УДК 622.413.3

РЕГУЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ УСЛОВИЙ В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ ГЛУБОКИХ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ ШАХТ

***А. А. Лапшин, канд. техн. наук* (*Криворожское горнопромышленное территориальное управление Госгорпромнадзора Украины*)**

Виконано аналіз умов праці в глибоких шахтах. Наведено дані про фактори, що впливають на підвищення температури повітря в гірничих виробках. Для нормалізації мікроклімату в виробках пропонуються ефективні способи регулювання теплового режиму.

Ключові слова: тепловий режим, мокре повітроохолодження, зрошувальна камера, теплообмінник.

Выполнен анализ условий труда в глубоких шахтах. Приведены данные о факторах, влияющих на повышение температуры воздуха в горных выработках. Для нормализации микроклимата в выработках предлагаются эффективные способы регулирования теплового режима.

Ключевые слова: тепловой режим, мокрое воздухоохлаждение, оросительная камера, теплообменник.

The analysis of labour conditions in deep mines is conducted. Information about factors that influence on the increase of air temperature of in the mine openings is resulted. The effective methods to regulate the thermal conditions in the mines to normalize microclimate are offered.

Key words: thermal conditions, moist air cooling, spray chamber,heat exchanger.

Проблема и ее связь с научными практическими задачами. С увеличением глубины разработки условия труда в железорудных шахтах ухудшаются в основном за счет повышения температуры воздуха в горных выработках. Как свидетельствует опыт работы шахт Кривбасса и Запорожья, температура воздуха на глубинах свыше 700 м в тупиковых выработках составляет 25…28 ºС. Согласно Правилам безопасности при разработке рудных месторождений подземным способом при температуре воздуха в горных выработках свыше 26 ºС должны приниматься специальные меры для ее снижения [1]. При таких обстоятельствах вопрос регулирования тепловых условий в горных выработках глубоких шахт является актуальным и требует своевременного решения.

Анализ исследований и публикаций. Анализ условий труда в глубоких железорудных шахтах показывает, что повышение температуры воздуха в горных выработках происходит вследствие нагревания воздуха от горных пород, работы машин с электрическим приводом, а также применения систем разработки с заполнением очистных камер твердеющей закладкой [2].

Тепловые условия являются одним из основных факторов, определяющих важную физиологическую функцию человека – терморегуляцию. В результате терморегуляции состояние теплового баланса организма может быть положительным, нулевым и отрицательным. В условиях повышенной температуры воздуха в горных выработках при недостаточной теплоотдаче имеет место положительный баланс теплоты, в результате которого может произойти перегрев организма. Такое состояние может наступить, если человек работает при температуре свыше 30 ºС и влажности воздуха 80…90 % и потеря влаги за смену приближается к 5 л. При этом трудоспособность снижается на 40 %.

Движение воздуха является важным фактором, способствующим созданию благоприятных условий труда в горных выработках. При повышенной температуре воздуха его движение способствует терморегуляции – улучшается освобождение организма от избытка теплоты.

Постановка задачи. Для обеспечения благоприятных условий труда горнорабочих температура воздуха в горных выработках шахт не должна превышать 26 ºС, а скорость его движения в очистных забоях при температуре до 20 ºС должна быть не менее 0,5 м/с [3].

Изложение материала. В глубоких шахтах температура воздуха в зоне очистных работ мало зависит от сезонных колебаний температуры атмосферного воздуха на поверхности шахты. Существенные сезонные колебания температуры имеют место лишь в главных воздухоподающих стволах, в рудничных дворах и воздухоподающих квершлагах. Так, с учетом процессов теплообмена среднегодовая температура воздуха в рудничных дворах на глубинах до 1000 м может быть определена по формуле [4]

$$t_{\text{н}} = t_{\text{нс}} + \Gamma\left(H + H_{\text{нс}}\right) - \Gamma_{\text{ст}} H\,, \qquad (1)$$

где $t_{\text{нс}}$ – температура пород в нейтральном слое, ºС; Γ = 0,01 ºС/м – геотермический градиент района месторождения полезного ископаемого; $\Gamma_{\text{ст}}$ = 0,002 ºС/м – температурный градиент для воздухоподающих стволов шахт Кривбасса; H – глубина горных работ; $H_{\text{нс}}$ – расстояние поверхности пород нейтрального слоя, м.

При глубине горных работ H = 1000 м и расстоянии поверхности пород нейтрального слоя $H_{\text{нс}}$ = 50 м для условий шахт Кривбасса температура воздуха в рудничном дворе $t_{\text{н}}$, рассчитанная по формуле (1), будет равняться 20…21 ºС. При поступлении воздуха в зону горных работ происходит его нагревание от горных пород (23…25 ºС), от работы электрических машин (2…5 ºС) и других факторов, что в результате составляет 25…28 ºС.

Для нормализации микроклиматических условий в горных выработках рекомендуется выполнить следующий комплекс мероприятий:

провести реконструкцию вентилирующих систем шахт с переходом на последовательную работу главных и подземных вентиляторных установок;

нормализацию микроклимата на рабочих местах проводить за счет повышения скорости движения воздуха в горных выработках;

использовать в качестве теплообменника камеры орошения, которые целесообразно размещать в воздухоподающих выработках, при этом понижать температуру подаваемого воздуха в зону горных работ до 17–18 ºС.

Рассмотрим каждое мероприятие непосредственно для условий шахт. Так, реконструкцию вентиляционной системы шахты «Эксплуатационная» ЗАО «КЖРК», представленную на рис. 1, предполагается осуществлять с использованием существующего всасывающего способа проветривания. Для увеличения количества воздуха, поступающего в зону горных работ, предусматривается использование грузовых стволов *1* и вспомогательного ствола *2*.

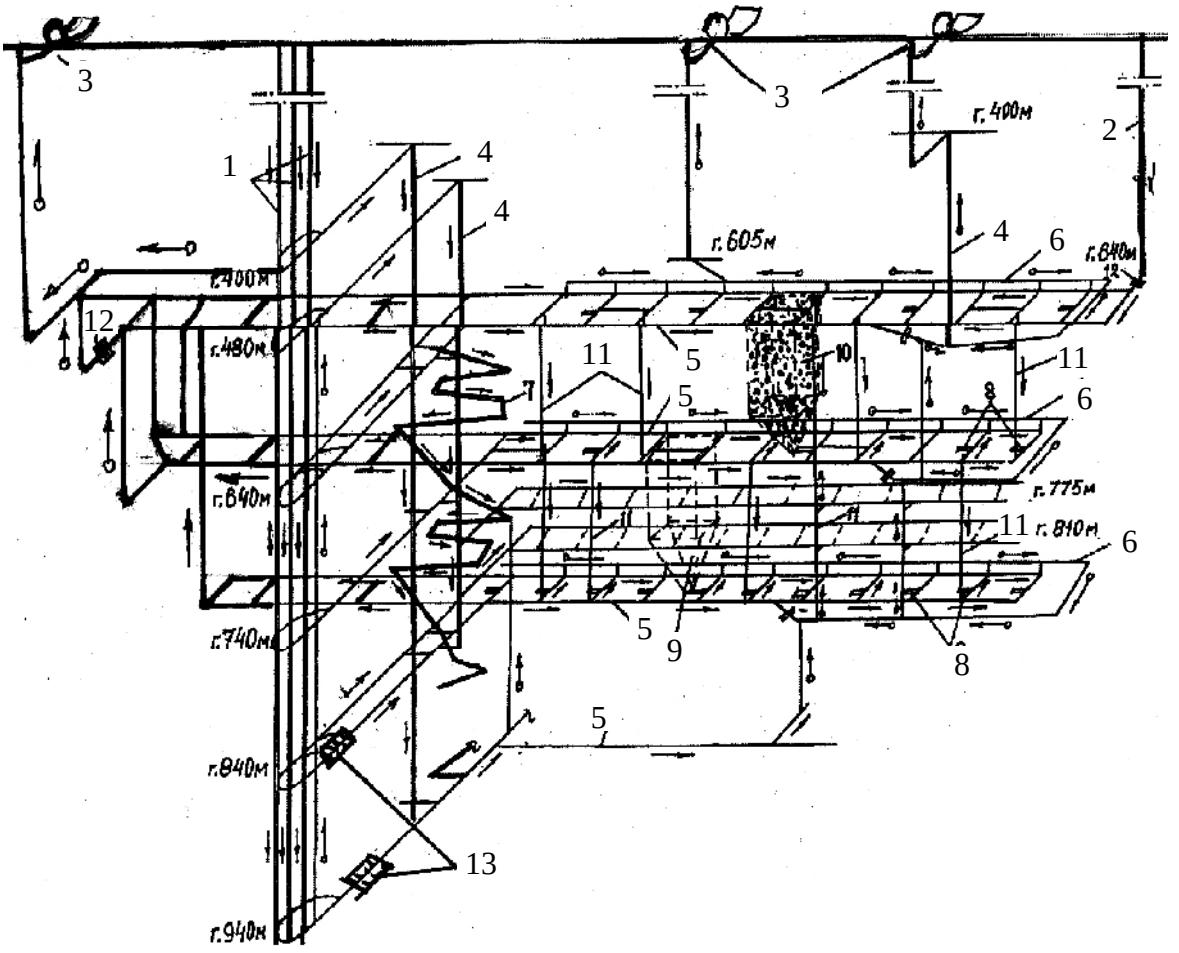

Рис. 1. Всасывающая схема вентиляции шахты «Эксплуатационная»: *1* – главные воздухоподающие стволы; *2* – ствол «Южный вентиляционный»; *3* – главные вентиляторные установки (ГВУ); *4* – «слепые» стволы; *5* – выработки основных рабочих этажей; *6* – коллекторы штреков; *7* – транспортный уклон; *8* – выработки вибровипуска; *9* – очистительная камера; *10* – отработанная камера; *11* – восходящие выработки; *12* – места расположения вспомогательных вентиляторов; *13* – оросительные теплообменники. → – свежий воздух; ○→ – загрязненный воздух

Повышение интенсивности проветривания нижних горизонтов 740, 840 и 940 м возможно за счет вспомогательных вентиляторов типа ВОКР-1,5,

ВЦД-1,6 в квершлагах гор. 640 стволов «Северный слепой» и «Южный вентиляционный» № 2. Это мероприятие позволяет также увеличить скорость воздуха в горных выработках, которая по тепловому фактору определяется по формуле [6]

$$V_t = K \cdot 0{,}02(t = 17)^2, \qquad (2)$$

где K – коэффициент, учитывающий вид забоя, K = 1 для действующих очистных забоев и погрузочных выработок, K = 0,3 для тупиковых нарезных, подготовительных и горнокапитальных выработок; t – расчетная или фактическая температура воздуха на рабочих местах, ºС.

Согласно формуле (2) значения эффективных скоростей воздушной струи при диапазоне температур t = 21…26 ºС должны находиться в пределах: для очистных забоев и погрузочных выработок – от 0,7 до 1,6 м/с; для нарезных, подготовительных и горнокапитальных выработок – от 0,3 до 0,5 м/с.

Охлаждение воздуха в камерах орошения (мокрое воздухоохлаждение) происходит в результате взаимодействия воды и воздуха (рис. 2). Состояние воздуха, поступающее в камеру, определяется следующими параметрами: теплосодержанием I_1, влагосодержанием d_1 и температурой t_1 [7]. При этом на каждый 1 кг сухой части орошаемого воздуха распыляется B кг воды с начальной температурой V_1, тогда начальное теплосодержание воздуха и воды будет равно

$$I_1 + BV_1. \qquad (3)$$

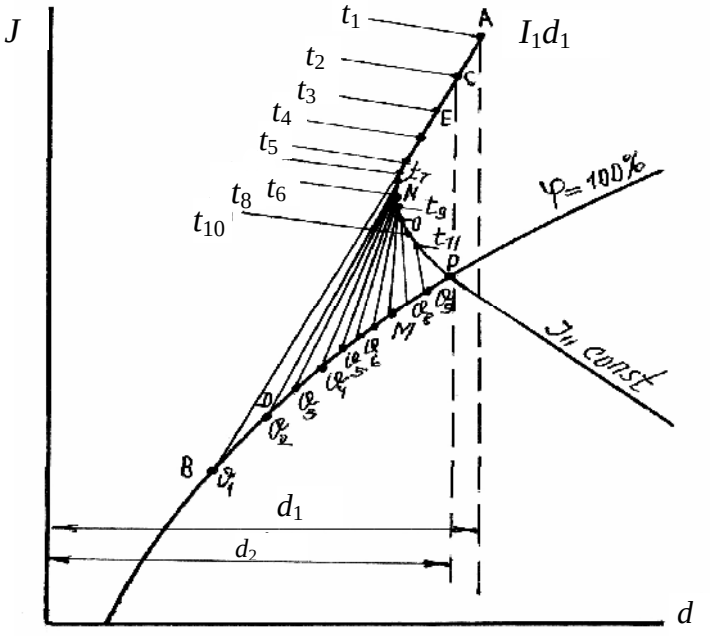

Рис. 2. Изменение параметров воды и воздуха при охлаждении воздуха в камере орошения

При соприкосновении части теплого воздуха с водой эта часть воздуха примет параметры начального состояния воды (точка *B* на рис. 2).

Далее воздух с параметрами *B* будет смешиваться с воздухом, еще не вошедшим в соприкосновение с водой.

При этом весь орошаемый воздух охладится на малую величину

$$t_1 - t_2 = 0{,}1(t_1 - V_1). \tag{4}$$

Проводим изотерму $t_2 = t_1 - 0{,}1(t_1 - V_1)$ и находим точку ее встречи с прямой AB, в результате получаем точку *C*, которой соответствуют остальные параметры I_2, d_2 воздуха второго состояния. В результате соприкосновения части теплого воздуха с холодной водой и его осушивания количество воды в камере увеличится на величину $d_1 - d_2$. Пусть после соприкосновения с частью теплого воздуха температура воды стала равной V_2, тогда теплосодержание воздуха второго состояния и подогретой воды

$$I_2 = \left(B + \frac{d_1 - d_2}{1000} \right) V_2 . \tag{5}$$

Если камера орошения на отдает и не получает тепло, то тепловой баланс с ней выразится равенством

$$I_1 + BV_1 = I_2 + \left(B + \frac{d_1 - d_2}{1000} \right) V_2 , \tag{6}$$

откуда

$$V_2 = \frac{I_1 - I_2 + BV_1}{B + \dfrac{d_1 - d_2}{1000}} . \tag{7}$$

Часть воздуха второго состояния входит в соприкосновение с водой, имеющей температуру V_2. При этом воздух снова охладится на величину

$$t_2 - t_3 = 0{,}1(t_2 - V_2). \tag{8}$$

Проводим изотерму $t_3 - t_2 = 0{,}1(t_2 - V_2)$ и находим точку *E* встречи ее с прямой *CD*. Тогда параметры точки *E* будут отвечать параметрам воздуха третьего состояния.

Температура воды, отвечающая третьему состоянию воздуха, определится из равенства

$$V_3 = \frac{I_2 - I_3 + BV_2}{B + \dfrac{d_2 - d_3}{1000}} . \tag{9}$$

В результате такого построения получим постепенное понижение температуры орошаемого воздуха и повышение температуры орошающей воды. Наконец, температура воды V_7 станет равной точке росы для орошаемого воздуха при его температуре t_7.

Как видно из предыдущего построения, только при температуре воды ниже температуры точки росы воздуха в его начальном состоянии в результате взаимодействия происходит уменьшение влагосодержания, или, иначе говоря, осушение воздуха. Когда температура воды становится равной температуре точки росы (точки *N* и *M*), то в этот момент парциальное давление водяных паров в воздухе становится равным парциальному давлению водяных паров распыляемой воды и процесс осушения заканчивается.

Поскольку в этом случае температура воздуха выше температуры воды, то в дальнейшем происходит охлаждение воздуха. В результате происходит понижение температуры воздуха и повышение температуры воды, а процесс пойдет по линии NO, при этом воздух начнет увлажняться. В дальнейшем наступит момент, когда температура воды V_{11} станет равной температуре мокрого термометра. В этом случае процесс до конца пойдет приблизительно по I_{11} = const до встречи с кривой α = 100 % (линии OP).

Процесс взаимодействия воды с воздухом зависит также от их весового соотношения. С увеличением этого соотношения параметры воздуха будут ближе к параметрам воды. В связи с этим, исходя из теплового баланса теплообменника (камеры орошения), температура воды на выходе будет равна

$$t_{\text{вых}} = \frac{G_{\text{п}} C_{\text{п}} \left(t_{\text{пвх}} - t_{\text{вых}}\right)}{G_{\text{в}} C_{\text{в}}} + t_{\text{ввх}}, \qquad (11)$$

где $G_{\text{п}}$,$G_{\text{в}}$ – массовые расходы воздуха и воды соответственно ($G_{\text{п}}$ = 72 кг/с; $G_{\text{в}}$ = 80 кг/с); $C_{\text{п}}$ и $C_{\text{в}}$ – теплоемкость воздуха и воды $C_{\text{п}}$ = 1 кДж/кг·°С, $C_{\text{в}}$ = 1,8 кДж/кг·°С); $t_{\text{пвх}}$ = 24 °С – температура воздуха на входе в камеру; $t_{\text{пвых}}$ – температура воздуха на выходе; $t_{\text{ввх}}$ = 14 °С – температура воды на входе в камеру.

Для условий орошения воздуха в камере температура воды на выходе из нее $t_{\text{пвых}}$, согласно формуле (11), равняется 17,5 °С, что обеспечивает надежный режим работы теплообменника. При этом температура воздуха снижается с 24 до 17,5 °С, что является удовлетворительным для условий горных выработок.

Для эффективного орошения и обеспыливания следует поддерживать как можно меньший диаметр капель, что достигается пневматическим разбрызгиванием воды. С уменьшением диаметра капель увеличивается площадь контакта с воздухом и вероятность коагуляции капель с пылью. Средний диаметр капель определяли путем отбирания проб на стекло, смазанное вазелином, а затем осуществляли анализ под микроскопом. Анализ результатов исследований свидетельствует о том, что средний диаметр капель зависит от давления воздуха в магистрали и от ширины (диаметра) выпускного отверстия пневмогидравлической

форсунки. Увеличение давления воздуха приводит к уменьшению среднего диаметра капель независимо от конструктивных параметров форсунки. Это свидетельствует о том, что увеличение давления в рабочем сопле форсунки способствует более мелкому диспергированию воды и созданию более насыщенной водовоздушной смеси. В экспериментах средний диаметр капель изменялся от 20 до 100 мкм. Такой размер капель способствует эффективному охлаждению воздуха и улавливанию мелкодисперсной пыли (менее 10 мкм), присутствующей в воздушных потоках, которые поступают по грузовым стволам.

Математическая обработка данных, полученных при испытаниях, позволила установить эмпирическую зависимость между конструктивными параметрами пневмогидравлической форсунки, давлением воздуха в трубопроводе P_p и средним диаметром капель разбрызгиваемой воды. Эта зависимость описывается формулой

$$d_{\text{ск}} = 100\sqrt{\frac{1}{P_p}\sqrt{270\ln b_{\text{о}} + 310/b_{\text{о}} - 294}}\ , \qquad (12)$$

где $d_{\text{ск}}$ – средний диаметр капель воды, мкм; $b_{\text{о}}$ – ширина выпускного отверстия фосунки, мм

Зависимость среднего диаметра капель от параметров форсунки приведена на рис. 3, из которого видно, что при ширине выпускного отверстия $b_{\text{о}}$ = 1…2 мм образуются капли размером $d_{\text{ск}}$ = 28…34 мкм, а их количество будет максимальным, то есть обеспечиваются условия для эффективного охлаждения и обеспыливания воздуха.

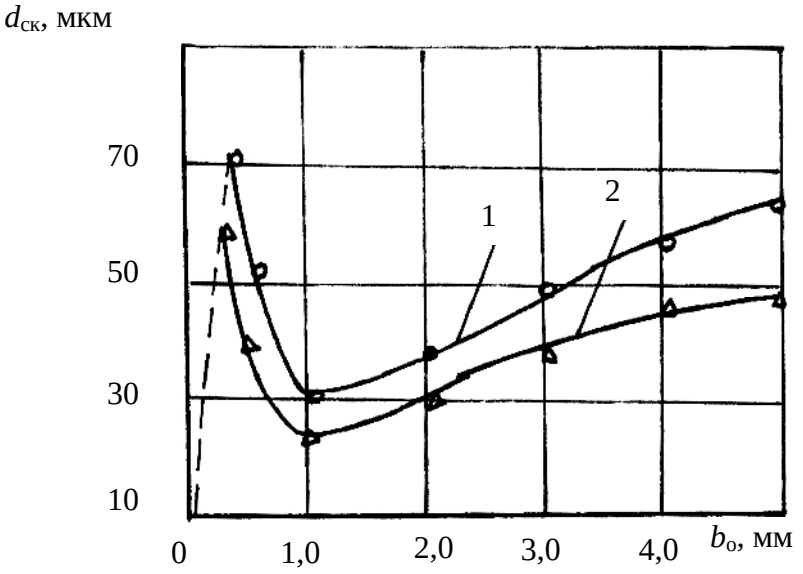

Рис. 3. Зависимости среднего диаметра капель от ширины выпускного отверстия для воды: *1* – P_p = 0,4 МПа; *2* – P_p = 0,6 МПа

Выводы

1. Для увеличения количества воздуха, подаваемого в шахту, целесообразно перевести все ГВУ на работу с полностью открытыми направляющими аппаратами, что позволит увеличить их общую производительность.

2. Для повышения интенсивности проветривания нижних горизонтов целесообразно установить вспомогательные вентиляторы типа ВОКР-1,5, ВЦП-16 или ВЦД-16 в воздухоподающих квершлагах.

3. Целесообразно увеличить поступление свежего воздуха по грузовым стволам, что разрешается ЕПБ при условии применения эффективных средств обеспыливания для снижения запыленности воздуха до 0,6 мг/м^3. Обеспыливание воздуха можно производить в камерах орошения, совмещая его с охлаждением воздуха распыленной водой.

4. Для проветривания подготовительных выработок при их проходке на нижележащих горизонтах необходимо применение нагнетательно-всасывающего способа проветривания.

5. При отработке более глубоких горизонтов как на шахтах Кривбасса, так и на шахте «Эксплуатационная» ЗЖРК возникает необходимость перехода на нагнетательно-всасывающий способ проветривания с заменой существующих ГВУ на новые установки типа ВЦД-40 или ВЦД-47А.

1. *Единые правила безопасности* при разработке рудных, нерудных и россыпных месторождений подземным способом. – М.: Недра, 1973. – 135 с.

2. *Лапшин О. Є* Нормалізація мікроклімату у виробках шахт із заповненням очисного простору твердіючою закладкою / О. Є. Лапшин, О. О. Лапшин // Вісник НТУУ „КПІ”. – Вип. 15. – К.: НТУУ „КПІ”. – 2007. – С. 123–128.

3. *Гурін А. О., Бересневич П. В., Немченко А. А.* та ін. Аерологія гірничих підприємств / [А. О. Гурін, П. В. Бересневич, А. А. Немченко та ін.]. – Видавничий центр КТУ. – Кривий Ріг, 2007. – С. 221–223.

4. *Борьба с пылью и вредными газами* в железорудных шахтах / [А. П. Янов, Ф. Г. Гагауз, И. Б. Ошмянский и др.] – М.: Недра, 1984. – 228 с.

5. *Лапшин О. Є., Ошмянський І. Б., Немченко А. А. та ін*. Заходи і засоби підвищення ефективності провітрювання і нормалізації мікроклімату в глибоких залізорудних шахтах // «Форум гірників». – Матер. міжнар. конф. – Національний гірничий університет. – Дніпропетровськ, 2007. – С. 253–257.

6. *Руководство по проектированию* вентиляции, расчету и контролю вентиляционных параметров проектируемых и действующих шахт // И. Б. Ошмянский, В. Л. Сахновский, В. М. Куроченко и др. – Кривой Рог. – КТУ. – 1991. – 137 с.

7. *Каменев П. Н.* Отопление и вентиляция. Часть II. Вентиляция. – Стройиздат. – М.: 1966. – С. 394–398.