

Резкое повышение как газоносности соляных пород, так и содержания компонентов в исследуемом газе в интервале расстояний 780-1040 м от контуров нефтяных месторождений может говорить о возможной субвертикальной миграции газов по зонам повышенной проницаемости от нефтеносных структур в породы соленосной толщи.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ковалев О.В., Ливенский В.С., Былино Л.В. Особенности безопасной разработки калийных месторождений. – Минск: Польша, 1982. – 96 с.: ил.
2. Андрейко С.С., Прушак В.Я., Щерба В.Я. Анализ геологических условий возникновения газодинамических явлений на Старобинском месторождении калийных солей // Горная механика. – 2002. – № 1. – С. 89-94.
3. Андрейко С.С., Иванов О.В., Щерба В.Я., Береснев С.П. Результаты исследования газоносности и компонентного состава газа в породах кровли // Горная механика. – 2004. – № 1-2. – С.3-7.
4. Барях А.А., Андрейко С.С., Федосеев А.К. Газодинамическое обрушение кровли при разработке месторождений солей // Записки Горного института. – 2020. – Т. 246. – С. 601-609. – DOI: 10.31897/PMI.2020.6.1.
5. Andreyko S.S., Lyalina T.A. Rockburst from floors // Soils and Rocks. – 2019. – V. 42, 1. – P. 77-82. – DOI: 10.28927/SR.421077.
6. Litvinovskaya N.A., Andreiko S.S. Modeling sudden failure of floor of underground excavations in undermined salt rock mass // Eurasian mining. – 2015. – № 2 (24). – P. 15-17.
7. Andreiko S.S. Statistical criteria and estimation results for regularities of gas-dynamic phenomenon distribution in potash deposits // Journal of Mining Science. – 2003. – V. 39, № 4. – P. 354-363.
8. Андрейко С.С., Лялина Т.А. Исследования газовыделений из геологоразведочных скважин на Верхнекамском месторождении калийных солей / Андрейко С.С., Лялина Т.А. // Изв. вузов. Горн. журн. – 2017. – № 2. – С. 33-38.
9. Галкин В.И., Мелкишев О.А., Варушкин С.В., Андрейко С.С., Лялина Т.А. Разработка статистической модели прогноза нефтегазоносности по газовыделениям в толще Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей // Вестн. ПНИПУ: Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2020. – Т. 20, № 1. – С. 4-13. – DOI: 10.15593/2224-9923/2020.1.1.
10. Бачурин Б. А., Борисов А. А. Газогеохимические методы контроля процессов техногенеза в геологической среде Верхнекамского месторождения / Б.А. Бачурин, А.А. Борисов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2011. – № 6. – С. 144-151.
11. Федосеев А.К. О вкладе рифогенных образований в формирование природно-ослабленных зон в соляной толще // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – № 4. – С. 141-145.
12. Кудряшов А.И. Верхнекамское месторождение солей. – 2-изд., перераб. – М.: Эпсилон Плюс, 2013. – 368 с.

УДК 622.4

DOI:10.7242/echo.2023.1.20

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СНИЖЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА В ТУПИКОВЫХ ЗАБОЯХ РУДНИКОВ НОРИЛЬСКОГО ПРОМЫШЛЕННОГО РАЙОНА ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДОЛЕДЯНОЙ СМЕСИ

М.О. Пересторонин

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: Согласно истории, охлаждение рудничного воздуха льдом применялось еще в 1860-х годах в шахтах США. Однако в 1902 году Уиллисом Кэррьером на основании открытий Майкла Фарадея в области сжатия и сжижения газов был разработан электрический способ кондиционирования воздуха. В результате, начиная с 1920-х годов, парокомпрессионные холодильные машины практически полностью вытеснили ледяное рудничное охлаждение. Тем

не менее, сегодня, в условиях мирового стремления к энергосбережению, важным является пересмотр имеющегося практического опыта с целью открытия новых возможностей некогда забытых технологий с учетом современных достижений в науке и технике. В настоящей статье представлены результаты оценки эффективности охлаждения воздуха льдом в тупиковых забоях рудников Норильского промышленного района. Рассмотрены две технологии водолеяного охлаждения: с размещением водолеяной смеси перед вентилятором местного проветривания и с размещением водолеяной смеси в проходческом забое. Выполнено сравнение водолеяного кондиционирования и кондиционирования с использованием холодильных машин. В результате исследования сделан вывод о том, что охлаждение воздуха на $20,5^{\circ}\text{C}$ (эквивалентная мощность электрического воздухоохлаждителя – 939 кВт) возможно при размещении водолеяной смеси перед вентилятором местного проветривания на участке выработки длиной 290 м. Внутрizaбойное охлаждение является неэффективным и позволяет снизить температуру воздуха не более, чем на $1,1^{\circ}\text{C}$. Для повышения рациональности водолеяного охлаждения необходимо использование технологий, увеличивающих площадь контакта воздуха со льдом, таких как мелкодисперсное водолеяное охлаждение или охлаждение закрепного пространства горной выработки.

Ключевые слова: рудник, тупиковый забой, микроклимат, теплообмен, возобновляемый источник энергии, охлаждение воздуха, водолеяная смесь.

Введение

На сегодняшний день интенсивность разработки месторождений полезных ископаемых продолжает возрастать. С учетом сокращения неглубоких запасов полезных ископаемых в отработку вводятся все более глубокие горизонты [1]. В связи с этим горнякам приходится иметь дело с увеличением температуры как пород, так и воздуха в подготовительных и очистных выработках [2, 3].

В целях борьбы с неблагоприятными последствиями высоких температур *Правила безопасности при ведении горных работ* [4] регламентируют допустимую температуру воздуха в забоях подготовительных и очистных выработок, которая не должна превышать $+26^{\circ}\text{C}$. При более высоких температурах воздуха должно предусматриваться его охлаждение.

Традиционно нормализация температуры воздуха в сложных теплотехнических условиях осуществляется за счет использования систем кондиционирования. Однако применение холодильных установок отличается существенным энергопотреблением, что значительно повышает себестоимость добычи [5]. В связи с этим актуальным является исследование альтернативных источников холода, не требующих высоких энергозатрат [6]. Одним из таких источников холода является лед.

Лед – это вещество, которое при правильном технологическом подходе способно не только охладить воздух, но и нагреть его. Так, например, в рудниках Канады нагрев воздуха зимой осуществляется при разбрызгивании теплой воды на вентиляционную струю в специальных камерах [7, 8]. В результате происходит образование льда, и воздух нагревается за счет тепла, выделяемого при замерзании. В летнее же время при прохождении через камеры, наполненные льдом, воздух охлаждается. При этом важным преимуществом использования льда для шахтного охлаждения в сравнении с водой является то, что лед, обладая высокой скрытой теплотой плавления (теплотой фазового перехода), позволяет поддерживать температуру водолеяной смеси на отметке 0°C до полного его таяния, в то время как вода нагревается на $2,4^{\circ}\text{C}$ каждые 1 000 м [9]. Данные особенности льда обуславливают его широкое использование в шахтах Канады и ЮАР: в шахтах Канады ввиду арктического и субарктического климата, благоприятного для генерирования льда [9], а в шахтах ЮАР ввиду сверхглубокой добычи ценных полезных ископаемых, где другие методы охлаждения являются нецелесообразными [10]. Здесь важно отметить, что охлаждение льдом считается достаточно рациональным

к использованию при глубине от 1 760 м [11]. Однако смещение мировых взглядов в сторону энергосбережения порождает исследования по оценке целесообразности охлаждения льдом на меньших глубинах – в шахтах Австралии [9, 12], Индии [13], Китая [14] и др.

Вышеизложенные факты наводят на мысль о том, что охлаждение воздуха льдом может оказаться рациональным и в российских шахтах, а именно – в рудниках Норильского промышленного района, поскольку в пределах данных рудников, располагаемых в районе субарктического климата, осуществляется добыча ценных полезных ископаемых (медь, никель, платина) на больших глубинах (до 2 км) с температурой пород до 40-50°C.

Таким образом, целью настоящего исследования является оценка эффективности водолеяного охлаждения воздуха в тупиковых забоях рудников Норильского промышленного района в контексте сравнения с традиционным охлаждением холодильными машинами. Рассматриваемые технологии охлаждения льдом:

- 1) охлаждение общей струи воздуха перед вентилятором, проветривающим забой,
- 2) охлаждение воздуха непосредственно в призабойном пространстве.

Исследуемый тип охлаждения – прямой, характеризующийся непосредственным контактом воздуха с водолеяной насыпью.

Расчет вариантов охлаждения воздуха

Согласно результатам научно-технических расчетов, предшествующих настоящему исследованию, в одном из рудников Норильского промышленного района прогнозируется температура воздуха, поступающего на проветривание подготовительных выработок, равная 38,8°C. С учетом работы забойной техники (буровой установки, погрузочно-доставочной машины или кровлеоборочной машины) на рабочих местах ожидается температура от 42,1°C до 47,4°C.

Обеспечение нормативной температуры воздуха (26,0°C) в одной такой рабочей зоне возможно за счет использования системы кондиционирования с холодильной мощностью 626 кВт. При этом необходимо применение теплоизолированного воздуховода, а также использование вентиляции «по требованию», при которой количество подаваемого в выработку воздуха регулируется в зависимости от выполняемых работ. Электропотребление такой системы кондиционирования составляет 939 кВт.

Для оценки целесообразности использования в данных условиях системы водолеяного охлаждения определяются следующие технологические параметры:

- площадь поверхности контакта воздуха и водолеяной смеси, требуемая для охлаждения воздуха в тупиковой выработке до допустимых 26°C;
- количество водолеяной смеси, требуемое для охлаждения воздуха;
- минимальная периодичность обновления водолеяной смеси для поддержания допустимых микроклиматических условий;
- водоприток, возникающий при работе системы.

Схематичное изображение рабочей зоны с указанием рассматриваемых вариантов охлаждения представлено на рисунке 1. Важно отметить, что рассмотрение вариантов охлаждения воздуха с нанесением льда на почву выработки обусловлено отсутствием на сегодняшний день шахтных аппаратов других принципов действия.

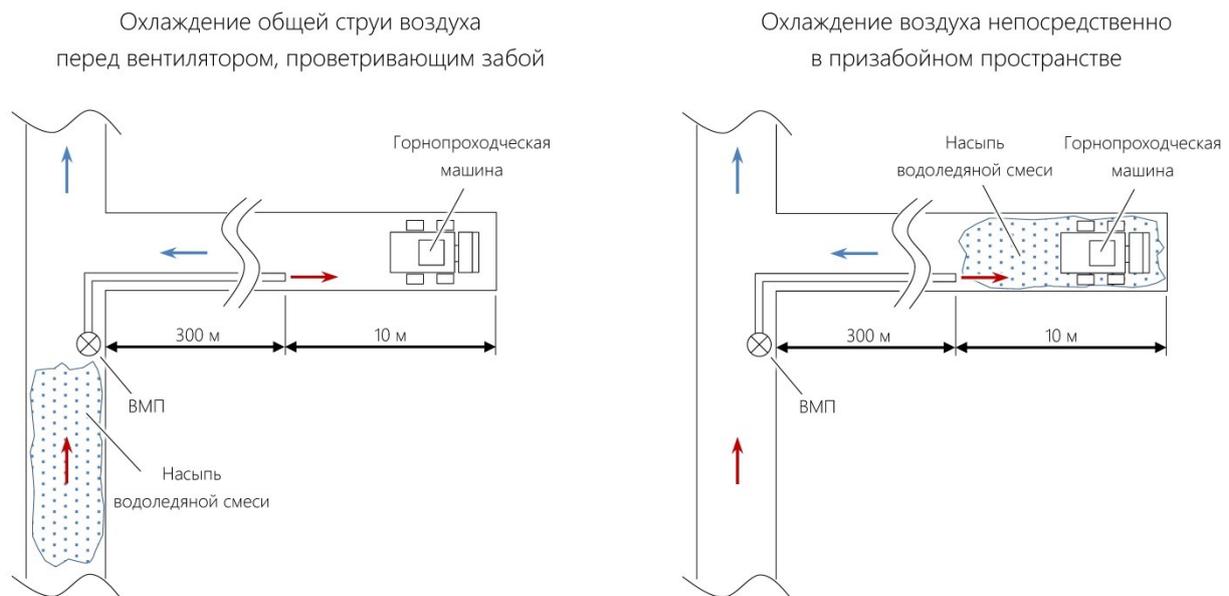


Рис. 1. Схематичное изображение рабочей зоны с указанием рассматриваемых вариантов охлаждения

Теплофизические параметры воздуха и водолеяной смеси, а также технологические параметры тупиковой выработки, используемые в расчетах, представлены в таблице 1.

Таблица 1

Исходные параметры для расчетов

№ п/п	Параметр	Обозначение	Значение
Теплофизические параметры			
1	Плотность воздуха	$\rho_{\text{в}}$	1,34 кг/м ³
2	Теплоемкость воздуха	$c_{\text{в}}$	1 005 Дж/(кг·°С)
3	Теплопроводность воздуха	$\lambda_{\text{в}}$	0,0276 Вт/(м·°С)
4	Кинематическая вязкость воздуха	$\nu_{\text{в}}$	16,96·10 ⁻⁶ м ² /с
5	Температура воздуха перед системой охлаждения	$t_{\text{в0}}$	38,8°С
6	Влажность воздуха перед системой охлаждения	$\varphi_{\text{в0}}$	50,9%
7	Требуемая температура воздуха после системы охлаждения (с учетом нагрева в трубопроводе длиной 300 м и нагрева от работы проходческой техники в забое)	$t_{\text{в1}}$	18,3°С
8	Давление воздуха	$P_{\text{в}}$	117 500 Па
9	Плотность водолеяной смеси	$\rho_{\text{л}}$	937 кг/м ³
10	Удельная теплота плавления льда	$\lambda_{\text{л}}$	333 000 Дж/кг

№ п/п	Параметр	Обозначение	Значение
11	Плотность воды	$\rho_{\text{вод}}$	1 000 кг/м ³
12	Соотношение воды ко льду в смеси		25/75
Технологические параметры			
13	Длина тупиковой выработки	L	300 м
14	Площадь выработки	S	16,7 м ²
15	Ширина выработки	B	4,2 м
16	Эквивалентный диаметр (характерный размер) выработки	d	4,6 м
17	Расход воздуха в выработке:		
	– объемный	$Q_{\text{в}}$	10,3 м ³ /с
	– массовый	$G_{\text{в}}$	49 687 кг/ч
18	Скорость движения воздуха в выработке	$V_{\text{в}}$	0,62 м/с
19	Объем ковша ПДМ ST-14	$V_{\text{ковш}}$	4,7 м ³

В расчетах принимается, что теплообмен с воздухом происходит на границе «воздух-вода», которая образуется на поверхности водолеяной смеси при контакте с теплым воздухом [15]. Теплообмен льда с породным массивом почвы горной выработки не учитывается.

Для уравнений тепловых балансов принято условие однозначности – постоянные температура и энтальпия насыщенного воздуха на границе с водяной пленкой, которая образуется на поверхности тающего льда. В таком случае дифференциальные уравнения тепло- и влагообмена воздуха со льдом имеют следующий вид по полной и явной теплоте соответственно [16]:

$$G_{\text{в}} \cdot dI_{\text{в}} = -0,278 \cdot 10^3 \cdot \beta_d \cdot (I_{\text{в}} - I_{\text{нас}}) \cdot dF, \quad (1.1)$$

$$G_{\text{в}} \cdot c_{\text{в}} \cdot dt_{\text{в}} = -0,278 \cdot \alpha \cdot (t_{\text{в}} - t_{\text{нас}}) \cdot dF, \quad (1.2)$$

где β_d – коэффициент влагообмена, кг/(с·м²);

α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·°C);

F – площадь поверхности контакта воздуха и льда, м²;

I – энтальпия воздуха, кДж/кг: индекс «в» – основной воздушный поток, индекс «нас» – слой воздуха на границе со льдом (температура 0°C, влажность 100%).

С учетом ранее описанного условия однозначности имеем:

$$I_{\text{нас}}, t_{\text{нас}} = \text{const}. \quad (1.3)$$

При этом в начальный момент соприкосновения воздушного потока с поверхностью льда справедливо условие:

$$\begin{aligned} I_{\text{в}} &= I_{\text{в}0}, \\ t_{\text{в}} &= t_{\text{в}0}. \end{aligned} \quad (1.4)$$

Решение уравнения (1.1), определяющее энтальпию воздуха после контакта со льдом (кДж/кг), будет иметь вид:

$$I_B = I_{\text{нас}} + (I_{\text{в0}} - I_{\text{нас}}) e^{\frac{-0,278 \cdot 10^3 \cdot F \cdot \beta_d}{G_B}}. \quad (1.5)$$

Из уравнения (1.5) возможно определение площади поверхности контакта воздуха и водоледяной смеси, требуемой для охлаждения воздуха до определенной температуры $t_B = f(I_B)$:

$$F = \frac{-G_B \cdot \ln\left(\frac{I_B - I_{\text{нас}}}{I_{\text{в0}} - I_{\text{нас}}}\right)}{0,278 \cdot 10^3 \cdot \beta_d}. \quad (1.6)$$

В свою очередь, решение уравнения (1.2) позволяет определить температуру воздуха после контакта со льдом ($^{\circ}\text{C}$) при заданной площади поверхности их контакта:

$$t_B = t_{\text{нас}} + (t_{\text{в0}} - t_{\text{нас}}) e^{\frac{-0,278 \cdot F \cdot \alpha}{G_B \cdot c_B}}. \quad (1.7)$$

Удельная энтальпия влажного воздуха (кДж/кг) определяется по формуле:

$$I = 1,006 \cdot T + (2501 + 1,805 \cdot T) \cdot \frac{d}{1000}, \quad (1.8)$$

где d – влагосодержание воздуха (г/кг), которое определяется следующим образом:

$$d = 621,98 \cdot \xi \cdot \frac{P_H}{P - P_H}, \quad (1.9)$$

где P_H – парциальное давление водяного пара (Па), зависящее от температуры среды:

$$P_H = 611,2 \cdot e^{\frac{\alpha \cdot T}{\beta + T}}, \quad (1.10)$$

где α и β – константы для воды: $\alpha = 17,504$, $\beta = 241,2$ $^{\circ}\text{C}$.

Для определения коэффициента теплоотдачи ($\text{Вт}/\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$) на границе водоледяной смеси с воздушным потоком используется формула:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda_B}{d}, \quad (1.11)$$

где число Нуссельта определяется на основании экспериментальных исследований [16] по формуле:

$$Nu = 0,0046 Re^{1,27} = 0,0046 \cdot \left(\frac{V_B \cdot d}{\nu_B}\right)^{1,27}. \quad (1.12)$$

Коэффициент влагообмена ($\text{кг}/\text{с} \cdot \text{м}^2$) в условиях турбулентного режима движения воздуха определяется по формуле:

$$\beta_d = \frac{\alpha}{c_B}. \quad (1.13)$$

Для определения времени таяния (плавления) льда (ч) можно воспользоваться формулой:

$$t = \frac{\lambda_l \cdot m_l}{W \cdot 3600} = \frac{\lambda_l \cdot \rho_l \cdot V_l}{W \cdot 3600} = \frac{\lambda_l \cdot \rho_l \cdot F \cdot h_l}{W \cdot 3600}, \quad (1.14)$$

где m_l – масса водолеяной смеси, кг;

V_l – объем водолеяной смеси, м³;

h_l – высотой насыпи водолеяной смеси, м (принимается равной 0,15 м);

W – теплота, подводимая к смеси для снижения температуры воздуха с 38,8°C до допустимых 26,0°C с учетом нагрева от забойной техники (6,3°C – для буровой установки, как машины, приводящей к наибольшему нагреву воздуха) и нагрева по длине воздуховода (1,4°C), Вт:

$$W = \rho_B \cdot Q_B \cdot (I_B - I_{B0}), \quad (1.15)$$

Дополнительный водоприток, возникающий при таянии льда (м³/ч), рассчитывается по формуле:

$$q_{\text{вод}} = \frac{V_l}{t} \cdot \frac{\rho_l}{\rho_{\text{вод}}}. \quad (1.16)$$

Сводные результаты расчетов требуемых параметров работы системы водолеяного охлаждения представлены в таблице 2.

Таблица 2

Требуемые параметры работы системы водолеяного охлаждения

№ п/п	Параметр	Значение
1	Площадь поверхности контакта воздуха и водолеяной смеси, требуемая для охлаждения воздуха до 26°C	1 219 м ²
2	Эквивалентная длина участка выработки, покрытой водолеяной смесью (при ширине выработки $B = 4,2$ м)	290 м
3	Требуемый объем водолеяной смеси	244 м ³
4	Требуемая масса водолеяной смеси	228 т
5	Требуемые технические мощности для поддержания допустимых микроклиматических условий в пересчете на ПДМ ST-14*	1,5 ед./ч
6	Требуемая периодичность обновления водолеяной смеси для поддержания допустимых микроклиматических условий (полное время таяния льда)	33,8 ч

№ п/п	Параметр	Значение
7	Удельное потребление водоледающей смеси	7,2 м ³ /ч 6,8 т/ч
8	Водоприток при таянии льда	6,76 м ³ /ч
9	Холодильная мощность	626 кВт

* – параметр подразумевает под собой количество заходов ПДМ ST-14 в час для обновления водоледающей смеси и поддержания допустимой температуры воздуха в тупиковом забое

Аналогичным образом на основании зависимости (1.7) выполнен расчет охлаждения воздуха непосредственно в забое подготовительной выработки, когда длина участка зоны охлаждения составляет 10 м (исходя из максимального удаления конца воздуха от груди забоя [4]). Согласно расчету, при использовании такой технологии охлаждения снижение температуры воздуха за счет применения водоледающей смеси составит 1,1°С – с 38,8°С до 37,7°С.

Заключение

На основании выполненных расчетов можно сделать вывод о том, что охлаждение воздуха водоледающей смесью непосредственно в призабойном пространстве выработки длиной 10 м является неэффективным: снижение температуры воздуха составляет не более 1,1°С.

В свою очередь, централизованное охлаждение общей вентиляционной струи, при котором отсутствуют технические ограничения по длине зоны охлаждения, может обеспечить допустимую температуру воздуха в тупиковой выработке при покрытии водоледающей смесью участка выработки длиной 290 м. При этом требуемая периодичность обновления водоледающей смеси для поддержания допустимых микроклиматических условий (полное время таяния льда) составляет 33,8 ч, требуемый объем водоледающей смеси – 244 м³/т, а требуемые технические мощности для поддержания допустимых микроклиматических условий – 1,5 ед./ч (в пересчете на ПДМ ST-14). Дополнительный водоприток при этом составит 6,76 м³/ч.

Анализ полученных данных говорит о том, что охлаждение воздуха водоледающей смесью (при прямом воздействии водоледающей насыпи на воздух) возможно, однако реализация такого способа охлаждения требует покрытия значительного участка выработки льдом. Кроме этого, использование данной технологии приведет к усложнению горнопроходческого цикла и потребует выделения дополнительных технических мощностей для транспортировки водоледающей смеси в охлаждаемую зону.

С учетом того, что эффективность охлаждения в большей степени зависит от площади контакта воздуха со льдом, повышение рациональности водоледающего охлаждения возможно с использованием технологий, увеличивающих данную площадь. Такими технологиями являются мелкодисперсное водоледающее охлаждение, охлаждение закрепного пространства горной выработки и т. п. Для наиболее комплексной и справедливой оценки целесообразности использования водоледающего охлаждения в условиях Норильского промышленного района требуется исследование данных технологий.