

МЕТОД РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА В УЧАСТКОВЫХ ВЫРАБОТКАХ С ИСХОДЯЩЕЙ ВЕНТИЛЯЦИОННОЙ СТРУЕЙ ПРИ ПЕРЕМЕННОМ РАСХОДЕ ВОЗДУХА

В.А. Кузин, Донецкий государственный университет управления, Украина

Приведены теоретическое обоснование и аналитические зависимости для расчета температуры воздуха в выработках с исходящей струей воздуха при задании линейного закона изменения относительной влажности воздуха по их длине и экспоненциальном законе притоков воздуха из выработанного пространства выемочных участков.

Для прогнозирования температуры воздуха в выработках вентиляционных горизонтов необходимо учитывать как теплопритоки воздуха из выработанного пространства выемочных участков, так и утечки воздуха из воздухоподающих выработок. При этом в зависимости от системы разработки и схемы проветривания выемочного участка теплопритоки воздуха из выработанного пространства могут быть как сосредоточенными в одном пункте, так и переменными по длине выработки. В настоящее время разработаны методы расчетов температуры воздуха в выработках, которые учитывают различные законы изменения расхода воздуха по их длине [1,2,4]. В нормативном документе по прогнозированию температуры воздуха в выработках вентиляционных горизонтов [2] для участков выработок с переменным расходом воздуха (схемы проветривания выемочных участков 1а,1б,3а,4б) расчетные зависимости получены при задании закона изменения влагосодержания воздуха по длине выработки [1,5]. К недостаткам такого метода расчета относится необходимость задания коэффициентов аппроксимации влагосодержания воздуха от его температуры, которая является искомой величиной. Это приводит к увеличению объема расчетов, существенному усложнению программы расчетов и снижению их надежности. Расчетные зависимости методики [6], как и методики для воздухоподающих выработок [3], получены при задании линейного закона изменения относительной влажности воздуха по длине выработок. Для устранения отмеченного недостатка, с целью использования фактических исходных данных относительной влажности воздуха, получаемых в процессе шахтных замеров на конкретной шахте, и, таким образом, уменьшения ошибок при прогнозировании температуры воздуха в выработках, получено решение дифференцированного уравнения теплового баланса при линейном законе изменения относительной влажности по длине выработки и экспоненциальном законе притоков воздуха из выработанного пространства выемочного участка при управлении кровлей полным обрушением.

Уравнение теплового баланса для элементарного участка вентиляционной выработки dl , находящегося на расстоянии l от лавы (рисунок), имеет вид [4]:

$$\begin{aligned} cGdt + ctdG + rGdx + rxdG = k_{\tau}U(t_{n1} \pm \sigma l \sin \psi - t)dl + q_a dl + \\ + k_{\tau}U_{\tau}(\theta_{\tau} - t)dl - k_x U_x(t - \theta_x)dl + gG \sin \psi dl + g \sin \psi l dG + ct_{np}dG + rx_{np}dG \end{aligned} \quad (1)$$

где c – массовая теплоемкость воздуха при изобарном процессе; G – расход воздуха; r – скрытая теплота парообразования; x – влагосодержание воздуха; k_{τ} – коэффициент нестационарного теплообмена горных пород с воздухом; U – периметр сечения вентиляционной выработки; t_{n1} – естественная температура горных пород в месте сопряжения выработки с лавой; t_{np} – температура утечек воздуха из выработанного пространства; σ – геотермический градиент; q_a – величина тепловыделений от абсолютных источников на единице длины выработки; g – ускорение свободного падения; ψ – угол наклона пласта; k_{τ} , k_x – коэффициенты теплопередачи соответственно греющего охлаждающего трубопроводов; U_{τ} , U_x – периметры соответственно греющего охлаждающего трубопроводов; θ_{τ} , θ_x – средняя температура агента в трубопроводах.

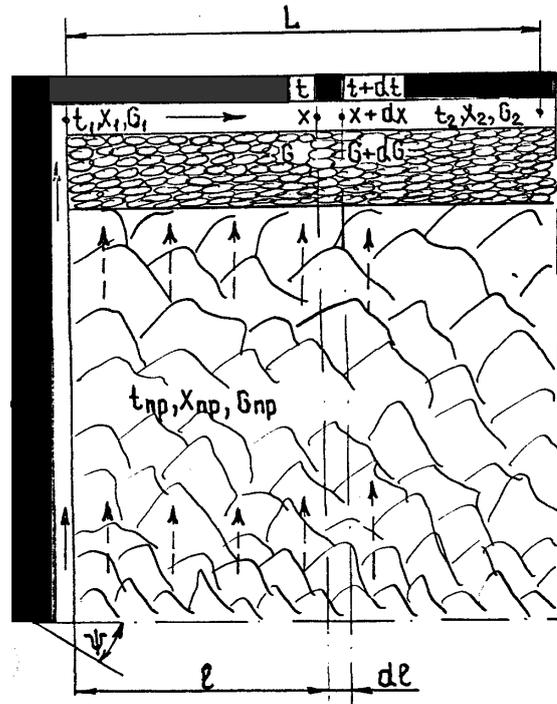


Рисунок. Расчетная схема к учету влияния тепловыделений из выработанного пространства на температуру воздуха в вентиляционном штреке

Принимаем линейную зависимость изменения относительной влажности в пределах выработки [3, 6]:

$$\varphi = \varphi_1 + \frac{\Delta\varphi}{L} \ell = \varphi + \xi \cdot \ell. \quad (2)$$

При линейной аппроксимации влагосодержания от относительной влажности, температуры и давления воздуха (P) оно определяется по формуле [3, 6]

$$x = 0,622 \frac{n(t - \varepsilon)\varphi}{P - p_n^{cp}}. \quad (3)$$

Тогда уравнение (3) при линейном законе изменения относительной влажности (2) примет вид:

$$x = (\varphi_1 + \xi \cdot \ell) B' (t - \varepsilon), \quad (4)$$

где

$$B' = 0,622 \frac{n}{P - p_n^{cp}}.$$

Изменение влагосодержания при изменении температуры воздуха на dt на длине dl будет иметь вид:

$$dx = (\varphi_1 + \xi \cdot \ell) B' dt + \xi \cdot B' t d\ell - \xi \cdot B' \varepsilon d\ell. \quad (5)$$

Закономерность изменения расхода воздуха по длине вентиляционной выработки нелинейная и при указанных выше схемах проветривания выемочных участков описывается уравнением [7]:

$$G = G_{yc} - G_{np} \exp(-\delta \cdot \ell), \quad (6)$$

где G_{yc} – расход воздуха для проветривания выемочного участка; G_{np} – утечки воздуха через выработанное пространство; δ – эмпирический коэффициент.

Для условий Донбасса при управлении кровлей полным обрушением $\delta = 0,04-0,05$.

Приращение количества воздуха на участке выработки dl выразится зависимостью

$$dG = \delta G_{np} \exp(-\delta \cdot \ell) d\ell. \quad (7)$$

Подставив значение dx и dG согласно уравнениям (5) и (7) в дифференциальное уравнение (1) и разделив его на $c G_{yч}$, получим

$$dt - ae^{-\delta\ell} dt + at\delta e^{-\delta\ell} d\ell + B(\varphi_1 + \xi\ell)dt + B\xi t d\ell - B\xi\epsilon d\ell - Ba(\varphi_1 + \xi\ell)e^{-\delta\ell} dt - Ba\xi te^{-\delta\ell} d\ell + Ba\xi e^{-\delta\ell} d\ell + Ba(\varphi_1 + \xi\ell)(t - \epsilon)\delta e^{-\delta\ell} d\ell = A(t + \delta\ell \sin \psi - t)d\ell + B d\ell + D(\theta_T - t)d\ell - M(t - \theta_x)d\ell + N d\ell - aNe^{-\delta\ell} d\ell + aN\ell e^{-\delta\ell} d\ell + at_{np}\delta e^{-\delta\ell} d\ell + aR\delta e^{-\delta\ell} d\ell, \quad (8)$$

$$\text{где } a = \frac{G_{np}}{G_{yч}}; \quad B = \frac{r}{c} B'; \quad A = \frac{k_\tau U}{G_{yч} c}; \quad B = \frac{q}{G_{yч} c}; \quad D = \frac{k_T U_T}{G_{yч} c}; \quad M = \frac{k_x U_x}{G_{yч} c};$$

$$N = \frac{g \sin \psi}{c}; \quad R = \frac{rx_{np}}{c}.$$

После приведения подобных членов уравнение (8) примет вид

$$Pdt - Ze^{-\delta\ell} dt + Wte^{-\delta\ell} d\ell + E\ell dt + V\ell d\ell - Sd\ell - T\ell e^{-\delta\ell} dt + I\ell e^{-\delta\ell} d\ell = \Psi\ell e^{-\delta\ell} - Y\ell te^{-\delta\ell} d\ell + H\ell d\ell, \quad (9)$$

$$\text{где } P = 1 + B\varphi_1; \quad Z = aP; \quad W = a(\delta P - B\xi); \quad V = B\xi A + D + M;$$

$$S = B\xi A t_{п1} + B + D\theta_T + M\theta_x + N; \quad T = Ba\xi;$$

$$I\ell = a(B\xi \epsilon - B\varphi_1 \epsilon \delta + N - \delta \cdot t_{np} - R\delta);$$

$$\Psi = a\delta(B\xi \epsilon + N); \quad Y = B\xi a\delta; \quad H = A\sigma \sin \psi; \quad E = B\xi.$$

Расчетный анализ, выполненный по формуле (9), показал, что членами уравнения со слагаемыми T , Ψ , E , и Y можно пренебречь, и это не окажет влияния на значение конечной температуры воздуха на расчетном участке (таблица).

Таблица

Исходные данные и результаты сравнительных расчетов по уравнению (9) и упрощенному уравнению (10) и формуле (19)

Температура воздуха в начале выработки, $t_1, ^\circ\text{C}$	Относительная влажность воздуха в выработке, д. ед.		Естественная температура пород, $t_{п}, ^\circ\text{C}$	Температура ($^\circ\text{C}$) и относительная влажность притечек воздуха, д. ед.		Расход воздуха на участке, $G_{yч}, \text{кг/с}$	Длина выработки, $L, \text{м}$	Коэффициент $a = \frac{G_{np}}{G_{yч}}$	Коэффициент нестационарного теплообмена, $k_e, \text{Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$	Угол наклона выработки, $\psi, ^\circ$	Температура воздуха в конце выработки, $^\circ\text{C}$		
	в начале, φ_1	в конце, φ_2		$t_{ут}, ^\circ\text{C}$	$\varphi_{ут}$						расчет на ЭВМ, формулы		по формуле (19)
											(9)	(10)	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	13	14	15
29,4	0,80	0,82	39,4	34,3	0,85	30,42	600	0,147	0,49	0,105	30,49	30,5	30,5
26,0	0	0	40,0	30,0	0	15,0	2000	0,5	0,3	0	32,31	32,31	32,3
39,0	0,90	0,95	48,0	40,0	0,40	20,0	400	0,2	1,0	0	36,38	36,37	36,4

20,0	0,60	0,80	50,0	45,0	0,68	25,0	800	0,05	0,1	-0,4	17,71	17,48	17,5
30,0	0,70	0,90	44,0	35,0	0,90	40,0	1000	0,3	5,0	0,3	34,95	35,14	35,6
26,0	1,0	1,0	39,0	35,0	0,52	5,0	60	0,4	0,8	-0,1	26,27	26,26	26,3

С учетом принятых упрощений дифференциальное уравнение (9) можно представить в следующем виде

$$\frac{dt}{d\ell} = \frac{H\ell + S - Юe^{-\delta\ell} - (We^{-\delta\ell} + V)t}{P - Ze^{-\delta\ell}}. \quad (10)$$

Произведем замену переменной, выражая $e^{-\delta\ell}$ через y . Тогда уравнение (10) примет вид

$$\frac{dt}{dy} = \frac{Wy + V}{\delta y(P - Zy)} t = \frac{\frac{H}{\delta} \ell ny - S + Юy}{\delta y(P - Zy)}. \quad (11)$$

Решим уравнение (11) без правой его части

$$\frac{dt}{dy} = \frac{Wy + V}{\delta \cdot y(P - Zy)} t. \quad (12)$$

Получим выражение

$$t = Cy^K (P - Zy)^\nu, \quad (13)$$

где $\nu = -\left(\frac{W}{\delta \cdot Z} + K\right)$ и $K = \frac{V}{\delta \cdot P}$.

Заменяем в уравнении (13) постоянную C неизвестной функцией I и полученное выражение подставим в уравнение (11). После преобразований оно примет следующий вид

$$dI = \frac{\left(\frac{H}{\delta} \ell ny - S + Юy\right) dy}{\delta y^{K+1} (P - Zy)^{(\nu+1)}}. \quad (14)$$

Сомножитель $(P - Zy)^{(\nu+1)}$ в знаменателе раскладываем в ряд по формуле бинома Ньютона, ограничиваясь двумя членами разложения, т. е.

$$(P - Zy)^{(\nu+1)} = \varepsilon^{-1} (1 - \varrho y)^{-1}, \quad (15)$$

где $\varrho = a(\nu + 1)$; $\varepsilon = P^{(-\nu-1)}$.

Подставив выражение (15) в дифференциальное уравнение (14), и интегрируя его, получим

$$I = \frac{H}{\varepsilon^{-1} \delta^2} \int \frac{\ell ny dy}{y^{K+1} (1 + \varrho y)^{-1}} - \frac{S}{\varepsilon^{-1} \delta} \int \frac{dI}{y^{K+1} (1 + \varrho y)^{-1}} + \frac{Ю}{\varepsilon^{-1} \delta} \int \frac{dy}{y^K (1 + \varrho y)^{-1}} =$$

$$= y^{-K} \left\{ \Pi \left[\frac{\varrho y \left(\ell ny - \frac{1}{1-K} \right)}{1-K} - \frac{\ell ny + \frac{1}{K}}{K} \right] - \mathfrak{E} \left(\frac{1}{-K} + \frac{\varrho y}{1-K} \right) + \tilde{R} y \left(\frac{1}{1-K} + \frac{\varrho y}{2-K} \right) + C_1 y^K \right\}, \quad (16)$$

$$\text{где } \Pi = \frac{H\varepsilon}{\delta^2}; \quad \Theta = \frac{Se}{\delta}; \quad \tilde{R} = \frac{Ю\varepsilon}{\delta}.$$

Подставив (16) в выражение (13), получим общее решение дифференциального уравнения (11):

$$t = (P - Zy)^v (\Pi\gamma - \Theta\eta + \tilde{R}\lambda + C_1 y^k), \quad (17)$$

$$\text{где } \gamma = \varepsilon\beta y(\ell ny - \beta) - \alpha(\ell ny + L); \quad \eta = \beta\varepsilon y - L; \quad \lambda = y(\chi + wy);$$

$$\alpha = K^{-1}; \quad \beta = (1 - K)^{-1}; \quad w = \varepsilon(2 - K)^{-1}.$$

При начальном условии (при $\ell = 0$, $y = 1$ и $t = t_1$) получим частное решение дифференциального уравнения (11)

$$t = (P - Zy)^v \{ \Pi\gamma - \Theta\eta + \tilde{R}\lambda + y^k [t_1(P - Zy)^v + F] \}, \quad (18)$$

$$\text{где } F = \Pi(\varepsilon\beta^2 + d^2) + \Theta(\varepsilon\beta - L) - \tilde{R}(\beta + w).$$

После подстановки в уравнение (18) значений отдельных величин, ряда преобразований и пренебрегая малыми величинами, получим окончательное выражение для температуры воздуха в конце вентиляционной выработки:

$$t_2 = \frac{1}{m(1 - ay)^\rho} \{ H - D + Ey + f[mt_1(1 - ay)^\rho + D - E] \}, \quad (19)$$

$$\text{где } m = \varepsilon^\rho; \quad \varepsilon = 1 + B\varphi_1; \quad \rho = 1 + A; \quad A = \frac{k_\tau U + k_T U_T + k_x U_x + k_{\tau T} U_T}{N};$$

$$N = B\delta G_{yч} c; \quad a = \frac{G_{ym}}{G_{yч}}; \quad K = A + \frac{B(\varphi_2 - \varphi_1)}{\varepsilon\delta L}; \quad y = \exp(-\delta L);$$

$$H = \frac{mk_\tau U \delta \sin \psi L}{KN}; \quad f = \exp(-K\delta L); \quad M = \frac{mB\varepsilon}{\varepsilon\delta KL} (\varphi_2 - \varphi_1);$$

$$D = \frac{H}{\delta KL} - M - \frac{m}{K\varepsilon} (k_\tau U t_{n1} + q_a + k_{\tau T} U_{TP} t'_n + k_T U_T \theta_T + k_x U_x \theta_x \pm g G_{yч} \sin \psi \cdot 3,6 \cdot 10^{-3});$$

$$E = \frac{aK}{1 - K} \left\{ M \frac{m}{K\varepsilon} \left[\frac{g \sin \psi}{\delta c} - B\varphi_1 \varepsilon - t_{np} - B_{np} \varphi_{np} (t_{np} - \varepsilon_{np}) \right] \right\}.$$

Выводы. Сравнение результатов расчета по формуле (19) с результатами численного решения по уравнениям (9) и (10), а также с данными шахтных наблюдений показало, что отклонения практически находятся в пределах точности расчетов.

Аналитическую зависимость (19) рекомендуется применять для прогноза температуры воздуха в участковых вентиляционных выработках при переменных по ее длине теплопритоках воздуха из выработанного пространства.

Список литературы

1. Щербань А. Н. Методы расчета температуры вентиляционной струи при переменном расходе воздуха по длине выработки / А. Н. Щербань, А. П. Черняк, Н. А. Брайчева // Доклады АН УССР, сер. А, 1975. – № 11. – С. 1047-1051.
2. Методика теплового расчета выработок с исходящей вентиляционной струей. – Макеевка: МакНИИ, 1981. – 68 с.
3. Единая методика прогнозирования температурных условий в угольных шахтах / Под ред.

В. А. Кузина и Н. Н. Хохотвы. – Макеевка : МакНИИ, 1979. – 196 с.

4. Кузин В. А. Метод расчета тепловых условий в горных выработках глубоких шахт / В. А. Кузин, Н. Н. Хохотва, Л. В. Николаенко // Сб. статей. – Вып. 5. – Макеевка-Донбасс: МакНИИ. 1977. – С. 35-39.

5. Кузин В. А. Прогноз температуры вентиляционной струи с учетом теплопритоков из выработанного пространства / В. А. Кузин, М. М. Пучков // Сб. Разработка месторождений полезных ископаемых. – Вып. 59. – К. : Техніка, 1981. – С. 29-33.

6. СОУ-Н 10.1.00174088.027:2011. Прогнозування та нормалізація теплових умов у вугільних шахтах. – К. : Міненерговугілля України : МакНИИ. – 2011. – 184 с.

7. Бусыгин К. К. Закономерности изменения концентрации метана в выработанном пространстве вблизи очистной выработки / К. К. Бусыгин, И. Н. Попов, И. Н. Зинченко // В кн.: Вентиляция шахт и рудников. – Л. : ЛГИ, 1978. – Вып. 5. – С. 42-47.

РОЗРАХУНОК СУМАРНОЇ РІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОЇ ДОЗИ ОПРОМІНЕННЯ ПРАЦІВНИКІВ ВУГІЛЬНИХ ШАХТ

О.Г. Кременев, Державний Макіївський науково-дослідний інститут з безпеки робіт у гірничій промисловості, Україна

Наведено методологію розрахунку сумарної річної ефективної дози зовнішнього і внутрішнього опромінення працівників вугільних шахт за рахунок зовнішнього гамма-випромінювання від природних радіонуклідів, що є у вугільних шахтах; інгаляції наявних у шахтній атмосфері ізотопів радону та їх дочірніх радіонуклідів; інгаляції та проковтування виробничого пилу, що містить природні радіонукліди.

Правилами безпеки у вугільних шахтах [1] регламентується проведення контролю за радіаційним станом і оцінка опромінення гірників радіаційними джерелами. Однак керівний документ [2] за яким повинні виконуватись контроль радіаційного стану і оцінка опромінення гірників застарів і не відповідає вимогам діючих правил і норм України [3,4]. Мета доповіді і основна задача – розробка методології розрахунку річної ефективної дози зовнішнього і внутрішнього опромінення працівників вугільних шахт радіаційними джерелами (що містять радіонукліди природного походження) при оцінюванні радіаційного стану вугільної шахти.

Згідно основних санітарних правил [3] до виробництв, на яких може мати місце підвищене опромінення від джерел природного походження працівників, не віднесених до категорії «персонал», належать добування корисних копалин (не уранових) у підземних рудниках і шахтах. Дози опромінення працівників підземних рудників і шахт можуть бути зумовлені [3]: зовнішнім гамма-випромінюванням від природних радіонуклідів, що містяться в сировинних та вторинних продуктах виробництва; інгаляцією виробничого пилу, що містить природні радіонукліди; інгаляцією наявних у повітрі виробничих приміщень ізотопів радону та їх дочірніх радіонуклідів; проковтуванням пилу і дрібних фрагментів; радіоактивним забрудненням відкритих ділянок шкіри.

Кількісні значення меж доз опромінення для працівників вугільних шахт встановлюються в термінах річної ефективної дози зовнішнього та внутрішнього опромінення та еквівалентних доз зовнішнього опромінення згідно норм радіаційної безпеки [4] і основних санітарних норм [3].

Річна ефективна доза опромінення $E_{\text{ш}}$ працівників вугільної шахти за величиною сумарної ефективної дози зовнішнього і внутрішнього опромінення визначається за допомогою формули:

$$E_{\text{ш}} = E_{\gamma} + E_{\text{ДПР}}^{\text{inhal}} + E_{\text{ДПГ}}^{\text{inhal}} + E_{\text{U(Ra)+Th}}^{\text{inhal}} + E_{\text{U(Ra)+Th}}^{\text{ingest}}, \text{ мЗв/рік} \quad (1)$$