



## Використання пневматичної енергії для нормалізації мікроклімату в підземних камерах шахт з працюючим обладнанням

У статті наведено результати досліджень фактичного стану умов праці в підземних камерах шахт Кривбасу і ЗЗРК. Найбільш несприятливі мікрокліматичні умови утворюються у камерах водовідливу, де за одночасної роботи двох-трьох насосних установок потужністю 800 кВт кожна температура повітря сягає 36–38 °С, а швидкість його руху внаслідок відсутності ефективної вентиляції знаходиться в межах 0,2–0,3 м/с, що не відповідає нормативним вимогам.

З метою поліпшення умов праці обслуговуючого персоналу в камерах з працюючим обладнанням запропоновано спосіб охолодження повітря з використанням пневматичної енергії. Для його реалізації розроблено конструкцію охолоджувальної установки «Клімат». Застосування цієї установки у підземних камерах шахт дає можливість підтримувати температуру повітря на рівні 22–24 °С, швидкість його руху – в межах 0,5–2,5 м/с і відносну вологість – не більше 60–70 %. (Л. 4. Бібліогр.: 10 назв)

**Ключові слова:** мікроклімат, пневматична енергія, камери водовідливу, температура, швидкість руху повітря, відносна вологість, охолодження, вентиляційний струмінь, стиснене повітря, вихровий пристрій, нормалізація.

Article presents the results of researches of an actual state of working conditions in underground chambers of Krivbass and Zaporozhian iron-ore plant mines. The most adverse microclimatic conditions are formed in water outflow chambers where at simultaneous works of two-three pump installations with capacity of 800 kW each, air temperature reaches 36–38 °C, and the speed of its movement due to the lack of effective ventilation is within the limits of 0,2–0,3 m/s that doesn't conform to standard requirements.

For the purpose of improvement of working conditions of service personnel in chambers with the working equipment, the way of cooling of air with the use of pneumatic energy is suggested. The design of cooling installation «Klimat» is developed for its realization. Application of this installation in underground chambers of mines gives the chance to keep air temperature at the level of 22–24 °C, the speed of its movement within 0,5–2,5 m/s and relative humidity no more than 60–70 %.

**Key words:** microclimate, pneumatic energy, water outflow chambers, temperature, air movement speed, relative humidity, cooling, ventilating stream, compressed air, vortex device.

### Актуальність дослідження

Актуальність розв'язуваного завдання полягає у тому, що видобуток залізної руди на великих глибинах супроводжується ускладненням гірничо-геологічних умов і вентиляції гірничих виробок, зокрема підземних камер з працюючим обладнанням [1; 2]. Відсутність ефективного провітрювання і надлишки тепла, утворені роботою обладнання, формують у камерах несприятливий мікроклімат. Найбільш гостро ця проблема постає у камерах шахтного водовідливу, де за одночасної роботи двох-трьох насосних установок температура повітря сягає 36–38 °С, а швидкість його руху – на рівні 0,2–0,3 м/с, що не відповідає нормативним вимогам [3].

Зазвичай у камерах водовідливу розташовується 5–6 насосних установок, які є джерелами надходжень тепла – у кількості 160 кВт від роботи однієї одиниці обладнання. Видалення теплого повітря з камери водовідливу ускладнюється через відсутність спеціальних венти-

ляційних виробок і перепаду тисків на вході і виході з камери. Несприятливі мікрокліматичні умови в камерах водовідливу негативно позначаються на продуктивності та здоров'ї шахтарів [4].

Розв'язанню питання поліпшення теплових умов у гірничих виробках шахт присвячено праці провідних вітчизняних та зарубіжних учених, проте стосовно нормалізації мікроклімату в підземних камерах шахт з джерелами надходження тепла окремі дослідження майже не здійснювалися [5]. Натомість у працях наводяться рекомендації щодо дотримання нормативних вимог стосовно швидкості руху і температури повітря в підземних камерах. Отже, питання нормалізації мікроклімату підземних камер шахт із працюючим обладнанням є актуальним і потребує пошуку нових ефективних підходів до його розв'язання.

Метою дослідження є розробка комплексної енергозберігаючої технології нормалізації мі-

кроклімату і регулювання його параметрів у камерах шахт з працюючим обладнанням.

#### Викладення матеріалу та результатів дослідження

У світовій практиці нормалізації мікроклімату в шахтах окремої уваги заслуговує спосіб охолодження повітря льодом, який реалізується на шахтах ПАР шляхом застосування парокompресорних холодильних машин разом з льодогенераторами або двохступеневими вакуумними заморожувальними системами потужністю 2,5–5 МВт. Потім утворений лід транспортують вагонетками до робочих місць [6]. Обладнання, що застосовується для утворення льоду має високу вартість, і його придбання суттєво підвищує собівартість видобутої продукції, внаслідок чого рекомендувати його для умов залізничних, або вугільних шахт економічно недоцільно. Разом з цим практичний досвід Канади доводить, що спосіб охолодження повітря льодом можливо реалізувати шляхом його заморожування в спеціальних камерах, крізь які надходить повітря в шахту. Такий спосіб є економічним і простим, та разом із цим його застосування є доцільним у тих кліматичних районах, де низька температура спостерігається протягом тривалого часу, що дає можливість заготівлі великої кількості льоду.

Досвід поліпшення теплових умов у вугільних шахтах шляхом застосування пересувних шахтних кондиціонерів типу КПШ та холодильних установок виробництва ВАТ «Холодмаш» свідчить про те, що їх застосування не розв'язує повною мірою цю проблему. Придбання таких машин потребує значних матеріальних затрат, до того ж вони енергомісткі, що збільшує вартість утримання обладнання протягом його експлуатації. Застосування холодильної техніки у шахтах стримується їх великими габаритами, складною конструкцією та необхідністю спеціального обслуговування.

Деякі з відомих способів і засобів поліпшення теплових умов у гірничих виробках, незважаючи на їх економічність, простоту і доступність виготовлення, не можуть реалізовуватися в камерах з працюючим обладнанням. Так, робота електродвигунів унеможливує застосування в таких камерах способу охолодження повітря з використанням води, а використання вентиляторів місцевого провітрювання є ефективним лише за умови, що температура повітря не перевищує 30 °С [7; 8].

Відомо, що в процесі гірничого виробництва в глибоких шахтах широко застосовується енергія стисненого повітря, це обумовлюється високим рівнем надійності, безпеки в роботі та економічної доцільності [9]. Більшість технологіч-

них процесів: буріння шпурів та свердловин, їх заряджання; навантаження гірської маси у вагони; допоміжні роботи з кріплення, ремонту обладнання та ін. здійснюються з використанням пневматичної енергії. Разом із цим спостерігається тенденція до застосування гірничого обладнання з гідравлічним приводом, що зумовить в майбутньому вивільнення частини пневматичної енергії з технологічного циклу процесів підземної розробки.

Доцільність застосування пневматичної енергії в умовах глибоких шахт підтверджується ще й тим, що, окрім вищезазначених переваг, з'являється можливість її комплексного використання. Це стосується теплової енергії підвищеного (при виробництві) і зниженого (при споживанні) температурного потенціалу. Так, робота машин з пневматичним приводом супроводжується виділенням відпрацьованого стисненого повітря помітно нижчої температури порівняно з оточуючим повітрям. Таким чином доводиться доцільність застосування пневматичної енергії не лише для приводу машин і механізмів, але й для кондиціонування повітря в гірничих виробках, у тому числі і в підземних камерах різного призначення.

В основу розробки енергозберігаючого способу нормалізації мікроклімату в камерах з працюючим обладнанням покладено використання ефекту охолодження, що має місце під час розширення стисненого повітря. Використання вихрових труб дозволяє підсилити цей ефект, що було виявлено вперше французьким інженером Ж. Ж. Ранком у 1931 р., і широко використовується в сучасній інженерній практиці різних галузей промисловості [10]. Охолодження рудникового повітря з використанням енергії адіабатичного розширення стисненого повітря може ефективно застосовуватися для поліпшення теплових умов у камерах, коли температура повітря в них сягає 30 °С і вище.

Для вирішення завдання нормалізації мікроклімату в підземних камерах шахт з працюючим обладнанням, а саме забезпечення температури повітря, швидкості його руху і відносної вологості відповідно до вимог санітарно-гігієнічних норм було розроблено охолоджуючу установку «Клімат» (рис. 1). Основними її частинами є: вентилятор для створення необхідної швидкості та кількості повітря, що подається у камеру, та пневматично-вихровий пристрій, розроблений на базі конструкції вихрової труби Меркулова.

До цих основних частин додаються такі: вентиляційний трубопровід, глушник шуму та шибер для змінення кількості вентиляційного повітря.

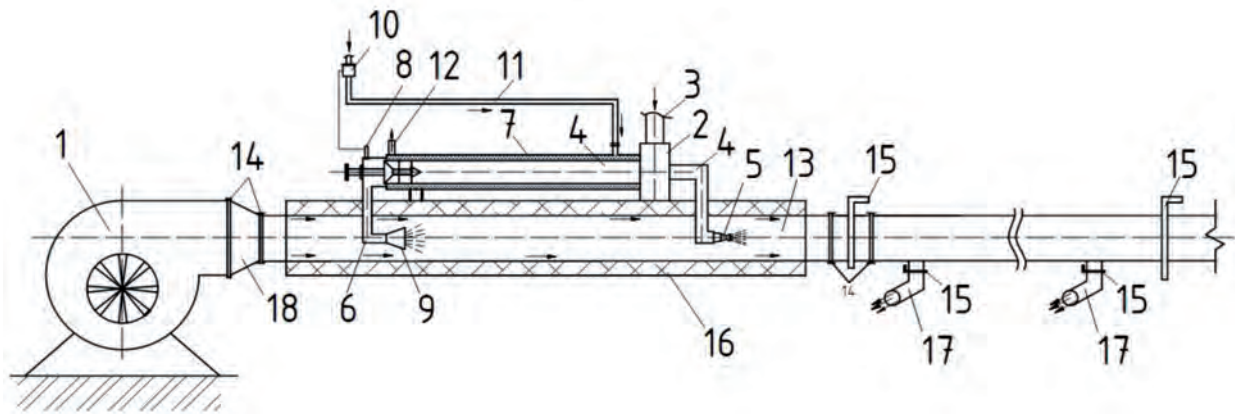


Рис. 1. Загальний вигляд охолоджувальної установки «Клімат»:

1 - від-центровий вентилятор; 2 - пневматичний вихровий пристрій; 3 - патрубок для підведення стисненого повітря; 4 - патрубок холодного повітря; 5 - сопло Лавалю; 6 - патрубок гарячого повітря; 7 - водяна охолоджувальна рубашка; 8 - датчик температури повітря; 9 - дифузор; 10 - електроклапан; 11 - гідравлічна система; 12 - зливний патрубок; 13 - вентиляційний трубопровід; 14 - фланцеве з'єднання; 15 - шибери кількісної регуляції повітря; 16 - абсорбційний глушник трубчастого типу; 17 - поворотні душируючі патрубки ПДП-100

Установка «Клімат» функціонує у двох режимах: провітрювання – за умови, що температура повітря в камері не перевищує 30 °С, і охолодження – якщо вона є вищою за 30 °С. Режим провітрювання реалізується таким чином. Вентиляційне повітря, що надходить у шахту повітроподаючим стволом, подається вентилятором 1 до глушника 16, з якого воно надходить у вентиляційний трубопровід 13, який обладнано шиберами 15 та поворотними душируючими патрубками 17.

Для зниження температури повітря в камері в режимі охолодження вмикається пневматично-вихровий пристрій 2, до якого патрубком 3 підводиться стиснене повітря із загальношахтної магістралі. Вихровий пристрій 2 розміщено ззовні глушника 16. Патрубки для виходу холодного і гарячого повітря 4 і 6 відповідно розташовані в середині глушника 16, їх вихідні сопла спрямовані супутно потокові вентиляційного повітря. З метою підвищення охолоджувальної та ежекційної здатності патрубків 4 обладнано соплом Лавалю, який утворює компактний струмінь холодного повітря. Гаряча складова стисненого повітря, охолоджена до температури вентиляційного повітря  $t_t \leq t_v$ , також подається крізь дифузор 9 у глушник 16.

Зниження температури гарячої складової стисненого повітря здійснюється за допомогою водяної рубашки 7, в яку надходить проточна вода з гідравлічної системи 11. При цьому температура повітря  $t_t$  на виході з патрубків 6 вихрового пристрою 2 є нижчою, або дорівнює температурі вентиляційного повітря  $t_v$ . Умова  $t_t \leq t_v$  контролюється за допомогою датчика температури повітря 8, який обладнано на патруб-

ку для виходу гарячого повітря 6. Якщо ця умова не підтримується, наприклад  $t_t \leq t_v$ , сигнал датчика 8 про перевищення температури повітря у патрубку 6 сприймається електричним клапаном 10, за допомогою якого збільшується кількість надходження проточної води в гідравлічну систему 11 водяної рубашки 7. При зниженні температури повітря у патрубку 6 до умов  $t_t \leq t_v$ , про що також сигналізує датчик 8, електричний клапан 10 зменшує подачу проточної води в гідравлічну систему 11. Охоложене повітря розсіюється у корпусі глушника 16 за допомогою дифузора 9, змішується з вентиляційним повітрям і додатково його охолоджує. Далі установка функціонує в нормальному режимі.

З метою дослідження робочих параметрів та ефективності охолодження здійснювалися експериментальні випробування установки «Клімат» в підземних умовах камери шахтного водовідливу гор. 475 м шахти ім. Артема шахтоуправління підземного видобутку руди ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» у період з 04.06.2015 р. по 04.07.2015 р.

У камері водовідливу з геометричними параметрами  $l = 38,7$ ;  $b = 4,6$ ;  $h = 4,2$  м розташовано шість насосів 8МС-7-10к потужністю електродвигуна 800 кВт кожний. Для відкачування притоку води, у середньому 400 м<sup>3</sup>/год, у камері одночасно працюють не більше 2 насосів. Кількість тепла, що виділяється одиницею працюючого обладнання, становить:  $q = N \cdot (1 - \eta) = 800 \cdot (1 - 0,8) = 160$  кВт, що призводить до зростання температури повітря у камері до 32–34 °С, а за одночасної роботи 2 насосів температура повітря сягає 36–37 °С, що значно перевищує 26 °С,

регламентовані Єдиними Правилами безпеки підземних робіт.

Випробування установки «Клімат» здійснювалися у денну зміну, коли у камері працював один насос, за таких мікрокліматичних умов: температура повітря у камері становила 28–34 °С, швидкість руху повітря – 0,2–0,3 м/с а вологість повітря була у межах 75–80 %.

Охолоджувальна установка «Клімат» випробовувалася у повному складі з відцентровим вентилятором ВЦ-4-70-№ 5, глушником, пневматичним вихровим пристроєм, шибером для регулювання кількості вентиляційного повітря і вентиляційним трубопроводом. Установка розміщувалася на вході у камеру водовідливу з можливістю підведення стисненого повітря та електроживлення вентилятора.

На підставі результатів досліджень установлено, що кількість гарячого повітря, отриманого у вихровій трубі, не перевищує в середньому 27 %. Враховуючи це, з метою спрощення конструкції установки «Клімат» було прийнято не використовувати охолодження водою вихідного патрубка гарячого повітря, натомість він був поміщений у термоізоляційний гумовий шланг. Таким чином, гаряче повітря відводилося від установки для обігріву приствольних камер очікування. Отже, під час експериментальних випробувань установки «Клімат» охолодна водяна рубашка не застосовувалася.

Температура, швидкість, кількість і вологість повітря визначалися на виході з вентиляційного

трубопроводу  $t_0$ ,  $V_0$ ,  $\varphi_0$  та на відстані 5–20 м у камері  $t_k$ ,  $V_k$ ,  $\varphi_k$ . Загальний вигляд установки «Клімат» під час випробувань у камері водовідливу шхти ім. Артема наведено на рис. 2.

Криві, отримані за результатами експериментальних досліджень, лідпорядковуються поліноміальному закону і мають високі коефіцієнти кореляції  $R^2 = 0,92–0,95$  (рис. 3).

Застосування установки «Клімат» дозволило досягти зниження температури повітря у камері, на відстані 10 м від вихідного отвору вентиляційної труби, до 18 °С, що ілюструють залежності (рис. 3). На графіках представлено залежності температури вентиляційного струменя від тиску стисненого повітря і кількості вентиляційного повітря  $Q_v$ . Таким чином, інтенсивне зниження температури повітря спостерігається за тиску 10–20 кПа, далі температура повітря знижується несуттєво, і за тиску 50–60 кПа вона знижується до 18 °С.

Ефективність охолодження повітря в камері з використанням установки «Клімат», яка визначається коефіцієнтом  $\eta$ , становить 0,35–0,54. Для визначення коефіцієнта ефективності охолодження  $\eta$  всього об'єму камери на довільній відстані від вихідного отвору трубопроводу отримано таку формулу:

$$\eta_t = \frac{LV^{-0.5} \Delta T_k M_\theta C_\theta n}{T_x M_x C_x} k, \quad (1)$$

де  $L = 5–34,9$  м – довжина розповсюдження охолодного струменя;  $V = 0,34–2,52$  м/с – швид-



Рис. 2. Випробування установки «Клімат» у камері водовідливу на гор. 475 м шахти ім. Артема ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»:

1 - відцентровий вентилятор ВЦ-4-70-№ 5; 2 - нагрівач вентиляційного повітря; 3 - пневматичний вихровий пристрій; 4 - глушник; 5 - вентиляційний трубопровід; 6 - шибер; 7 - манометр; 8 - шланг для підведення стисненого повітря; 9 - двигун насосної установки; 10 - насос 8МС-7-10к

кість руху повітря у струмені, має тенденцію до затухання зі збільшенням довжини розповсюдження;  $\Delta T_k = 11-14,8$  °C – різниця температури повітря у камері протягом випробувань;  $T_x = 0-11,8$  °C – температура охолодженого повітря на виході з установки;  $M_b = 7,4-12,14$  кг/с – масові витрати вентиляційного повітря з урахуванням ежекції оточуючого повітря в камері;  $M_x = 0,11-0,345$  кг/с – масові витрати холодного повітря;  $C_b = C_x = 1,005$  Дж/кгК – теплоємність холодного і вентиляційного повітря (постійна для температур  $T = 0-40$  °C);  $n = 0,2-0,6$  с<sup>-1</sup> – кратність повітрообміну в процесі випробувань;  $k = 0,01-0,015$  – коефіцієнт захаращення камери обладнанням установки «Клімат».

Результати розрахунків, здійснених за формулою (1), наведено на (рис. 4, крива 2).

Графіки свідчать, що залежності, які описують ефективність охолодження повітря в камері, отримані за результатами експериментальних досліджень і за розрахунками, здійсненими за формулою (1), є близькими. Отримані коефіцієнти кореляції  $R^2 = 0,95-0,97$  засвідчують достовірність результатів і адекватність їх апроксимації.

**Висновки**

1. На підставі результатів досліджень фактичного стану умов праці в підземних камерах в шахтах Кривбасу і ЗЗРК, встановлено, що найбільш несприятливими мікрокліматичними умовами відрізняються камери водовідливу. За одночасної роботи двох-трьох насосних установок потужністю 800 кВт кожна температура повітря в камері сягає 36–38 °C, а швидкість його руху внаслідок неефективного провітрювання знаходиться в межах 0,2–0,3 м/с, що не відповідає нормативним вимогам.

2. Доведено можливість ефективного застосування пневматичної енергії не лише для приводу машин і механізмів, але й для кондиціонування повітря в гірничих виробках за рахунок використання ефекту охолодження, що має місце під час адиабатичного розширення стисненого повітря в процесі пневматичного обладнання.

3. Запропоновано спосіб охолодження рудникового повітря з використанням енергії адиабатичного розширення стисненого повітря, для реалізації якого розроблено конструкцію охолоджувальної установки «Клімат».

4. Експериментально встановлено робочі параметри установки «Клімат» і ефективність охолодження повітря в камері з її використанням, яка визначається коефіцієнтом  $\eta$  і становить 0,35–0,54.

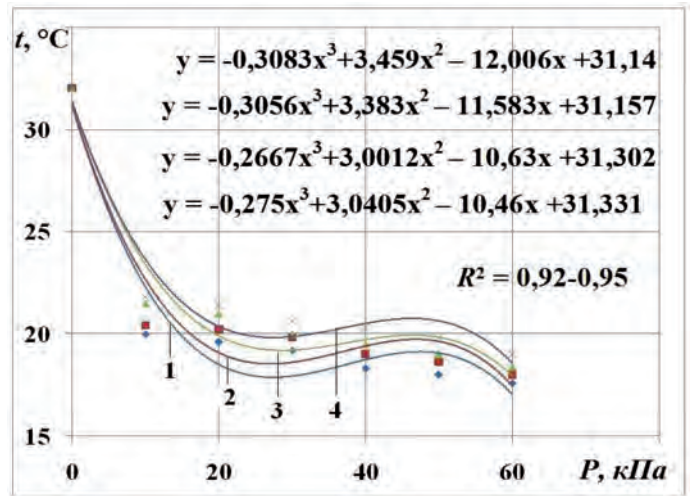


Рис. 3. Залежність температури вентиляційного струменя від тиску стисненого повітря, кількості вентиляційного повітря  $Q_v$  на відстані 10 м від вихідного отвору вентиляційної труби:  
1 –  $Q_{v1} = 0,075$ ; 2 –  $Q_{v2} = 0,146$ ;  
3 –  $Q_{v3} = 0,197$ ; 4 –  $Q_{v4} = 0,235$

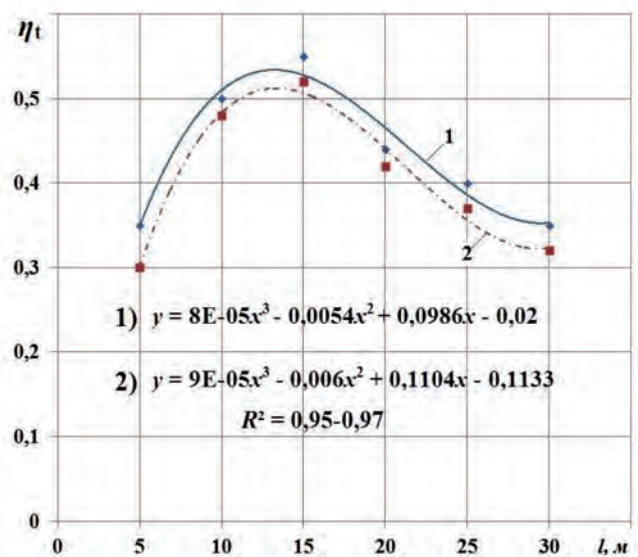


Рис. 4. Графіки залежності величини коефіцієнта ефективності охолодження повітря  $\eta$  в підземній камері водовідливу за тиску стисненого повітря  $P = 50$  кПа від далекобійності  $l$  холодного струменя:  
1 – за експериментальними даними;  
2 – за розрахунками

## Бібліографічний список

1. Ступнік М. І. Комбіновані способи подальшої розробки залізрудних родовищ Криворізького басейну / М. І. Ступнік, С. В. Письменний // Вісник Криворізького національного університету. - 2012. - Вип. 95 (1). - С. 3-7.
2. Лапшин А. А. Промышленные исследования микроклимата и состояния проветривания горных выработок в глубоких рудных шахтах / А. А. Лапшин // Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'. - 2014. - № 1. - С. 76-79.
3. Единые правила безопасности при разработке рудных, нерудных и рассыпных месторождений подземным способом. - М.: Недра, 1977. - 225 с.
4. Лапшин О. Є. Дослідження повітрообміну в камеро подібних виробках з великими теплопритоками / О. Є. Лапшин, А. А. Немченко, В. А. Коновалюк, Д. О. Лапшина // Вісник криворізького національного університету. - 2013. - Вип. 34. - С. 235-238.
5. Алексеенко С. А. Классификация способов и средств регулирования теплового режима шахт / С. А. Алексеенко, И. А. Шайхлисламова // Сталий розвиток і штучний холод. - 2012. - С. 501-505.
6. Fatima Gabru. Safe, deep level mining at record-breaking levels [Electronic resource] / Gabru Fatima // Mining Weekly. - 2009. - Available at: <http://www.miningweekly.com/article/safe-deep-level-mining-at-record-breaking-levels-2009-04-03>
7. Ratner G. Underground auxiliary ventilation monitoring and diagnostic system / G. Ratner, S. Viviers / The Australian Mine Ventilation Conference. - 2013. - P. 57-62.
8. Ramesh Ch. Refrigeration and air conditioning / Ramesh Chandra Arora. - Delhi: PHI Learning Private Limited, 2010. - 818 p.
9. Герасименко Г. П. Комплексное использование пневматической энергии при отработке глубоких месторождений / Г. П. Герасименко. - М.: Недра, 1971. - С. 7-16.
10. Пиралишвили Ш. А. Вихревой эффект. Физическое явление, эксперимент, теоретическое моделирование / Ш. А. Пиралишвили. - М.: Научтехлитиздат, 2013. - 342 с.

**Поступила 07.04.2016**

