

## АНАЛИТИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ ДЛЯ РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ РАЗЛИЧНОГО НАЗНАЧЕНИЯ ГЛУБОКИХ ШАХТ

*В.А. Кузин, Донецкий государственный университет управления, Украина  
С.А. Алексеенко, ГВУЗ «Национальный горный университет», Украина  
В.И. Зазимко, Донецкий экспертно-технический центр, Украина*

Приведено решение уравнения теплового баланса горных выработок, проветриваемых за счет общешахтной депрессии, в дифференциальной форме при линейном законе изменения относительной влажности воздуха по их длине, принимаемой по данным замеров в аналогичных выработках глубокой шахты или по статистическим данным.

Более 60 % угольных шахт Донбасса в настоящее время ведут горные работы на глубинах более 600 м. Температура воздуха в рабочих забоях на глубоких горизонтах превышает допустимые нормы, что в сочетании с высокой относительной влажностью отрицательно сказывается на здоровье шахтеров, приводит к снижению производительности труда и повышению травматизма. Для обеспечения нормальных климатических условий в горных выработках возникает необходимость в разработке и проектировании мероприятий, обеспечивающих допустимые климатические условия на рабочих местах. Разработка таких мероприятий должна базироваться на научно-обоснованной методике прогнозирования температуры воздуха в сети выработок шахты.

Первые работы в этом направлении появились в 20-е годы XX столетия за рубежом. В нашей стране широкие исследования теплового режима шахт Донбасса начались в 50-е годы. В работах А. Н. Щербаня и О. А. Кремнева были разработаны теоретические основы прогноза и регулирования теплового режима в горных выработках глубоких шахт [1,2]. В дальнейшем был выполнен большой объем исследований по различным вопросам теории рудничного тепло- и массообмена и уточнению методов и методик тепловых расчетов глубоких шахт. Результаты этих исследований изложены в работах [3-11].

В зависимости от способа решения уравнений теплового баланса формулы по определению ожидаемой температуры воздуха в выработках можно разделить на эмпирические и аналитические.

Эмпирические зависимости базируются на решениях, получаемых путем статистической обработки данных наблюдений, и представлены простыми математическими зависимостями [12]. Область применения их ограничена условиями, в которых проводились исследования.

В бывшем СССР наиболее полно разработаны аналитические методики теплового расчета горных выработок [2-5, 7, 8, 11]. Методики этих авторов не имеют принципиальных отличий, так как за их основу принята одна и та же физическая модель тепловых процессов в горных выработках. На этой же основе базируется и методика, изложенная в работе [5], которая учитывает условия шахт и рудников Севера.

Для расчета температуры воздуха в выработках различного назначения в зависимости от времени их проветривания, составлены и решены уравнения теплового баланса в алгебраической [1, 3, 10] или дифференцируемой форме [2-5, 7, 9], отличающиеся способами приближенного задания величины влагосодержания от длины выработки и температуры воздуха.

В работах [2, 3, 10] при выводе расчетных формул для температуры воздуха в выработках различного назначения принято, что относительная влажность воздуха по длине выработки ( $\varphi$ ) практически не изменяется, т. е. ( $\Delta\varphi$ ), что характерно только для частных случаев. Принятое допущение при выводе расчетных формул привело к существенным ошибкам при прогнозе температуры воздуха в сети выработок шахты, особенно при применении установок искусственного охлаждения воздуха.

Цель статьи – разработка обобщенной аналитической зависимости для прогноза температуры воздуха в выработках независимо от их назначения на основе уравнений теплового ба-

ланса в дифференциальной форме при заданном законе изменения относительной влажности воздуха по длине выработок.

Рассмотрим общий случай теплообмена и баланса тепла для элемента наклонной выработки в дифференциальной форме (рисунок).

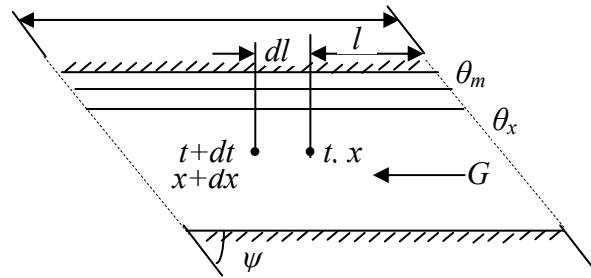


Рисунок. Расчетная схема к описанию тепловых процессов в выработке

Температура воздуха, движущегося по горной выработке, изменяется под влиянием различных источников тепла и влагообменных процессов. Источники тепла, влияющие на температуру воздуха, делятся на две группы:

абсолютные, которые не зависят от температуры воздуха в выработке или зависят от средних ее значений (процессы сжатия или расширения воздуха, работа механизмов, потери тепла в электросетях и др.);

относительные, при которых переход тепла и нагревание воздуха происходит вследствие разности температур, т. е. температурного напора (нестационарный теплообмен с горным массивом, шахтной водой, испарение влаги со стен выработок, транспортируемое ископаемое, трубопроводы с водой и сжатым воздухом, трубопроводы с хладоносителем и др.).

Суммарные тепловыделения  $dQ$  в элементе выработки расходуются на повышение теплоемкости воздуха путем его нагрева ( $dt$ ) и увлажнения ( $dx$ )

$$dQ = Gc_p dt + Grdx. \quad (1)$$

При этом влагосодержание воздуха ( $x$ ) является функцией температуры и длины выработки, т. е.

$$dx(t, l) = \frac{\partial x(t, l)}{\partial t} dt + \frac{\partial x(t, l)}{\partial l} dl. \quad (2)$$

Приравнявая расход тепла его приходу, получим

$$dQ = k_\tau U(t_n \pm \sigma l \sin \psi - t) dl + k_m U_m (\theta_m - t) dl - k_x U_x (t - \theta_m) dl \pm \frac{Gl \sin \psi}{427} dl + \sum \frac{Q_{mu}}{L} dl. \quad (3)$$

В уравнениях (1) и (3) и на рис.  $t$  – температура воздуха на расстоянии  $l$  от начала выработки;  $t_n$  – естественная температура горных пород в начале выработки;  $k_\tau$  – коэффициент нестационарного теплообмена между горным массивом и воздухом;  $k_m, k_x$  – коэффициенты теплоотдачи «теплых» и «холодных» трубопроводов;  $G$  – массовый средний расход воздуха в выработке;  $U, U_m, U_x$  – соответственно периметр выработки «теплых» и «холодных» трубопроводов;  $\sum Q_{mu}$  – суммарные тепловыделения от абсолютных источников тепла в выработке;  $\theta_m, \theta_x$  – температура жидкости в «теплых» и «холодных» трубопроводах;  $c_p$  – массовая теплоемкость воздуха;  $r$  – скрытая теплота парообразования;  $x$  – влагосодержание воздуха;  $\sigma$  – геотермические градиент;  $\psi$  – угол наклона выработки.

При практических расчетах в интервалах температур до  $50^\circ\text{C}$  для определения влагосодержания воздуха воспользуемся аппроксимированной в небольших диапазонах температур ( $5-10^\circ\text{C}$ ) линейной зависимостью влагосодержания от абсолютной влажности, температуры и давления [2, 3, 13]

$$x = \frac{0,622 \varphi n(\bar{t} - \varepsilon)}{P - p_n^{cp}}; \quad (4)$$

где  $P$  – барометрическое давление в выработке;  $p_n^{cp}$  – среднее парциальное давление воздуха на расчетном участке выработки в диапазоне аппроксимации температуры;  $n, \varepsilon$  – коэффициенты уравнения аппроксимации [13, 17].

Анализ шахтных наблюдений показывает, что между относительной влажностью воздуха ( $\varphi$ ) и длиной выработки существует линейная зависимость [11, 15]

$$\varphi_l = \varphi_1 + \xi l; \quad (5)$$

где  $\xi = \frac{\Delta\varphi}{L}$  – изменение относительной влажности воздуха на единицу длины выработки.

Тогда уравнение влагосодержания воздуха (2) при принятом изменении относительной влажности (5) примет вид

$$x = (\varphi_1 + \xi l) B' (t - \varepsilon), \quad (6)$$

$$\text{где } B' = \frac{0,622 n}{P - p_n^{cp}}. \quad (7)$$

Так как влагосодержание воздуха в выработке является функцией двух переменных – температуры и длины выработки, то дифференциал изменения ( $dx$ ) с учетом уравнения (6) примет вид

$$dx = (\varphi_1 + \xi l) B' dt + \xi B' t dl - \xi B' \varepsilon dl. \quad (8)$$

Подставляя значение  $dx$  в уравнение (1) с учетом значения  $dQ$  согласно (3) и выполнив преобразования, получим линейное уравнение первого порядка

$$\frac{dt}{dl} + \frac{nt}{A_l + Dl} = \frac{M \pm kl}{A_l + Dl}, \quad (9)$$

где

$$\frac{k_\tau U + k_m U_m + k_x U_x}{G_{cp}} + \xi B = \Pi; \quad \frac{k_\tau U}{G_{cp}} \sigma \sin \psi + \frac{\sin \psi}{427 G_{cp}} = K;$$

$$\frac{k_\tau U}{G_{cp}} t_n + \frac{k_m U_m}{G_{cp}} \theta_m + \frac{k_x U_x}{G_{cp}} + \theta_x + \xi B \varepsilon + \frac{\sum Q_{mu}}{G_{cp} L} = M;$$

$$\frac{\Gamma}{c_p} B' = B; \quad l + B \varphi_1 = A_l; \quad \xi B = D.$$

Для решения уравнения (9) применена подстановка вида  $t = uv$  с нахождением постоянной интегрирования из граничного условия  $t = t_1$  при  $l = 0$ .

Конечная расчетная зависимость для определения температуры воздуха в конце выработки или ее участка имеет вид

$$t_2 = t_1 B + \frac{l - B}{A + \Delta\varphi B} \left[ E + \Delta\varphi B \varepsilon + 3600 \frac{\sum Q_{mu}}{G_{cp}} \pm L \sin \psi (\sigma T + 9,76 \cdot 10^{-3}) \right]. \quad (10)$$

Знак «+» в формуле (10) относится к случаю нисходящего движения вентиляционной струи по выработке, знак «-» к восходящему проветриванию.

$$B = \left( \frac{l + B \varphi_1}{l + B \varphi_2} \right)^{\left( l + \frac{A}{\Delta\varphi B} \right)} \quad \text{при } \Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1. \quad (11)$$

Рассматривая частный случай, когда относительная влажность воздуха по длине выработки не изменяется, имеем  $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi$  и  $\Delta\varphi = 0$ . При  $\Delta\varphi = 0$  выражение для фактора  $B$  превращается в неопределенность. Раскрывается эта неопределенность по правилу Лопиталья, заменив функции в числителе и знаменателе их производными по  $\Delta\varphi$ , получим выражение

$$\ln B = \left[ -\frac{A + \Delta\varphi B}{l + B \varphi - \Delta\varphi B} + \ln \left( 1 - \frac{\Delta\varphi B}{l + B \varphi} \right) \right]. \quad (12)$$

Положив в формуле (12)  $\Delta\varphi = 0$ , получим значение фактора  $B$  для случая постоянной относительной влажности в выработке

$$B = \exp\left(-\frac{A}{1+B\varphi}\right) \quad \text{при} \quad \varphi_1 = \varphi_2 - \varphi; \quad (13)$$

$$A = \frac{3600L(k_\tau U + k_m U_m + k_x U_x + k_{m'} U_{m'})}{G_{cp}}; \quad (14)$$

$$B = \frac{1542n}{P - p_n^{cp}}; \quad (15)$$

$$T = \frac{3600k_\tau UL[(A + \Delta\varphi B) - (1 + B\varphi_1)(1 - B)]}{G_{cp}}. \quad (16)$$

В формулах (10-16) значения коэффициентов аппроксимации  $n$ ,  $\varepsilon$  и  $p_n^{cp}$  для ожидаемого диапазона изменения температуры воздуха в выработке принимаются по таблицам [11, 13, 17].

Полученную аналитическую зависимость (10) рекомендуется использовать для определения температуры воздуха в различных типах выработок, проветриваемых за счет общешахтной депрессии, независимо от времени их существования и назначения (стволы, групповые, участковые выработки и лавы). По этой зависимости с учетом формул (11, 13-16) можно рассчитать температуру воздуха в конце выработки или на любом ее участке по известной начальной температуре и заданных начальных и конечных значениях относительной влажности воздуха в аналогичных условиях ведения горных работ или статистическим данным [13, 17].

Расчет температуры воздуха в лавах. Температура воздуха в лавах пологих, наклонных и крупнопадающих пластов со щитовой выемкой угля рассчитывают по формуле (10), в которой комплексы  $A$ ,  $E$  и  $T$  имеют следующий вид

$$A = \frac{3600(k_\tau UL + 1,2k_{\tau_a} \varepsilon_l L_k)}{G_{cp}}; \quad (17)$$

$$E = \frac{3600k_\tau UL}{G_{cp}} t_n + \frac{3600k_{\tau_a} \varepsilon_l L_k}{G_{cp}} (t_n - \Delta t'); \quad (18)$$

$$T = \frac{3600k_\tau UL[(A + \Delta\varphi B) - (1 + B\varphi_1)(1 - B)]}{G_{cp}(A + 2\Delta\varphi B)(1 - B)}, \quad (19)$$

где  $k_{\tau_a}$  – коэффициент нестационарного теплообмена между углем и воздухом в лаве [17];  $\varepsilon_l$  – ширина конвейера;  $L_k$  – длина конвейера в лаве.

Температуру воздуха в лавах на крутых пластах с комбайновой и молотковой выемкой угля рассчитывают по формуле (10), в которой комплексы  $A$ ,  $E$  и  $T$  имеют вид

$$A = \frac{3600(k_\tau UL_p + k_{\tau_l} F)}{G_{cp}}; \quad (20)$$

$$E = \frac{3600k_\tau UL_p}{G_{cp}} t_{n_{cp}} + \frac{3600k_{\tau_l} F}{G_{cp}} (t_{n_{cp}} - \Delta t'); \quad (21)$$

$$T = \frac{3600k_\tau UL_p[(A + \Delta\varphi B) - (1 + B\varphi_1)(1 - B)]}{G_{cp}(A + 2\Delta\varphi B)(1 - B)}, \quad (22)$$

где  $L_p$  – расчетная длина лавы [17];  $t_{n_{cp}}$  – средняя естественная температура пород в лаве;  $\Delta t'$  – снижение температуры угля в зоне выемки за счет дегазации и увлажнения [17];  $F$  – поверхность теплообмена падающего угля [17].

Расчет температуры воздуха в лаве с учетом теплопритоков из выработанного пространства.

Утечки воздуха через выработанное пространство очистных забоев зависят от схемы проветривания выемочного участка, системы разработки, способа управления кровлей, состава боковых пород и составляют 15-80 % от расхода воздуха, поступающего к лаве. При температуре вмещающих горных пород выше 30°C выносимое вентиляционными утечками из выработанного пространства тепло оказывает существенное влияние на тепловлажностные параметры воздуха в лаве и в выработках с исходящей струей воздуха. Это вызывает необходимость учета влияния утечек воздуха на тепловые условия в лавах и в выработках с исходящей струей воздуха.

Аналитические зависимости для расчета температуры притечек воздуха из выработанного пространства выемочных участков получены также из дифференциального уравнения теплового баланса при задании закона изменения относительной влажности воздуха в выработанном пространстве, апробированы в широком диапазоне условий горных работ при различных способах управления горным давлением на выемочных участках. Методика расчета температуры утечек воздуха приведена в работах [17, 19].

При управлении горным давлением на выемочном участке полным обрушением и схемах их проветривания с выдачей исходящей из лавы вентиляционной струи на выработанное пространство (схемы 1а, 1б, 3а, 4б), а также на массив угля с подачей на участок дополнительного количества воздуха в исходящую струю лавы (схемы 3б, 4а), возможно поступление утечек воздуха из выработанного пространства в лаву в зависимости от способа поддержания вентиляционной выработки [18, 19].

Лаву при этом разбивают на два расчетных участка: от начала до пункта поступления утечек воздуха из выработанного пространства ( $L'$ ) и от пункта смещения основного воздушного потока в лаве с притечками воздуха из выработанного пространства ( $l_6$ ).

Температура воздуха в лаве без учета притечек воздуха (на длине  $L'$ ) рассчитывается по формулам (10, 11, 13-22). При этом на длине лавы  $L' = L_l - l_6$  в этих расчетных формулах величины  $t_1 = t_l$ ,  $t_2 = t_6$ ,  $\varphi_1 = \varphi_l$ ,  $\varphi_2 = \varphi_6$ ,  $G = G_l$ .

Расход воздуха в рабочем пространстве лавы на длине расчетного участка  $L'$  определяется по формуле [18]

$$G_l = \frac{G_{уч} - G_{дон}}{1 + (\kappa_{ум.в.} - 1) \cdot \kappa_{ум.л.}}, \quad (23)$$

где  $G_{уч}$  – расход воздуха на участке;  $G_{дон}$  – расход воздуха в дополнительной выработке;  $\kappa_{ум.в.}$  – коэффициент утечек воздуха через выработанное пространство в пределах выемочного участка;  $\kappa_{ум.л.}$  – поправочный коэффициент, зависящий от способа поддержания выработки.

Величина притечек воздуха из выработанного пространства в лаву вычисляется по формуле

$$G_{пр.л} = G_{ум} \cdot \kappa_{ум.л.}, \quad (24)$$

где  $G_{ум}$  – расход утечек воздуха через выработанное пространство;  $\kappa_{ум.л.}$  – коэффициент, учитывающий поступление воздуха из выработанного пространства в лаву.

Температура и относительная влажность воздуха в лаве после смешения с притечками воздуха из выработанного пространства

$$t_{см} = \frac{t_6 G_l + t_{пр} G_{пр.л}}{G_l + G_{пр.л}}, \quad (25)$$

$$\varphi_{см} = \frac{\varphi_6 \frac{p_H^{t_2}}{p_H^{t_{см}}} G_l + \varphi_{пр} \frac{p_H^{t_{пр}}}{p_H^{t_{см}}} G_{пр.л}}{G_l + G_{пр.л}}, \quad (25)$$

где  $p_H^{t_{см}}$  – парциальное давление насыщенных водяных паров при температуре смеси воздуха  $t_{см}$ ;  $p_H^{t_2}$  – парциальное давление насыщенных водяных паров при температуре  $t_2$ .

Температура и относительная влажность воздуха в участковых выработках с исходящей струей с учетом притечек воздуха из выработанного пространства выемочных участков рассчитывается по формулам, полученным также из дифференциального уравнения теплового баланса выработки, но с заданием закономерностей поступления притечек воздуха по их длине. Методика расчета температуры воздуха в выработках с исходящей струей воздуха приведена в работах [17, 19].

#### Список литературы

1. Щербань А.Н. Основы теории и методы тепловых расчетов рудничного воздуха. – М.: Углетехиздат, 1953. – 234 с.
2. Щербань А.Н., Кремнев О.А. Научные основы расчета и регулирования теплового режима глубоких шахт. Т. 1 и 2. – К.: АН УССР. – 1959. – Т. 1. – 279 с., Т. 2. – 347 с.
3. Щербань А.Н., Кремнев О.А., Журавленко В.Я. Руководство по регулированию теплового режима шахт. – Изд. 3, перераб. и доп. – М.: Недра, 1977. – 359 с.
4. Воропаев А.Ф. Теория теплообмена рудничного воздуха и горных пород в глубоких шахтах. – М.: Недра, 1966. – 249 с.
5. Дядькин Ю.Д. Основы горной теплофизики для шахт и рудников Севера. – М.: Недра, 1968. – 256 с.
6. Медведев Б.И. Упрощенный метод теплового расчета цепи горных выработок. Сб. Тепловые и механические процессы при разработке полезных ископаемых. – М.: Недра, 1964. – С. 27-32.
7. Богоявленский В.А. Тепловой расчет вентиляционной струи в очистных забоях глубоких шахт с учетом специфики лавы, как теплообменной выработки. Труды ХГИ, т. IX. – Харьков: изд. ХГУ, 1961. – С. 73-80.
8. Баратов Э.И., Малашенко Э.Н. Вопросы прогноза и регулирования теплового режима гидрошахт. Сб. Труды семинара по горной теплофизике, вып. 4. – К.: изд. АН УССР, 1982. – С. 16-20.
9. Криворучко А.М. Вывод формул для тепловых расчетов горных выработок. Сб. Вопросы проветривания шахт Донецкого бассейна. – М.: Недра, 1969. – С. 199-213.
10. Величко А.Е. Уточнение и упрощение зависимостей теплового расчета рудничного воздуха. Сб. Охлаждение воздуха в угольных шахтах, вып. 1. – М.: Недра, 1969. – С. 55-69.
11. Кузин В.А., Хохотва Н.Н., Николаенко Л.В. Метод расчета тепловых условий в горных выработках глубоких шахт. Сб. Охлаждение воздуха в угольных шахтах, вып. 5. – Макеевка-Донбасс: изд. МакНИИ, 1977. – С. 35-39.
12. Величко А.Е. Приближенный метод расчета температуры воздуха в горных выработках шахт Донбасса. Сб. Охлаждение воздуха в угольных шахтах, вып. 2. – Макеевка-Донбасс: изд. МакНИИ, 1971. – С. 78-82.
13. Единая методика прогнозирования температурных условий в угольных шахтах / Под ред. В.А. Кузина и Н.Н. Хохотвы. – Макеевка-Донбасс: изд. МакНИИ, 1979. – 196 с.
14. Экспресс-методика прогнозирования температуры воздуха в выработках глубоких шахт. – Макеевка-Донбасс: изд. МакНИИ, 1985. – 59 с.
15. Разработать единую методику прогнозирования температурных условий в глубоких шахтах. Отчет о НИР / Руководители В.А. Кузин, А.Е. Величко // МакНИИ – № гос. регистр. 75036797. – Макеевка-Донбасс, 1977. – 193 с.
16. Фандеев М.И., Кузин В.А., Пучков М.М. Влияние теплопритоков из выработанных пространств на температуру воздуха в лаве // Изв. вузов: Горный журнал. – 1980. – № 10. – С. 49-52.
17. СОУ-Н 10.1.00174088.027:2011. Прогнозування та нормалізація теплових умов у вугільних шахтах.
18. НПАОП 10.0-7.08-93. Руководство по проектированию вентиляции угольных шахт.
19. Методика прогнозирования температурных условий в выработках вентиляционных горизонтов глубоких шахт. Утв. Минуглепромом СССР 10.04.1984. – Макеевка-Донбасс: изд. МакНИИ, 1984. – 61 с.