервалу передбачуваності виконується аналогічно виразу (7):

$$T_C = \frac{1}{K_C} \ln\left(\frac{1}{\varepsilon}\right) \geq T_d. \quad (15)$$

За часи, більші  $T_C$ , можливе тільки статистичне прогнозування, інтервал (глибина) якого залежить від кореляційної функції процесу [9].

Реконструкція моделі динамічної системи на основі аналізу часових реалізацій полягає у виборі базисних функцій (структури) і їх коефіцієнтів (параметрів) моделі, а також визначенні значень параметрів моделі, оптимальним чином відповідних часовій реалізації.

Для рішення задачі реконструкції моделі (1), (2) формується  $d$ -мірне відображення виду:

$$\begin{aligned} x_{1,i+1} &= \Phi_1 \{x_{1,i}, x_{2,i}, \dots, x_{d,i} | \lambda\}; \\ &\dots \dots \dots \\ x_{d,i+1} &= \Phi_d \{x_{1,i}, x_{2,i}, \dots, x_{d,i} | \lambda\}, \end{aligned} \quad (16)$$

де  $x_{j,i}$  – координати вектора стану, розглянуті в моменти часу  $i \cdot T$ ;  $j = \overline{1, d}$ ;  $i = \overline{d, N-1}$ .

Далі еволюційні функції  $\Phi_j \{x_i\}$  відображаються у вигляді розкладання по деякому базисі із шуканими коефіцієнтами (параметрами)  $\lambda$ .

Традиційно для апроксимації функцій використовуються поліноми Лежандра чи інші. Коефіцієнти цих поліномів утворюють невідомі параметри  $\lambda$ , значення яких вибираються так, щоб щонайкраще відповідала часовим реалізаціям, що спостерігаються, наприклад, за критерієм мінімуму похибки:

$$E_x^2 = \sum_{j=1}^d \sum_{i=d}^{N-1} [x_{j,i+1} - \Phi_j \{x_i\}]^2 \rightarrow \min. \quad (17)$$

Для рішення системи (16) за критерієм (17) звичайно застосовується метод найменших квадратів (за умови, що  $N$  більше кількості параметрів  $\lambda$ ).

Перевагою традиційного підходу є його простота (пошук тільки однієї функції  $\Phi$ ), а істотними недоліками – громіздкість одержуваної моделі, а також наявність процедури чисельного диференціювання, що призводить до великих похибок обчислень.

Більш продуктивним для апроксимації функцій  $\Phi_j \{x_i\}$  є використання нейронних мереж чи гібридних нейронних мереж з нечіткою логікою, що є універсальними й ефективними апроксиматорами. Їх параметрами  $\lambda$  є ваги нейронів, а також коефіцієнти їх функцій активації і належності (для гібридних мереж). Навчання мереж здійснюється, наприклад, методом зворотного поширення похибки і полягає у визначенні значень параметрів  $\lambda$ , що оптимальним чином (відповідно до критерію (17)) відповідають спостерігаємым часовим реалізаціям.

Реконструйована модель, що правильно передає динаміку на атракторі може бути неадекватною до опису траєкторії наближення до атрактора і виходу в сталий режим. Для вирішення таких проблем необхідно додатково обробляти реалізації, що характеризують процеси встановлення. Це може бути здійснене шляхом реалізації адаптивної ідентифікації ОК у процесі функціонування системи керування, що відносно просто виконується за допомогою нейронних і гібридних мереж, але дуже трудомістко при традиційному підході.

З урахуванням вищевикладеного методика ідентифікації нелінійних процесів по часових реалізаціях включає наступне.

1. Визначення режиму функціонування системи:

– якісний аналіз вигляду часового сигналу, його спектра, кореляційної функції і часо-частотного перетворення;

– побудова фазового портрета атрактора по дискретному відображенню часової реалізації (9);

– обчислення кореляційної ентропії  $K_C$  по виразах (13), (14), що є оцінкою знизу  $K$ -ентропії Колмогорова (6) і характеризує ступінь хаотичності режиму.

2. Визначення розмірності (порядку) системи:

– обчислення кореляційного інтервалу передбачуваності (глибини прогнозу) процесу  $T_C$  по виразу (15), що є оцінкою зверху інтервалу точного прогнозування стану системи  $T_d$  (7);

– обчислення кореляційної розмірності атрактора  $D_C$  по виразах (10), (11), що характеризує нижню границю фрактальної розмірності  $D_H$  (8);

– визначення розмірності вкладення атрактора  $d$  (розмірності фазового простору) системи по виразу (12) і за графіком залежності  $D_C(d)$ .

3. Реконструкція моделі режиму системи:

– вибір базисних функцій  $\Phi$  (структури) і параметрів  $\lambda$  моделі;

– настроювання (визначення) параметрів  $\lambda$  моделі, які оптимальним чином (за вибраним критерієм (17)) відповідають експериментальній часовій реалізації (16).

**Моделювання** процедури ідентифікації виконувалося відповідно до запропонованої методики за допомогою розроблених програм у середовищі Matlab. Як процеси, що ідентифікують, використовувалися часові реалізації відображення Ено і вмісту класу +75 мм у крупнодробленій руді  $\gamma_{+75}$ , отриманої в умовах Інгулецького гірничо-збагачувального комбінату.

Часові і частотні характеристики сигналу  $\gamma_{+75}$  наведені на рис. 2. По їх виду можна сказати про нерегулярність процесу, що породжує. Це впливає з нерегулярного вигляду часової реалізації сигналу  $\gamma_{+75}$  (див. рис. 2,а), експоненційного спаду його кореляційної функції (рис. 2,б), наявності значної частини енергії спектра сигналу в низькочастотній області (рис. 2,в) і самоподібного (фрактального) характеру його вейвлет перетворення (гілляста структура на рис. 2,г зберігається на різних масштабах).

На рис. 3 наведені фазові портрети сигналів процесів, що ідентифікують. Видно, що внесення в систему білого шуму (з амплітудою 0,1 від рівня сигналу) порушує тонку структуру фазового портрета відображення Ено (див. рис. 3,а і б).

Побудова фазових портретів сигналу  $\gamma_{+75}$  при розмірності  $d \leq 3$  і варіації затримки  $\tau$  не дозволило знайти закономірність руху (див. рис. 3,в). Це може бути викликано або великим рівнем шуму в сигналі, або перебуванням процесу, що породжує, у несталому режимі, або розмірність фазового простору процесу більше 3.

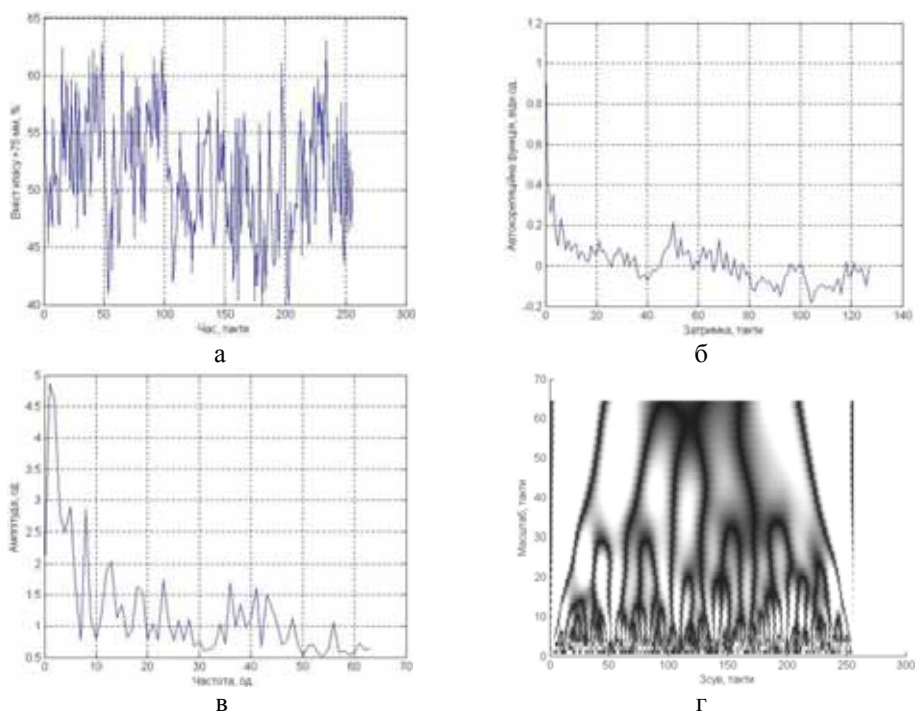


Рис. 2. Часова реалізація сигналу  $\gamma_{+75}$  (а), його кореляційна функція (б), спектр (в) і вейвлет перетворення (г)

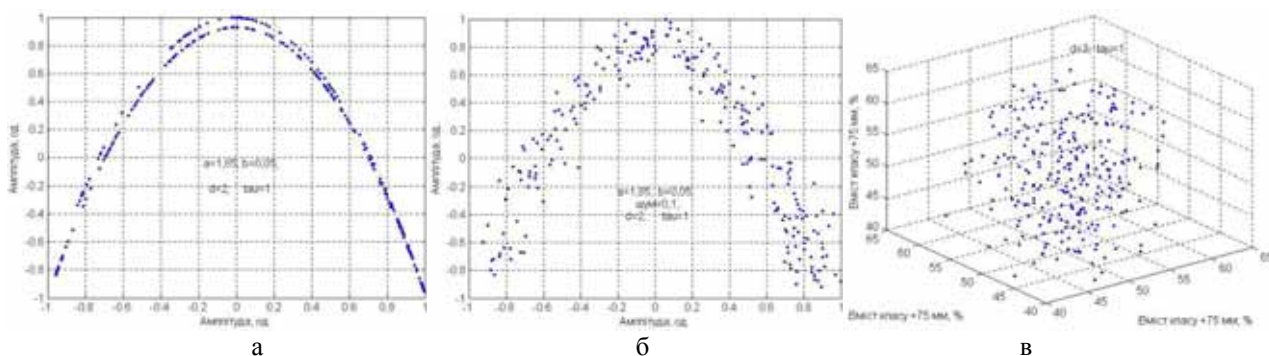


Рис. 3. Фазові портрети відображення Ено (а), відображення Ено із шумом (б) і сигналу  $\gamma_{+75}$  (в)

Розрахунки [13] визначили значення кореляційних ентропій і розмірності атракторів відображення Ено  $K_{CE} = 0,47$  і  $D_{CE} = 1,14$  (при значеннях параметрів  $a = 1,85$  і  $b = 0,05$ ), а також сигналу  $\gamma_{+75}$  –  $K_{C\gamma} = 0,35$  і  $D_{C\gamma} = 3,25$ .

При цьому інтервали передбачуваності відповідно до (15) складають  $T_{CE} = 3,42$  такту і  $T_{C\gamma} = 4,58$  такту (згідно (9) тривалість такту дорівнює  $\tau$  чи в дискретному часі –  $\tau/T$ ).

Для визначення розмірності фазового простору  $d_\gamma$  сигналу  $\gamma_{+75}$  по виразу (12) обчислювалася її оцінка зверху:  $d_\gamma \leq 7,5$ , а для оцінки значення  $d_\gamma$  знизу будувалася залежність  $D_{C\gamma}(d_\gamma)$ , що наведена на рис. 4. З неї випливає, що розмірність атрактора  $D_{C\gamma}$  практично перестає зростати (входить у насичення) при розмірності фазового простору  $d_\gamma \geq 5$ .

З урахуванням розрахунків і графіка на рис. 4 одержимо  $D_{C\gamma} \cong 3,48$  і  $5 \leq d_\gamma \leq 7$ , що багато більше 3 і, відповідно, пояснює відсутність закономірності в русі на фазовому портреті сигналу  $\gamma_{+75}$  (див. рис. 3,в).

Для реконструкції моделі відображення Ено та експериментального сигналу  $\gamma_{+75}$  використовували адаптивну нейронну систему нечіткого висновку Anfis [10] з дзвіноподібною функцією належності. На її вхід подавалися відповідні часові реалізації зі своїми розмірностями  $d$  (глибиною пам'яті  $d-1$ ). Реалізації розбивалися на навчальну і перевіірочну послідовності нарівно, а прогноз виконувався глибиною до 10 тактів, що перевищує отримані вище значення інтервалів точної передбачуваності  $T_{CE}$  і  $T_{C\gamma}$ .



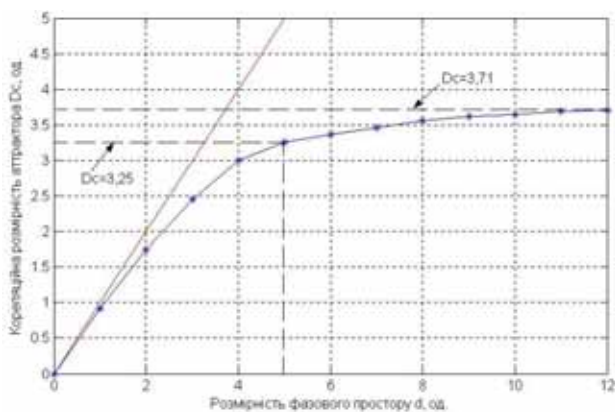


Рис. 4. Залежність розмірності аттрактора від розмірності простору для сигналу  $\gamma_{+75}$

Як показник ефективності прогнозування використовувалася відносна величина середньоквадратичної похибки (17), нормованої по діапазонах зміни сигналів. Результати розрахунків цієї похибки для прогнозування відображення Ено, відображення Ено з білим шумом рівня 0,1, а також експериментального сигналу  $\gamma_{+75}$  наведені на рис. 5. Для сигналу  $\gamma_{+75}$  розмірність приймалася  $d_\gamma = 5$ .

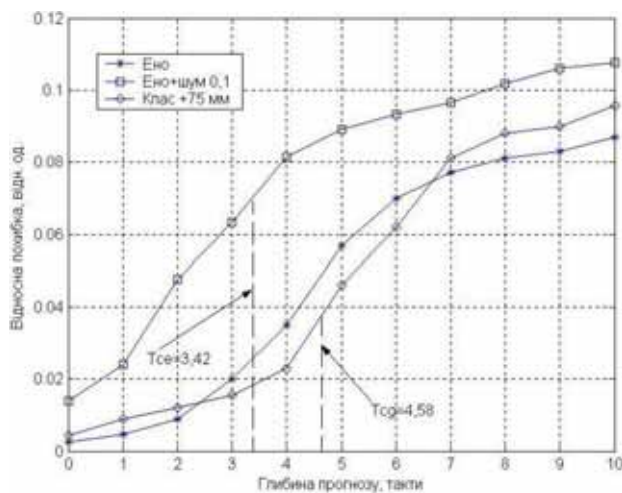


Рис. 5. Залежність відносної похибки від глибини прогнозу

З аналізу рис. 5 виходить, що відносна похибка прогнозування відображення Ено та сигналу  $\gamma_{+75}$  складає менше 0,10 при глибині прогнозу до 10 тактів та менше 0,04 для інтервалів передбачуваності цих сигналів. Для порівняння, відносна похибка прогнозування цих сигналів лінійними фільтрами (при лінійній моделі процесів) складає до 0,22.

Статистична перевірка за непараметричним критерієм знаків показала, що прогнозування за допомогою нейронної системи нечіткого висновку адекватне

з імовірністю 0,99 розглянутим часовим реалізаціям при глибині прогнозу до 10 тактів.

**Висновки**

Розроблено методику ідентифікації нелінійних процесів по часових реалізаціях, яка дозволяє визначати режим функціонування динамічної системи, її розмірність та реконструювати її модель.

Ефективність запропонованої методики оцінена для часових реалізацій процесів рудопідготовки. Доведена адекватність отриманих по ній результатів ідентифікації.

Подальші дослідження мають бути спрямовані на розробку методів оптимізації вибору базисних функцій моделей (структурно-параметричної ідентифікації) ОК.

**Список літератури**

1. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А.А. Красовского. – М.: Наука, 1987. – 712 с.
2. Камке Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. – М.: Мир, 1971. – 576 с.
3. Кузнецов С.П. Динамический хаос. – М.: Физматлит, 2002. – 296 с.
4. Шустер Г. Детерминированный хаос. Введение. – М.: Мир, 1988. – 256 с.
5. Анищенко В.С. Знакомство с нелинейной динамикой. – М.-Ижевск: ИКИ, 2002. – 172 с.
6. Марюта А.Н., Качан Ю.Г., Бунько В.А. Автоматическое управление технологическими процессами обогатительных фабрик. – М.: Недра, 1983. – 277 с.
7. Линч А. Дж. Циклы дробления и измельчения. Моделирование, оптимизация, проектирование и управление. – М.: Недра, 1981. – 343 с.
8. Марюта А.Н., Ступак И.И. Внутренняя механика барабанных рудоразмельных мельниц // Изв. вузов. Горный журнал. – 1995. – № 2. – С. 125-130.
9. Качан Ю.Г., Корниенко В.И. Результаты идентификации процесса дробления по принципу самоорганизации // Горн. электромеханика и автоматика: Респ. межвед. науч.-техн. сб. – 1988. – Вып. 53. – С. 32-38.
10. Круглов В.В., Дли М.И., Голунов Р.Ю. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети. – М.: Солон, 1996. – 348 с.
11. Федер Е. Фракталы. – М.: Мир, 1991. – 254 с.
12. Takens F. Lecture Notes in Mathematics. – Berlin: Springer-Verlag, 1980. – Vol. 898. – Pp. 366-381.
13. Сычев В. Фрактальный анализ. Программа Fractan 4.4. – [http:// impb.ru/~sychyov/](http://impb.ru/~sychyov/).

Рекомендовано до публікації д.т.н. В.В. Слесаревим 06.02.09



УДК 504.062

В.И. Салли, Е.С. Лопатина

## ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОГЕННОГО ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ В ПРИМОРСКОЙ ЗОНЕ

Розглянуто особливості впливу господарчої діяльності на довкілля, розкрито еколого-економічні причини загострення екологічної ситуації та запропоновано заходи з покращення стану навколишнього середовища у приморській зоні.

Рассмотрены особенности влияния хозяйственной деятельности на окружающую среду, раскрыты эколого-экономические причины обострения экологической ситуации и предложены мероприятия по улучшению состояния окружающей среды в приморской зоне.

The features of environmental impact of economic activity are considered, the ecology-economics reasons of intensification of ecological situation are exposed and measures on the improvement of the state of environment in a seashore area are offered.

Современный этап развития общества сопровождается резким истощением природной среды, возникновением необратимых изменений в экосистемах и снижением ассимиляционных способностей биосферы. Это создает угрозу не только возможностям экономического роста, но и перспективам выживания человечества.

Недопустимо высокое потребление природных ресурсов и загрязнение окружающей среды побочными продуктами производственной деятельности предопределили обострение экологического кризиса. Экологический фактор стал оказывать весомое влияние на многие составляющие общественной жизни: ухудшается здоровье населения, падает производительность труда, снижается продуктивность ресурсов. Это в свою очередь оборачивается экономическим ущербом и социальными потерями.

Рост зависимости общественного развития от состояния окружающей среды привел к необходимости согласования экономических и экологических приоритетов. В этой связи широкое распространение получила концепция устойчивого развития, т.е. обеспечение гармонии общества и окружающей среды, экономикой и экологией, техникой и природой.

Практическая реализация этой идеи требует существенных изменений в стратегии социально-экономического развития не только на государственном и региональном уровнях, но и на уровне отдельного предприятия.

В данной статье рассмотрена экологическая ситуация, возникшая в крупном промышленном и курортном городе Украины – Бердянске.

С научной точки зрения задача сводится к анализу техногенного влияния хозяйственной деятельности на окружающую среду со стороны промышленности данного региона и раскрытию эколого-экономических причин обострения экологической ситуации с учетом расположения города на побережье Азовского моря.

Центральная геофизическая обсерватория Министерства чрезвычайных ситуаций исследовала уровень загрязнения воздуха в городах Украины, среди

которых Мариуполь занимает в рейтинге загрязнения 8-ое, а областной центр – Запорожье – 18-е место.

Город Бердянск, не только индустриальный центр приазовского региона, но и известный курорт, принимающий более полумиллиона отдыхающих в сезон.

Бердянская коса – уникальное создание природы, Она является одной из крупнейших на северном побережье, а по разнообразию и богатству природных ресурсов не имеет себе равных. В городе действуют широкая сеть санитарно-курортных и спортивных учреждений.

Сочетание южного солнца, приморско-степного климата, насыщенность морского воздуха озоном, бромом, йодом и хлоридами, различными солями и микроэлементами обеспечили здесь благоприятные курортологические условия для создания многочисленных санаториев, баз отдыха, детских оздоровительных лагерей [1].

В настоящее время промышленность Бердянска пока не восстановила уровень производства, которым она обладала в 70-80-х годах прошлого века. И, тем не менее, в городе действует 37 промышленных предприятий всех форм собственности и 540 предприятий малого бизнеса. Промышленность города представлена очень широким ассортиментом производимой продукции во главе с наиболее стабильно работающим предприятием ОАО «АЗМОЛ».

Среди промышленных предприятий широко известны заводы по производству сельскохозяйственных и дорожных машин, стекловолокон и кабельной продукции, питательных насосов и подъемно-транспортного оборудования, продуктов питания и легкой промышленности. Особое место занимают товары торговой марки «АЗМОЛ» – масла и смазки, изготовленные в Бердянске и популярные во всем мире, морской торговый порт. Доля указанных предприятий в промышленной структуре города представлена на рис. 1.

В Бердянске нет предприятий 1-го класса токсичности. Отходы работающих в городе предприятий 3-го и 4-го класса опасности не требуют захоронения

на специальных площадках, а могут вывозиться на городской полигон твердых бытовых отходов.

С каждым годом обостряется проблема перенасыщенности города автомобилями в летний сезон. Автомобильные выхлопы активно насыщают воздух продуктами сгорания топлива – окисью углерода (табл. 1) [2]. Из данных табл. 1 видно, что пробы атмосферного

воздуха отбирались в районах промышленных предприятий и на перекрестках автомобильных дорог. В зоне влияния предприятий превышение предельно допустимой концентрации вредных веществ было выявлено в одной пробе. В то же время пробы, которые были взяты на городских автомагистралях, не соответствуют нормам в четверти случаях.



Рис. 1. Отрасли промышленности г. Бердянска

Таблица 1

Выбросы загрязняющих веществ в атмосферу

| Год  | Пробы под факелами промышленных предприятий |            |      | Пробы на автомагистралях |            |       |
|------|---|------------|------|--------------------------|------------|-------|
|      | Всего проб                                  | отклонений | %    | Всего проб               | отклонений | %     |
| 2001 | 334   | 23         | 6,88 | 105                      | 47         | 44,76 |
| 2002 | 381   | 5          | 3,93 | 105                      | 50         | 47,60 |
| 2003 | 430   | 6          | 1,00 | 114                      | 41         | 35,96 |
| 2004 | 542   | 3          | 0,66 | 120                      | 50         | 41,66 |
| 2005 | 304   | 3          | 0,98 | 120                      | 18         | 15,00 |
| 2006 | 551   | 8          | 1,45 | 124                      | 29         | 23,38 |
| 2007 | 269   | 6          | 2,23 | 120                      | 26         | 21,66 |
| 2008 | 396   | 25         | 5,30 | 100                      | 24         | 24,00 |

Таким образом, пробы, в которых были выявлены отклонения от нормы 95% – это те пробы, в которых превышено количество окиси углерода. Кроме того, пробы, взятые возле магистралей, показали превышение санитарных норм по содержанию свинца, который содержится в автомобильном топливе.

Что касается Азовского моря, необходимо отметить следующее. На территории бассейна Азовского моря сосредоточен значительный промышленный комплекс двух государств – Украины и Российской Федерации, поэтому антропогенная нагрузка на бассейн достаточно велика. Первыми, в результате промышленной и хозяйственной деятельности в бассейне водоема страдают реки, питающее море пресной воды. Поэтому одним из ключевых моментов в повышении рыбопродуктивности Азовского моря и других рыбохозяйственных водоемов (лиманов, водохранилищ и др.)

является мелиорация впадающих в него рек. Особого внимания заслуживает Молочный лиман, играющий существенную роль в воспроизводстве рыбы, поскольку эта часть моря одно из основных естественных нерестилищ в Азовском бассейне.

Больше половины проб воды, которые были взяты для исследования за последние восемь лет (табл. 2) [3], не отвечали требованиям по химическим показателям. В пробах наблюдаются отклонения по прозрачности, цветности, содержанию нефтепродуктов и другим показателям. Этому способствовали, помимо всего, аварии нескольких судов, повлекшие выброс нефтепродуктов в море.

Одна из проблем, которая требует первоочередного решения, – отсутствие централизованной системы ливневой канализации. Функции ливневого стока выполняют дренажные каналы нижней части города и природные, частично оснащенные лотками каналы (бал-

ки) при полном отсутствии соответствующих санитарных правил. Состояние грунтов в городской черте представлено в табл. 3.

Кроме того, в зону водопользования сбрасываются неочищенные стоки, и отсутствуют вторые нитки напорных канализационных коллекторов водоканала.

Таблица 2

## Санитарно-экологическое состояние Азовского моря

| Год  | Бактериологические показатели |            |      | Химические показатели |            |       |
|------|-------------------------------|------------|------|-----------------------|------------|-------|
|      | Всего проб                    | отклонений | %    | Всего проб            | отклонений | %     |
| 2001 | 150                           | 1          | 0,66 | 89                    | 41         | 44,76 |
| 2002 | 170                           | 4          | 2,35 | 94                    | 75         | 47,60 |
| 2003 | 192                           | –          | –    | 94                    | 74         | 35,96 |
| 2004 | 189                           | –          | –    | 91                    | 63         | 41,66 |
| 2005 | 192                           | –          | –    | 88                    | 68         | 15,00 |
| 2006 | 146                           | 3          | 2,05 | 88                    | 66         | 23,38 |
| 2007 | 146                           | 2          | 1,36 | 105                   | 80         | 21,66 |
| 2008 | 133                           | 2          | 2,50 | 97                    | 58         | 24,00 |

Таблица 3

## Состояние грунта города

| Год  | Бактериологические показатели |            |       | Химические показатели |            |       | Паразитологические показатели |            |      |
|------|-------------------------------|------------|-------|-----------------------|------------|-------|-------------------------------|------------|------|
|      | Всего проб                    | отклонений | %     | Всего проб            | отклонений | %     | Всего проб                    | отклонений | %    |
| 2001 | 51                            | 13         | 25,49 | 52                    | 10         | 19,23 | 431                           | –          | –    |
| 2002 | 46                            | –          | –     | 72                    | 12         | 12,66 | 293                           | 1          | 0,34 |
| 2003 | 52                            | 4          | 7,69  | 58                    | 30         | 51,72 | 158                           | –          | –    |
| 2004 | 53                            | –          | –     | 67                    | 18         | 26,80 | 345                           | 5          | 1,44 |
| 2005 | 63                            | –          | –     | 63                    | 14         | 22,20 | 215                           | 2          | 0,93 |
| 2006 | 50                            | –          | –     | 55                    | 20         | 36,36 | 222                           | 1          | 0,45 |
| 2007 | 46                            | –          | –     | 66                    | 14         | 21,20 | 243                           | 1          | 0,41 |

В случае порыва сетей, по которым стоки движутся от насосных станций (по Мелитопольскому шоссе) к очистным сооружениям водоканала, неочищенные сточные воды попадают в море.

Попадают в море и неочищенные стоки из частного сектора. В Бердянске по-прежнему много домов, к которым не подведена канализация. Поэтому пробы, отбираемые санитарно-эпидемиологической станцией в тех местах Бердянского залива, куда сбрасываются стоки, говорят о том, что качество морской воды становится хуже.

Серьезные проблемы с позиций экологии связаны с жилищно-коммунальным сектором. Он характеризуется недостаточной мощностью очистительных сооружений хозяйственных стоковых вод, чрезвычайно высокой изношенностью оборудования, а также сети водоснабжения и канализования стоков (50-80%). Характерна постоянная угроза отключения этих объектов от источников энергоснабжения, из-за отсутствия средств в местных бюджетах для внедрения водоохранных мероприятий. Все это не позволяет обеспечить функционирование этой отрасли в соответствии с требованиями природоохранного законодательства.

К сожалению, на общее экологическое состояние города продолжают оказывать процессы подтопления. Несмотря на то что, Запорожская область находится в зоне недостаточного увлажнения, процессы

подтопления приобрели широкое распространение и существенно влияют на экологическое состояние территории и условия жизнедеятельности людей.

Повышение уровня грунтовых вод и, как следствие, развитие процессов подтопления происходит главным образом за счет избыточной техногенной нагрузки, а естественные факторы лишь усиливают это влияние. Развитию процессов подтопления способствует, в частности, нарушение правил планирования и застройки территории. При участии областной администрации разработана Программа ликвидации последствий подтопления в городах и поселках области. Приоритетным мероприятием признана организация и функционирование мониторинга процессов подтопления, за результатами которого определяются причина их развития и мероприятия предупреждения и ликвидации последствий. Используемый для обеззараживания и обесцвечивания воды и водопроводной станции хлор, попадая в организм человека, приводит к мутационным и канцерогенным эффектам. При этом провоцируется целый ряд специфических заболеваний, в частности ослаблению иммунной системы и репродуктивной функции, врожденным дефектам и др. Известно, что в промышленно развитых странах применяются более прогрессивные, преимущественно без хлорные технологические решения (озонирование, обработка воды, ульт-

рафіолетовим облученням, активированим углем). На Україні по-прежнему, содержание хлороорганики не входит в основные показатели стандарта на питьевую воду. Городская водопроводная и канализационная сеть г. Бердянска уже длительное время эксплуатируется без профилактической и обновительной работы и находятся в неудовлетворительном состоянии, что объясняется крайне ограниченной финансовой возможностью коммунальных предприятий.

Несовершенная система расчета и распределения сборов за использование природных ресурсов усложняет процесс деятельности в природоохранной сфере. Это, в первую очередь, касается нормативов на выбросы загрязняющих веществ и экономического механизма, который бы стимулировал предприятия к реализации природоохранных мероприятий. Безоговорочное соблюдение природоохранного законодательства поможет снизить темпы ухудшения состояния окружающей среды и вывести показатели на более стабильный уровень, что поможет более эффективно регулировать и контролировать процесс стабилизации природной среды.

### Выводы

Все промышленные предприятия должны иметь проекты санитарно-защитных зон. В таких зонах вокруг предприятий не должно быть жилых кварталов. Площадь санитарной территории определяется характером производства, направлением ветра и другими факторами у ОАО «АЗМОЛ», ЗАО «Берти» такие проекты уже разработаны.

Настоятельно необходимо создание соответствующих экологических паспортов объектов природ-

но-заповедного фонда. В Бердянске к таким местам относятся: оголовки Бердянской косы, Макаргы. Заторы реки Берды при одновременном расширении природно-заповедного фонда.

Азовское море по существу является мелководным полузамкнутым заливом Черного моря, подверженным значительной антропогенной нагрузке. В водообмене между Азовским и Черным морями, который осуществляется через Керченский пролив, в среднем преобладает поток из Азовского моря. Поэтому, для характеристики загрязнения Азово-Черноморского бассейна важно не только осуществлять мониторинг качества вод Азовского моря, но и оценивать вынос загрязняющих веществ через Керченский пролив.

Важным экономическим аспектом в сфере охраны окружающей природной среды являются сборы за использование природных ресурсов, которые поступают в соответствующие экофонды.

### Список литературы

1. Лидеры Бердянска / П.А. Гончарук, М.А. Ванжа, В.И. Михайличенко, В.Н. Текуч. – Запорожье: Тандем-У, 2003. – 72 с.
2. Данные лабораторного контроля атмосферного воздуха, 2001-2008 гг. По данным Бердянской СЭС.
3. Данные лабораторного контроля морской воды, 2001-2008 гг. По данным Бердянской СЭС.
4. Данные лабораторного контроля грунта, 2001-2007 гг. По данным Бердянской СЭС.

*Рекомендовано до публікації д.б.н. А.І. Горвою 19.02.09*

УДК 338.45:622.333

О.О. Марченко

## ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ОБСЯГУ ВИДОБУТКУ ЗАЛИШКОВИХ ЗАПАСІВ ВУГІЛЛЯ НА ДОДАТОК ДО ПРОЕКТІВ ЛІКВІДАЦІЇ ШАХТ

Розглянуто теоретичні й практичні підходи до закриття вугільних шахт. Обґрунтовано критерій економічної ефективності видобутку залишкових запасів вугілля.

Рассмотрены теоретические и практические подходы к закрытию угольных шахт. Обоснован критерий экономической эффективности извлечения остаточных запасов угля.

Theoretical and practical approaches to closing of coal mines are considered. The criterion of economic efficiency of extraction of remaining supplies of coal is grounded.

У процесі реструктуризації вугільної галузі відповідно до рекомендацій експертів Світового банку всі шахти України були розділені на три групи: до першої групи були віднесені стабільно працюючі підприємства з достатньо великими обсягами запасів вугілля; до другої – шахти з достатніми для подальшої роботи за-

пасами вугілля та можливістю ефективно працювати при відповідній підтримці держави; у третю групу було включено шахти, на яких відпрацювання запасів вугілля велося у вельми складних гірничо-геологічних умовах, і техніко-економічні показники роботи були незадовільними, а також шахти з незначними залиш-

ковими запасами в межах відведених гірничих відводів. Саме шахти третьої групи в подальшому було включено в перелік шахт до закриття.

Окрім шахт третьої групи з незначними залишковими запасами, перш за все практичний інтерес викликають ті вугільні підприємства, в межах відведених гірничих відводів яких запаси корисних копалин склали більше 10 млн. т: шахти ім. Абакумова, «Бутівка-Донецька», «Жовтневий рудник», ім. Чапаєва, ім. Челюскінців та ін. [1].

За даних умов проектні інститути «Дніпродіпрошахт», «Дондіпрошахт» в першому випадку виконують проект закриття шахт, що мають незначні залишкові запаси в межах гірничих відводів, а у другому випадку – для шахт із більшими обсягами запасів вугілля – виконують техніко-економічне обґрунтування (ТЕО) доцільності їх подальшої роботи. У таких проектах розглядається декілька варіантів подальшої роботи шахти, а в тому випадку, коли кожен з варіантів вважається економічно недоцільним – виконується техніко-економічне обґрунтування закриття шахти.

Таким чином, навіть відносно значні залишкові запаси вугілля не планують видобувати й надалі вважають їх втратами. Це пояснюється тим, що при обґрунтуванні аналізованих варіантів не визначаються межі економічної доцільності повноти відпрацювання залишкових запасів, що набуває особливого значення за умов світової економічної кризи та у вугільній галузі України зокрема.

У кризових умовах деякі шахти, з дозволу Мінвуглепрому, продовжують виконання робіт з подальшого відпрацювання залишкових запасів, причому, часто не у відповідності до затвердженого порядку робіт в ТЕО для певної шахти. Таке положення призводить до значного збільшення термінів роботи шахт й істотного удорожчання собівартості видобутку вугілля порівняно з розрахунковою собівартістю в ТЕО.

Вирішення означеної проблеми розпочате в публікаціях автора [2-4]. Постановкою завдання в дійсній роботі є економічне обґрунтування обсягів видобутку залишкових запасів вугілля в межах економічної доцільності при розробці проекту ліквідації шахти.

Як зазначено вище, у проекті ліквідації шахти спочатку розглядаються варіанти подальшого доопрацювання шахтного поля. Як приклад, наведемо найстарішу шахту «Кочегарка» виробничого об'єднання (ВО) «Артемвугілля» (була введена в експлуатацію в 1868 р.), для якої ДВАТ інститутом «Дніпродіпрошахт» було здійснено ТЕО доцільності подальшої роботи, а пізніше – розроблено проект ліквідації. На час проектного рішення на шахті відпрацьовували запаси вугілля марки КЖ на 22 крутопадаючих пластах горизонту 1080 м. Промислові запаси на горизонтах 1080 і 1190 м склали відповідно 5,6 і 9,1 млн. т вугілля.

Основні варіанти продовження роботи шахти були виконані на основі комп'ютерної програми відпрацювання запасів вугілля Центрального району Донбасу. Граничним для відпрацювання запасів був при-

йнятий гор. 1190 м. Виходячи з цього був визначений перший варіант подальшої роботи шахти – відпрацювання запасів на гор. 1080 і 1190 м з подальшим закриттям шахти. На час розробки проекту шахта відпрацьовувала запаси 5,6 млн. т на гор. 1080 м. Для розкриття й підготовки горизонту 1190 м були потрібні великі капіталовкладення (6922 млрд. крб. на 1995 р.), у зв'язку з чим було розглянуто другий варіант – відробку запасів на гор. 1080 м із подальшим закриттям шахти.

Видобуток вугілля на шахті проводився на великій глибині в складних гірничо-геологічних та кліматичних умовах з великою часткою ручної праці. Виходячи з цього, розглянуто було третій варіант – припинення експлуатації шахти з 1996 р.

Економічна оцінка трьох варіантів і розгляд можливості покриття потреби держави у коксівному вугіллі шляхом купівлі вугілля за кордоном або шляхом будівництва нових шахт, показали недоцільність подальшої експлуатації даної шахти.

Методика економічної оцінки наведених варіантів містить наступні основні положення. Як критерій оцінки доцільності подальшої роботи шахти прийнято мінімальну вартість товарної продукції за розрахунковий період з урахуванням компенсуючих витрат. Тривалість розрахункового періоду прийнята рівною терміну відпрацювання запасів на горизонтах 1080 і 1190 м (за варіантом 1-29 років). Обсяг видобутку за розрахунковий період по варіантах неоднаковий.

Для зіставності варіантів за обсягом видобутку, по варіантах із втратою обсягів видобутку додано витрати на його компенсацію, за розрахунковий період у світових цінах на коксівне вугілля. Для зіставності за якістю вугілля зі світовими цінами, розрахункові ціни на вугілля по варіантах визначені з урахуванням їх збагачення на ЦЗФ, бо після збагачення якість концентрату відповідає світовому рівню.

Економічна доцільність продовження роботи шахти визначається попитом на її продукцію і конкурентоспроможністю цієї продукції на ринку. Як критерій абсолютної економічної оцінки варіантів прийнятий рівень світової ціни на коксівне вугілля, який є верхньою межею конкурентоспроможності підприємства. Якщо розрахункова ціна по прийнятому варіанту перевершує цю межу, то ставиться питання про закриття шахти як такої, що має низький рівень техніко-економічних показників. Питання про закриття шахти ставиться у всіх розглядуваних варіантах, різниця полягає тільки в термінах закриття.

Проект ліквідації ш. «Кочегарка» було розроблено й затверджено в 1995 р. на підставі наказу Мінвуглепрому України №60 від 20.02.1997 р. і технічного завдання на розробку проекту ліквідації шахти.

Перший етап за проектом – підготовка шахти до ліквідації. На цьому етапі виконуються роботи з проведення водовідливу, підйому та вентиляції шахти для роботи в режимі сухої консервації. Вартість цих робіт – 7,8 млн. грн (у цінах 1997 р.) До цього етапу також були включені витрати, пов'язані зі скорочен-

ням трудящих – 12,5 млн. грн, утриманням соціальної сфери – 0,2 млн. грн і додаткові витрати, пов'язані з ліквідацією шахти (заборгованість по одноразових регресних виплатах, електроенергії іншим кредиторам, регресних позовах і ін.) – 20,4 млн. грн. Тривалість першого етапу 5 міс.

На другому етапі ліквідації шахту передано компанії «Укрвуглереструктуризація», яка проводила засіпку стовбурів, розбирання будівель і споруд на промайданчику. Вартість витрат по другому етапу склала 72,8 млн. грн, тривалість його 28 міс.

На третьому етапі проводяться роботи з гасіння і рекультивациі стовбурів, ставка-відстійника, спостереження за зміною гідрогеологічного становища після ліквідації, спостереження за виділенням метану, ремонт будівель і споруд в зоні впливу гірничих робіт. Вартість витрат по третьому етапу склала 79,5 млн. грн, тривалість 22 міс. Загальна вартість за проектом ліквідації шахти 193,1 млн. грн.

Таким чином, шахту «Кочегарка» було ліквідовано, а залишкові запаси вугілля в межах її гірничого відводу можна вважати втратами, оскільки при проведенні ТЕО не були обгрунтовані межі економічної доцільності повноти виймання цих запасів.

У зв'язку з тим, що такої методики до розробки проектів ліквідації шахт не існувало, то залишкові запаси інших закритих шахт не були відпрацьовані на момент закриття. Хоча, як показала практика, частина цих запасів була надалі відпрацьована, що підтверджується фактами, наведеними в роботах [3, 4].

Враховуючи наукову і практичну цінність методики визначення меж економічної доцільності повноти виймання запасів вугілля (на шахтах з малими залишковими запасами), таку методику було розроблено в Національному гірничому університеті. Сутність, практичне значення даної методики та результати економіко-математичного моделювання викладено в роботах [5-8].

Як критерій для вибору найбільш доцільного варіанта виймання запасів прийнятий мінімум витрат з розрахунку на 1 т запасів, які видобувають, враховують витрати власне на видобуток вугілля, на закриття шахти з урахуванням чинника часу, на компенсацію вибуваючої потужності, втрати диференціальної ренти у зв'язку з неповним вийманням запасів вугілля із варіюванням повноти виймання запасів.

В умовах діючої шахти запаси корисних копалин, що залишилися, не можуть бути яким-небудь шляхом використані і є втратами. Запаси мають певну цінність, залежну від їх якості й гірничо-геологічних умов, але не мають вартості та ціни. У даній роботі ми приймаємо, що цінність запасів корисних копалин визначається диференціальною рентою, яка була б отримана, хоча й в прихованій формі при їх відпрацюванні та буде втрачена в результаті неповного витягу запасів.

Витрати на закриття шахти і втрати диференціальної ренти як чинники діють у напрямі максимального повного виймання запасів, оскільки при цьому віддаляється в часі закриття шахти. Їм протистоїть зростання собівартості видобутку вугілля, оскільки

найчастіше доводиться відпрацьовувати залишкові запаси в складніших гірничо-геологічних умовах.

Залишкові запаси доцільно відпрацьовувати, якщо собівартість їх видобутку не перевищить певної граничної величини. Розрахунки показали, що за таку граничну величину доцільно прийняти подвоєну середньогалузеву собівартість видобутку.

Аналізуючи зміст проекту ліквідації ш. «Кочегарка», можна зробити висновок про те, що необхідно було завершити роботи з подальшого будівництва гор. 1190 м, не залучаючи додаткових фінансових ресурсів. Залишкові запаси вугілля на гор. 1080 м можна було б виймати, обгрунтувавши межі економічної доцільності повноти їх видобутку за вищеприписаною методикою НГУ.

Таким чином, виймання залишкових запасів при ліквідації шахти може бути більш повним при використанні методики НГУ проектними інститутами при розробці проектів ТЕО продовження роботи і ліквідації шахт.

### Список літератури

1. Стратегія і тактика оздоровлення вугільної промисловості України (ексклюзивне інтерв'ю з О. Клименком для журналу „Схід”) // Схід. – 2006. – № 1(73). – С. 3-4.
2. Марченко О.О. Економічно доцільне вилучення малих залишкових запасів як обов'язкова умова подальшого розвитку вугільної галузі // Економічна організація та економічна освіта: взаємообумовленість стратегій розвитку: Зб. матер. міжнар. наук.-практич. конф. – К: КНЕУ, 2007. – С. 309-311.
3. Марченко О.О. Економічне обгрунтування доцільності закриття шахт // Механізм регулювання економіки. – Суми: ВТД «Університетська книга», 2007. – № 1.– С. 182-189.
4. Пономаренко П.І., Марченко О.О. Економічна доцільність відробітку залишкових запасів вугілля на шахтах // Теорія і практика сучасної економіки: Матер. міжнар. наук.-практич. конф. – Черкаси: Черкаський держ. технологіч. ун-т, 2007. – С. 376-377.
5. Радченко В.В., Марченко Е.А. Извлечение угля на шахтах с малыми остаточными запасами // Уголь Украины. – 2006. – № 7. – С. 6-8.
6. Марченко О. Економіко-математична модель виймання запасів вугілля на шахтах з малими залишковими запасами // Схід. – 2006. – № 6 (78). – С. 48-52.
7. Марченко О.О. Результати економіко-математичного моделювання економічної доцільності повноти витягу залишкових запасів вугілля // Економічний вісник Національного гірничого університету. – 2006. – № 4. – С. 22-29.
8. Пономаренко П.І., Марченко О.О. Удосконалення методики техніко-економічного обгрунтування доцільності подальшої роботи шахт // Матер. міжнар. наук.-практич. конф. „Проблеми економіки: освіта, теорія, практика”. – Кривий Ріг: Мінерал, 2008. – С. 31-32.

*Рекомендовано до публікації д.е.н. Т.Б. Решетіловою 31.03.09*

- Алексєєв Михайло Олександрович завідувач кафедри ПЗКС НГУ, професор, к.т.н.  
 Безрукавая Вікторія Анатоліївна асистентка кафедри технології гірничого машинобудування НГУ  
 Бондаренко Андрій Олексійович доцент кафедри гірничих машин та інжинірингу НГУ, к.т.н.  
 Воропаєва З.В. провідний спеціаліст ВАТ «НТР Проблем екології і природокористування» (м. Миколаїв)  
 Ганкевич Валентин Феодосійович доцент кафедри гірничих машин та інжинірингу НГУ, к.т.н.  
 Гречищева Дар'я Володимирівна студентка НГУ  
 Гук  
 Дідик Ростислав Петрович завідувач кафедри технології гірничого машинобудування НГУ, професор, д.т.н.  
 Довбніч Михайло Михайлович доцент кафедри геофізики НГУ, к.г.н.  
 Євтехова Анна Валеріївна доцент кафедри прикладної екології, мінералогії і раціонального використання надр Криворізького технічного університету, к.г.н.  
 Євтехов Валерій Дмитрович завідувач кафедри прикладної екології, мінералогії і раціонального використання надр КТУ, професор, д.г.-м.н.  
 Жуков Сергій Олександрович завідувач кафедри будівельних конструкцій КТУ, професор, д.т.н.  
 Зайцев Денис Юрійович студент НГУ  
 Ішков Валерій Валерійович завідувач кафедри мінералогії та петрографії НГУ, к.г.-м.н.  
 Кагадій Тетяна Станіславівна професор кафедри вищої математики НГУ, д.фіз.-мат.н.  
 Карпенко Світлана Валеріївна аспірантка Криворізького технічного університету  
 Кігель Анатолій Геннадійович аспірант НГУ  
 Колесник Валерій Євгенович професор кафедри екології НГУ, д.т.н.  
 Кононенко Анатолій Петрович професор ДонНТУ, д.т.н.  
 Корнієнко Валерій Іванович докторант кафедри електроніки і обчислювальної техніки НГУ, к.т.н.  
 Коцупей Анатолій Микитович старший викладач Жовтоводського гірничого технікуму  
 Литвин Наталя Сергіївна студентка НГУ  
 Лозовий Андрій Леонідович доцент кафедри геофізичних методів розвідки НГУ, к.г.-м.н.  
 Лопатіна Олена Сергіївна аспірантка кафедри менеджменту НГУ  
 Манок Володимир Васильович доцент кафедри геології та гідрогеології ДНУ ім. О. Гончара, к.г.-м.н.  
 Марченко Олена Олексіївна Асистентка кафедри економіки підприємства НГУ  
 Надутий Володимир Петрович завідувач відділу ІГТМ ім. Н.С. Полякова НАН України, професор, д.т.н.  
 Остапенко Віктор Олександрович професор ДНУ ім. О. Гончара, д.т.н.  
 Паршин  
 Пацьора Сергій В'ячеславович аспірант кафедри ВГР НГУ  
 Пігулевський Петро Гнатович доцент кафедри геофізичних методів розвідки НГУ, к.г.н.  
 Пікареня  
 Полторац Андрій Сергійович студент НГУ  
 Пономаренко Григорій Іванович Головний гірничий інженер ВАТ "Зелений гай"  
 Приходченко Василь Федорович декан геологорозвідувального факультету НГУ, професор, д.г.н.  
 Радчук Дмитро Ігорович аспірант кафедри аерології та охорони праці НГУ  
 Рачковський Віталій Петрович аспірант Національного університету водного господарства та природокористування (м. Рівне)  
 Редько Андрій Олександрович доцент Харківського державного технічного університету будівництва і архітектури  
 Рудаков Дмитро Вікторович доцент кафедри гідрогеології та інженерної геології НГУ, д.т.н.  
 Саллі Володимир Ілліч завідувач кафедри менеджменту НГУ, професор, д.т.н.  
 Симоненко Володимир Іванович професор кафедри ВГР НГУ, д.т.н.  
 Скриль Дарина Юріївна студентка НГУ  
 Солдатенко Валерій Петрович доцент кафедри геофізики НГУ, к.г.н.  
 Сухарев Віталій Віталійович молодший науковий співробітник ІГТМ ім. Н.С. Полякова НАН України  
 Титов Олександр Олександрович доцент кафедри гірничих машин та інжинірингу НГУ, к.т.н.  
 Третьякова Лариса Дмитрівна доцент кафедри безпеки життєдіяльності та охорони праці Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут", к.т.н.  
 Харін Сергій Анатолійович доцент кафедри менеджменту Криворізького економічного інституту КНЕУ, к.т.н.  
 Харченко  
 Чеберячко Сергій Іванович доцент кафедри аерології та охорони праці НГУ, к.т.н.  
 Швець Володимир Юрійович провідний науковий співробітник Центру з проблем підричних робіт НДЧ, к.т.н.  
 Шевцова Ольга Сергіївна асистентка кафедри ПЗКС НГУ



---

## З М І С Т

|   |    |
|---|----|
| <b>Харин С.А.</b> Уровневый анализ темпов сооружения протяженных горизонтальных выработок в крепких породах .....   | 3  |
| <b>Рачковський В.П.</b> Спосіб розробки родовищ корисних копалин з використанням свердловин великого діаметру .....   | 6  |
| <b>Симоненко В.І., Пацьора С.В., Швець В.Ю., Воропасва З.В.</b> Екологічні проблеми розробки родовищ скельних будівельних матеріалів в районах, прилеглих до житлових забудов .....           | 12 |
| <b>Редько А.А., Кононенко А.П.</b> Повышение энергетической эффективности циркуляционных геотермальных систем .....   | 16 |
| <b>Колесник В.Є., Чеберячко С.І., Радчук Д.І., Литвин Н.С.</b> Оцінка достовірності експериментально визначених показників якості протипилових респіраторів .....                             | 23 |
| <b>Третьякова Л.Д.</b> Вибір та оцінка заходів підвищення надійності засобів індивідуального захисту .....  | 27 |
| <b>Лозовой А.Л., Приходченко В.Ф., Рудаков Д.В., Манюк В.В., Гречищева Д.В.</b> Двумерная электроразведка по методике электротомографии при изучении геологического строения о. Змеиный ..... | 32 |
| <b>Солдатенко В.П., Довбнич М.М., Пикареня Д.С.</b> Моделирование геофизических полей над зонами гидротермально-метасоматически измененных пород .....  | 38 |
| <b>Пигулевский П.И.</b> О методике интерпретации геофизических материалов на стадии поиска тел лампроитового и кимберлитового магматизма в Западном Приазовье .....                           | 44 |
| <b>Ишков В.В., Лозовой А.Л., Рудаков Д.В.</b> Основные результаты первых геолого-геофизических исследований участков Днепровских порогов .....  | 49 |
| <b>Карпенко С.В., Евтехов В.Д., Евтехова А.В.</b> Аутигенно-метаморфогенная минералого-геохимическая зональность продуктивной толщи Анновского месторождения (Криворожский бассейн) .....     | 54 |
| <b>Надутый В.П., Остапенко В.А., Сухарев В.В.</b> Анализ модельных представлений разрушения горных пород в барабанной внутривалковой мельнице .....   | 58 |
| <b>Дидык Р.П., Безрукавая В.А.</b> Модифицирование рабочих поверхностей деталей машин на пути преодоления трибологического барьера .....  | 64 |
| <b>Титов А.А., Ганкевич В.Ф., Коцупей А.Н.</b> Анализ вариантов взаимодействия системы колесо – вагонетка при наезде на стык рельсов .....  | 68 |
| <b>Кагадий Т.С., Зайцев Д.Ю., Полторац А.С.</b> Метод возмущений в задаче о волокнистом композите с трещиной .....  | 72 |
| <b>Паршин А.В., Жуков С.А., Харченко С.А., Гук А.Д.</b> Особенности сопротивления смятию элементов стальных конструкций армировки ствола, соединяемых болтами .....                           | 75 |
| <b>Бондаренко А.О., Пономаренко Г.І.</b> Застосування похилих грохотів при розробці родовищ нерудних пісків .....   | 78 |
| <b>Алексеев М.А., Кигель А.Г., Шевцова О.С.</b> Использование графического процессора при решении вычислительных задач .....  | 83 |
| <b>Корнієнко В.І., Скриль Д.Ю.</b> Ідентифікація нелінійних процесів по часових реалізаціях .....   | 87 |
| <b>Салли В.И., Лопатина Е.С.</b> Особенности техногенного эколого-экономического воздействия на окружающую среду в приморской зоне .....  | 93 |
| <b>Марченко О.О.</b> Економічне обґрунтування обсягу видобутку залишкових запасів вугілля на додаток до проектів ліквідації шахт .....  | 96 |
| Відомості про авторів .....   | 99 |