

Title Тепловой расчет шахт с термальными водами

Authors Ш.И. Ониани, ОА. Ланчава

Publication date 1977

Book РУКОВОДСТВО ПО РЕГУЛИРОВАНИЮ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ШАХТ

Volume 359

Pages 173-180

Publisher Недра, Москва

А. Н. ЩЕРБАНЬ, О. А. КРЕМНЕВ, В. Я. ЖУРАВЛЕНКО

РУКОВОДСТВО  
ПО РЕГУЛИРОВАНИЮ  
ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА  
ШАХТ

ИЗДАНИЕ ТРЕТЬЕ,  
ПЕРЕРАБОТАННОЕ И ДОПОЛНЕННОЕ



МОСКВА «НЕДРА» 1977

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.

В книге приведены методы расчета и регулирования теплового режима шахт при разработке пологих и крутых пластов, при различных способах вскрытия и на разных глубинах. Рассмотрены шахтные воздухоохладительные установки, холодильные машины и теплообменные аппараты, а также даны рекомендации по их выбору и расчету. Приведены примеры тепловых расчетов шахт и воздухоохладительных установок для пологих и крутых пластов при различных системах охлаждения воздуха в лавах. Значительное место в книге занимают справочные таблицы и диаграммы, необходимые для расчетов.

Книга предназначена для инженерно-технических работников, занимающихся вопросами проектирования и эксплуатации подземных сооружений, а также студентов горных факультетов.

Табл. 76, ил. 154, список лит. — 100 назв.

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Основными направлениями развития народного хозяйства СССР на 1976—1980 гг. предусматривается дальнейшее увеличение роста добычи полезных ископаемых, в связи с чем важное значение приобретает переход на глубокие горизонты на шахтах Донбасса, Кузбасса, рудниках Урала, Криворожского бассейна, Кавказа и Средней Азии. При переходе на глубокие горизонты температура, энтальпия и влагосодержание воздуха повышаются вследствие притока тепла от различных источников (охлаждение горных пород, сжатие воздуха, окислительные процессы, работа машин и механизмов), диффузионных процессов и от других причин. Значительное повышение температуры воздуха наблюдается и в неглубоких шахтах и рудниках, где происходят интенсивные окислительные процессы, а также при строительстве туннелей. В указанных случаях необходимо регулирование теплового режима.

Научными организациями — ИТТФ АН УССР, МакНИИ, ДГИ, ЛГИ, ХГИ, ДПИ, ДонУГИ и другими выполнен большой объем исследовательских работ в области регулирования теплового режима шахт. На основе данных исследований разработаны теория теплообмена в шахтах, методы их теплового расчета и основы проектирования установок для охлаждения рудничного воздуха.

По проектам институтов Донгипрошахт, Днепрогипрошахт, Ростовгипрошахт, Южгипрошахт созданы воздухоохладительные установки для глубин 700—1000 м. Опыт показал, что для больших глубин действующие воздухоохладительные установки будут мало эффективны. В связи с этим в руководстве приводятся данные по расчету и выбору холодильного и воздухоохладительного оборудования для непосредственного охлаждения воздуха в лавах.

В настоящем руководстве в систематизированном виде изложена методика теплового расчета различных подземных сооружений, позволяющая определять параметры рудничного воздуха, выбирать рациональный способ вскрытия, предусматривать мероприятия по предотвращению нагревания рудничного воздуха, а также проектировать установки для регулирования теплового режима шахт. Помимо методики теплового расчета, выбора и расчета оборудования установок, приведены параметры рудничного воздуха, геотермия шахт и теплофизические константы угля и пород для различных районов. Книга иллюстрирована примерами тепловых расчетов подземных выработок с воздухоохладительными установками. В ней

приведены справочные данные, необходимые для тепловых расчетов, выбора и расчета холодильных машин, воздухо- и водоохладителей и другого оборудования.

Соавторами отдельных разделов настоящего руководства являются: В. П. Черняк — подразделов 15.1, 15.2 и 17.1, В. П. Черняк совместно с Н. А. Брайчевой — раздела 18, Э. Н. Малашенко — подраздела 15.3, Э. Н. Малашенко совместно с Л. Б. Зиминим — подразделов — 17.2 и 17.3, С. А. Романовский — раздела 25, Ш. И. Ониани совместно с О. А. Ланчавой — подраздела 15.4, 15.5, Л. В. Дорожук совместно с В. Т. Волошиным и Н. Н. Хохотвой — подразделов 9.3 и 9.4, В. А. Шелиманов совместно с Е. М. Козловым — подразделов 13.3 и 16.3, Э. Р. Гросман совместно с В.С. Шавриным — подразделов 7.3 и 21.5.

Авторы выражают глубокую признательность д-ру техн. наук Ю. Д. Дядькину и кандидатам техн. наук Ю. В. Шувалову, Л. С. Тимофеевскому за ценные замечания при рецензировании рукописи данной книги.

Численные значения  $K$  и  $D$  для диапазонов температур 20—30 и 25—35° С приведены соответственно в приложении XI.

Чтобы определить температуру рудничного воздуха в конце горизонтальных и наклонных выработок гидрошахт, можно использовать следующие расчетные зависимости, полученные из выражений (15.55) и (15.57):

в горизонтальных выработках

$$t_2 = -K + \sqrt{c' + D \left[ t_1 + \frac{k_{\tau} U}{G c_p} (t_{\pi} - t_1) L + \frac{q_0 U L + \sum Q_M}{G c_p} \right]} \text{ } ^\circ\text{C}; \quad (15.58)$$

в наклонных выработках

$$t_2 = -K + \left\{ c' + D \left[ t_1 + \frac{k_{\tau} U}{G c_p} \left( t_{\pi} \pm \frac{t_1 L}{2} \sin \psi - t_1 \right) \pm \frac{\sin \psi}{102,5} + \frac{q_0 U L + \sum Q_M}{G c_p} \right] \right\}^{1/2} \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (15.59)$$

В формулах (15.58) и (15.59)

$$c' = \frac{1}{4l^2} \left( n + \frac{c_p}{\varphi_{\text{пр}r}} \right)^2 + \frac{1}{l} (m + n t_1 + l t_1^2) - \frac{m}{l}. \quad (15.60)$$

Остальные обозначения те же, что и в формулах (15.48)—(15.50).

#### 15.4. Тепловой расчет шахт с термальными водами

При наличии в массиве восходящих потоков гидротермическая теплоотдача горных пород остается одним из основных источников тепла, однако преобладающее значение приобретает теплообмен с термальными водами.

Температура рудничного воздуха в горизонтальных выработках при наличии термальных вод определяется по формулам: в конце выработки

$$t_2 = K_2 + \sqrt{K_2^2 + \frac{1}{l} \left[ i_1 + c (t_{\tau} - 0,5 t_1) + \frac{\sum Q_M}{G} \right] - \frac{m}{l}}; \quad (15.61)$$

в начале выработки

$$t_1 = K_1 + \sqrt{K_1^2 + \frac{1}{l} \left[ i_2 - c (t_{\tau} - 0,5 t_2) - \frac{\sum Q_M}{G} \right] - \frac{m}{l}}, \quad (15.62)$$

где

$$K_2 = -\frac{1}{2l} (n + 0,5c); \quad K_1 = -\frac{1}{2l} (n - 0,5c); \quad (15.63)$$

$$c = \frac{\alpha F \vartheta}{G}; \quad (15.64)$$

$t_{\tau}$  — температура термальных вод, °С;  $\vartheta$  — безразмерная температура [при прямых тепловых расчетах  $\vartheta = (t - t_1)/(t_{\tau} - t_1)$ , при обратных расчетах  $\vartheta = (t - t_2)/(t_{\tau} - t_2)$ ].

Аналитические зависимости для безразмерной температуры имеют вид:

а) в нестационарной стадии

$$\vartheta = K \exp(-\beta Fo Vi^{0,33}) \text{ при } 0,01 \leq Fo \leq 0,3; \quad (15.65)$$

$$\vartheta = K \exp(-\beta Fo^{0,5} Vi^{0,33}) \text{ при } 0,3 < Fo \leq 1,0; \quad (15.66)$$

б) в квазистационарной стадии

$$\vartheta = K \exp(\epsilon Vi^{0,33}), \quad (15.67)$$

где  $K$  — коэффициент пропорциональности (при отводе термальных вод по канаве, имеющей простое перекрытие,  $K = 1,0$ ; при теплоизоляционном перекрытии  $K = 0,925$  и при отводе термальных вод специальной водоотводящей выработкой  $K = 0,852$ );  $\beta, \epsilon$  — экспериментальные поправочные коэффициенты, значения которых приведены в табл. 15.3 и 15.4.

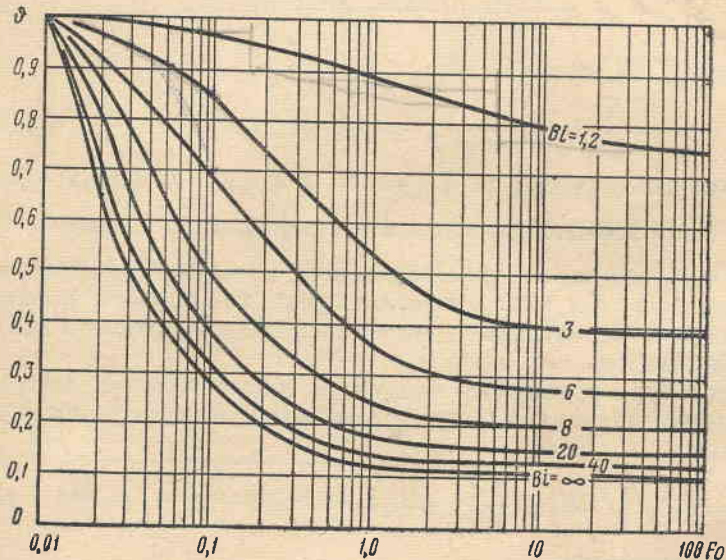


Рис. 15.5. Критериальная зависимость  $\vartheta = f(Fo, Vi)$  при отводе термальных вод по канаве с простым перекрытием

Формулы (15.65)—(15.67) номографированы в широком диапазоне изменения  $Fo$  и  $Vi$  (рис. 15.5, 15.6 и 15.7). Если значение критерия  $Vi > 50$ , можно принять, что  $Vi \approx \infty$ .

Тепловой расчет горизонтальных тупиковых выработок при наличии в массиве термальных вод производится по обычной методике с той лишь разницей, что в призабойном пространстве выработки вместо коэффициента нестационарного теплообмена подставляется коэффициент теплоотдачи  $\alpha$ , так как температура поверхности тепло-

Таблица 15.3

Значения поправочного коэффициента  $\beta$ 

Bi	$0,01 < Fo \leq 0,09$	$0,09 < Fo \leq 0,3$	$0,3 < Fo \leq 0,8$	$0,6 < Fo \leq 1,0$
3—6	2,094—2,437	1,324—1,444	0,461—0,657	0,439—0,595
6—8	2,437—3,652	1,444—2,100	0,657—0,879	0,595—0,750
8—10	3,652—3,871	2,100—2,218	0,879—0,864	0,750—0,735
10—20	3,871—4,425	2,218—2,810	0,864—0,787	0,735—0,653
20—40	4,425—4,619 4,635	2,810—2,708 2,579	0,787—0,748 0,703	0,653—0,612 0,579

Таблица 15.4

Значения поправочного коэффициента  $\varepsilon$ 

Bi	3	6	8	10	20	40	$\infty$
$\varepsilon$	0,625	0,714	0,865	0,786	0,704	0,614	0,554

обмена  $t_{ct} = t_t$ . Для остальной части тупиковой выработки  $k_t = \alpha \phi$ .

Тепловой расчет тупиковых вертикальных и наклонных выработок производится обычным способом, только при расчете призабойного пространства коэффициент нестационарного теплообмена  $k_t$  заменяется коэффициентом теплоотдачи  $\alpha$ .

**Пример 12.** Определить температуру воздуха в конце горизонтальной выработки для всех трех способов отвода термальных вод при следующих условиях:  $t_1 = 20^\circ \text{C}$ ;  $L = 1000 \text{ м}$ ;  $t_r = 42^\circ \text{C}$ ;  $G = 60\,000 \text{ кг/ч}$ ;  $U = 13,6 \text{ м}$ ;  $R_0 = 1,8 \text{ м}$ ;  $q_0 = 0$ ;  $\sum Q_m = 0$ ;  $f = 10,8 \text{ м}^2$ ;  $\varphi_1 = \varphi_2 = 0,9$ ;  $\tau = 100\,000 \text{ ч}$ ;  $B = 825 \text{ мм рт. ст.}$ ;  $\alpha = 8 \text{ ккал/ч} \cdot \text{м} \cdot ^\circ\text{C}$ .

Теплофизические свойства горных пород:  $\lambda = 1,9 \text{ ккал/(ч} \cdot \text{м} \cdot ^\circ\text{C)}$ ;  $c = 0,2 \text{ ккал/(кг} \cdot ^\circ\text{C)}$ ;  $a = 35 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{ч}$ .

В случае отвода термальных вод по канаве с простым перекрытием по приложению X находим  $m = 2,745$ ;  $n = 0,037$ ;  $l = 0,0136$ ;  $1/l = 73,75$ .

По формуле (15.5) определяем энтальпию воздуха:  $i_1 = 2,745 + 0,037 \cdot 20 + 0,0136 \cdot 400 = 9$ ;

$$\frac{m}{l} = 200.$$

По формулам, приведенным в 13.2, находим

$$Bi = \frac{8 \cdot 1,8}{1,9} = 7,8; \quad Fo = \frac{0,0035 \cdot 100\,000}{1,8^2} = 100.$$

По номограмме рис. 15.5 исходя из полученных значений Bi и Fo определяем  $\phi = 0,22$ .

По формуле (15.64)

$$c = \frac{8 \cdot 13,6 \cdot 1000 \cdot 0,22}{60\,000} \approx 0,4.$$



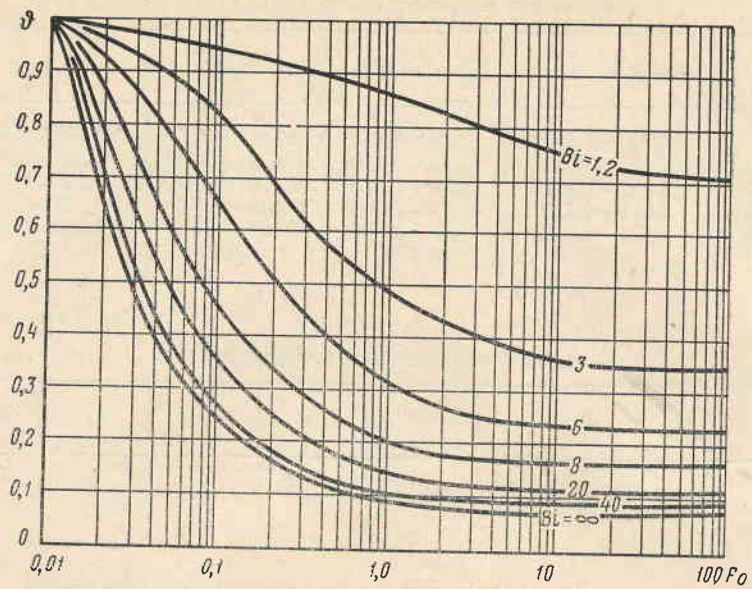


Рис. 15.6. Критериальная зависимость  $\phi = f(Fo, Bi)$  при отводе термальных вод по канаве с теплоизоляционным перекрытием

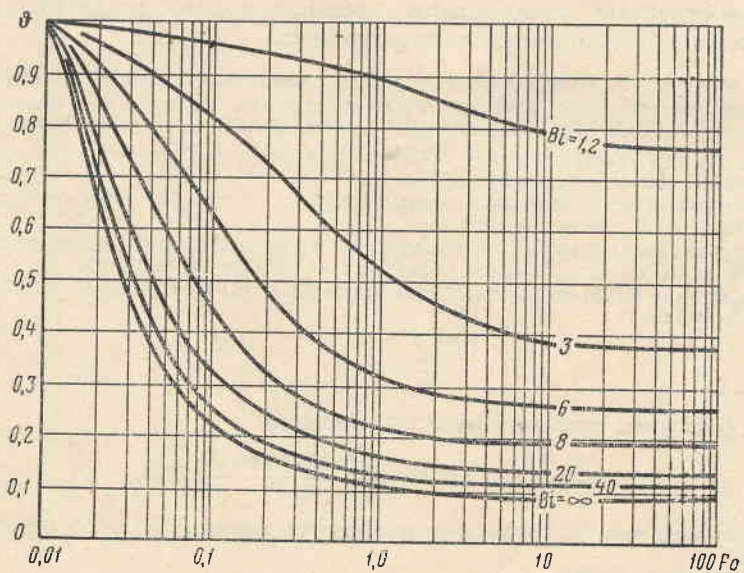


Рис. 15.7. Критериальная зависимость  $\phi = f(Fo, Bi)$  при отводе термальных вод по специальной водоотводящей выработке

По формуле (15.63) определяем

$$K_2 = -\frac{1}{2 \cdot 0,0136} (0,037 + 0,5 \cdot 0,4) = -8,7;$$

по формуле (15.61) находим

$$t_2 = 8,7 + \sqrt{8,7^2 + 73,75 [9 + 0,4 (42 - 0,5 \cdot 20)]} - 200 = 29,7^\circ \text{C}.$$

В случае отвода термальных вод по канаве с теплоизоляционным перекрытием по номограмме рис. 15.6 определяем  $\phi = 0,19$ .

Тогда

$$c = \frac{8 \cdot 13,6 \cdot 1000 \cdot 0,19}{60\,000} = 0,34;$$

$$K_2 = -\frac{1}{2 \cdot 0,0136} (0,037 + 0,5 \cdot 0,34) = -7,6;$$

$$t_2 = -7,6 + \sqrt{7,6^2 + 73,75 [9 + 0,34 (42 - 0,5 \cdot 20)]} - 200 = 28,6^\circ \text{C}.$$

В случае отвода термальных вод по специальной водоотводящей выработке по рис. 15.7 находим  $\phi = 0,17$ ;

$$c = \frac{8 \cdot 13,6 \cdot 1000 \cdot 0,17}{60\,000} = 0,308;$$

$$K_2 = -\frac{1}{2 \cdot 0,0136} (0,037 + 0,5 \cdot 0,308) = -7,0;$$

$$t_2 = -7 + \sqrt{7^2 + 73,75 [9 + 0,308 (42 - 0,5 \cdot 20)]} - 200 = 27,8^\circ \text{C}.$$

Температура воздуха без учета термальных вод  $t_{\text{п}} = t_{\text{т}} = 42^\circ \text{C}$ .  
Определяем  $K_{\text{и}_\tau}$  по рис. 13.2.  $K_{\text{и}_\tau} = 0,35$ .

По формуле (13.13)  $k_\tau = \frac{1,9 \cdot 0,35}{1,8} = 0,37$ .

По формуле (15.7)  $A_1 = \frac{0,37 \cdot 13,6 \cdot 1000}{60\,000} = 0,084$ .

По приложению X  $K_1 = 1,68$ ,  $K_2 = 19,05$ .  
По формуле (15.17)

$$t_2 = -(1,68 + 19,05 \cdot 0,084) + \{(1,68 + 19,05 \cdot 0,084)^2 + 73,75 [9 + 0,84 \times \\ \times (42 - 0,5 \cdot 20)] - 200\}^{\frac{1}{2}} = 22,7^\circ \text{C}.$$

### 15.5. Определение предельной глубины разработки месторождений без искусственного охлаждения воздуха

Одним из критериев для оценки схем вскрытия и подготовки шахтных полей, с точки зрения теплового режима шахт, является предельная глубина разработки без применения искусственного охлаждения воздуха. Для ее определения применим метод цепи моделей выработок [38].

Сущность метода состоит в том, что цепь горных выработок заменяется цепью моделей выработок периметром  $U = 1$  м с постоянным по их длине расходом воздуха  $G = 1$  кг/ч и постоянным для всех моделей значением  $k_t$ , равным  $1$  ккал/(ч·м<sup>2</sup>·°C). Зависимость между температурой и влагосодержанием воздуха в цепи моделей предлагается такой же, как и в выработках в натуре.

При этих условиях длина каждой модели выработки определяется по формуле

$$l_{mi} = \frac{k_{ti} U l_i}{G_i}. \quad (15.68)$$

Ввиду того что величины  $k_t$  и  $G$  для модели были приняты равными  $1$  и в формулу не вошли, размерность  $l_{mi}$  выражается в килокалориях на килограмм — градус Цельсия, причем длина  $l_{mi}$  называется фиктивной длиной модели выработки.

Суммарная фиктивная длина цепи модели выработок

$$l_{\text{общ}} = \sum_{i=0}^{i=n} l_{mi}. \quad (15.69)$$

Помимо этого, для соблюдения теплового подобия модели и натуре суммарное тепловыделение в них от окисления, местных источников тепла и сжатия воздуха на килограмм протекающего воздуха (удельное тепловыделение) должно быть одинаковым.

Для моделей принято  $G = 1$  кг/ч, поэтому тепловыделение в модели каждой выработки определяется по формуле

$$q_{mi} = \frac{Q_{окi} + Q_{mi} + Q_{сжi}}{G} \text{ ккал/кг}, \quad (15.70)$$

где  $Q_{окi}$ ,  $Q_{mi}$ ,  $Q_{сжi}$  — тепловыделения от окисления, местных источников тепла и сжатия воздуха в выработке, ккал/ч.

Суммарное тепловыделение во всей цепи модели выработок

$$q_{\text{общ}} = \sum_{i=0}^{i=n} Q_{mi}. \quad (15.71)$$

Предельной глубиной  $H_m$  разработки месторождения шахты без искусственного охлаждения воздуха при заданной схеме вскрытия и подготовки считается глубина, на которой при положении лав у границ шахтного поля или блока будет предельно допустимая правилами безопасности температура воздуха в конце очистного забоя.

Для условий Донецкого бассейна при этажном способе вскрытия

$$H_m = a \pm \sqrt{a^2 + b}, \quad (15.72)$$

где

$$a = 0,5H_1 + 277 + \frac{\sum l_i + 0,0825}{2 \operatorname{ctg} \psi l_{y, \kappa}} - \frac{q_{y, \kappa}}{0,0568 l_{y, \kappa}}; \quad (15.73)$$

$$b = -555 \cdot H_1 - \frac{15,76 \sum l_i + 0,0303 h_{с.л} l_{м.л} - q_{у.к} H_1 \operatorname{ctg} \psi - \sum Q_i + 6,4}{0,0284 \operatorname{ctg} \psi l_{у.к}} \quad (15.74)$$

Значения величин, входящих в формулы (15.73) и (15.74):  $H_1$  — глубина пересечения нижнего пласта воздухоподающим стволом, м;

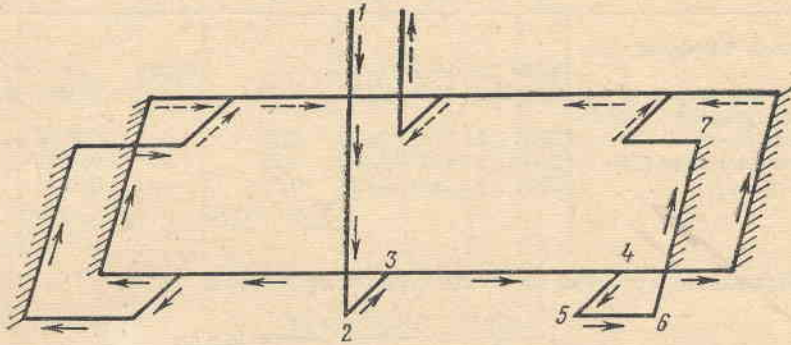


Рис. 15.8. Принципиальная схема проветривания шахты

$l_i$  — длина лавы, м;  $\psi$  — угол падения пласта, градус;  $l_{у.к}$  — удельная длина модели выработки для этажного откаточного квершлага (длина модели выработки на 1 м квершлага) ( $l_{у.к}$  — определяется по формуле (15.68) при  $l_i = 1$  м);  $q_{у.к}$  — тепловыделения 1 м длины квершлага, отнесенные к 1 кг воздуха;  $h_{с.л}$  — превышение середины лавы над откаточным штреком, м;  $l_{м.л}$  — фиктивная длина лавы, м.

Пример 13. Определить предельную глубину  $H_m$  разработки при этажном способе вскрытия. Схема проветривания шахты приведена на рис. 15.8. Исходные данные и результаты расчета величин, входящих в формулы (15.73) и (15.74), приведены в табл. 15.5.  $H_1 = 1000$  м. Угол падения пластов  $\psi = 40^\circ$ . Наклонная высота этажа  $L = 160$  м.

Таблица 15.5

Исходные данные расчета величин, входящих в формулы (15.73) и (15.74)

Выработка (обозначение на рис. 15.8)	$G$ , кг/ч	$U$ , м	$f$ , м <sup>2</sup>	$L$ , м	$\tau$ , ч	$R_0$ , м	$\lambda$ , ккал/(м·ч·°С)
Главный квершлаг (2—3)	280 000	14,2	14,0	—	47 000	2,1	1,87
Грушовой штрек (3—4)	119 000	13,4	12,5	2500	31 500	1,99	1,52
Промежуточный квершлаг (4—5)	68 500	9,3	6,0	200	4 000	1,38	1,52
Откаточный штрек (5—6)	68 500	9,3	6,0	500	4 000	1,38	1,52
Лавы (6—7)	47 000	7,8	2,7	160	5	0,925	1,52

Выработка (обозначение на рис. 15.8)	$a, 10^4, \text{м}^2/\text{ч}$	$\epsilon$	$\alpha, \text{ккал}/(\text{ч} \cdot \text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$	$\beta, \text{ккал}/(\text{ч} \cdot \text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$	$Q_i, \text{ккал}/\text{кг}$	$q_y \cdot 10^3, \text{ккал}/(\text{кг} \cdot \text{м})$	$l_i, \text{ккал}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$	$l_y \cdot 10^3, \text{ккал}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$
Главный кварцлаг (2-3)	33,0	2,2	17,4	0,35	—	0,25	—	—
Групповой штрек (3-4)	29,3	3,2	10,9	0,33	0,99	—	0,081	0,0177
Промежуточный кварцлаг (4-5)	29,3	2,2	11,5	0,64	0,29	—	0,0018	—
Откаточный штрек (5-6)	29,3	2,2	11,5	0,64	0,75	—	0,046	—
Лава (6-7)	29,3	3,0	23,8	5,75	0,72	—	0,153	—
					$\sum Q_i = 2,75$		$\sum l_i = 0,3$	

Превышение середины лавы над откаточным штреком

$$h_{с. л} = \frac{L \sin \psi}{2} = \frac{160 \cdot \sin 40^\circ}{2} = 51,4 \text{ м.}$$

Определяем величины  $a$  и  $b$  по формулам (15.73) и (15.74):

$$a = 0,5 \cdot 1000 + 277 + \frac{(0,3 + 0,0825) 10^3}{2 \cdot 1,192 \cdot 0,0177} - \frac{0,25}{0,0568 \cdot 0,0177} = 9570;$$

$$b = -555 \cdot 1000 - [(15,76 \cdot 0,3 + 0,0303 \cdot 51,4 \cdot 0,153 - 0,25 \cdot 10^{-3} \cdot 1000 \cdot 1,192 - 2,75 + 6,24) \cdot 10^6] : 0,0284 \cdot 1,192 \cdot 0,0177 = 14,2 \cdot 10^6.$$

По формуле (15.70) определяем предельную глубину

$$H_m = 9570 - \sqrt{9570^2 - 14,2 \cdot 10^6} = 770 \text{ м.}$$

## 16. ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ ЛАВ

### 16.1. Тепловой расчет лав на пологих пластах

Температура воздуха в конце лавы  $t_2$  определяется по формуле

$$t_2 = \frac{1 - e^{-\Gamma \Phi}}{\Gamma} \left( T + \frac{t_1 \Gamma}{e^{\Gamma \Phi} - 1} + \frac{q_0 U L + \sum Q_m}{G c_p} \right) ^\circ\text{C.} \quad (16.1)$$

Температура воздуха в начале лавы  $t_1$ , необходимая для обеспечения заданной температуры  $t_2$ , рассчитывается по формуле

$$t_1 = \frac{e^{\Gamma \Phi} - 1}{\Gamma} \left( \frac{t_2 \Gamma}{1 - e^{-\Gamma \Phi}} - T - \frac{q_0 U L + \sum Q_m}{G c_p} \right) ^\circ\text{C,} \quad (16.2)$$

где  $\Phi$  — фактор влажности, определяется по формулам (15.23) и (15.24);  $\Gamma$  — фактор теплообмена лав,

$$\Gamma = \frac{k_\tau U L + G_y c_y I_y + G_B c_B + K_X U_X L}{G c_p}; \quad (16.3)$$