

ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ И ГОРНЫХ МАССИВАХ

*Методические указания к практическим занятиям
для студентов магистратуры направления 20.04.01*

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2021**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования

Санкт-Петербургский горный университет

Кафедра безопасности производств

ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ И ГОРНЫХ МАССИВАХ

*Методические указания к практическим занятиям
для студентов магистратуры направления 20.04.01*

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2021

УДК 697.1:536.2 (073)

ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ И ГОРНЫХ МАССИВАХ: Методические указания к практическим занятиям / Санкт-Петербургский горный университет. Сост.: *С.Г. Гендлер, И.Р. Фазылов*. СПб, 2021. 45 с.

Представлена процедура выбора исходных данных для выполнения тепловых расчетов тепловых режимов воздушного потока и горного массива. Изложены методики вычисления температурных полей в горных выработках и окружающих их пород. Приведены примеры расчета. Представлен формат проведения и выполнения практического занятия.

Предназначены для студентов, обучающихся по основной профессиональной образовательной программе высшего образования по направлению подготовки 20.04.01 «Техносферная безопасность», направленности «Управление безопасностью на предприятиях минерально-сырьевого комплекса» (уровень магистратуры).

Научный редактор проф. *Т.А. Василенко*

Рецензент канд. тех. наук. *Е.А. Савенков* (ОАО НИПИИ «Ленметроги-протранс»)

© Санкт-Петербургский
горный университет, 2021

ВВЕДЕНИЕ

Тепловые процессы, протекающие в воздушной среде и горных массивах при освоении минеральных, энергетических и пространственных ресурсов недр, определяют безопасность горнорабочих при подземной и открытой разработке месторождений полезных ископаемых. Практическое изучение особенностей формирования температурных полей в системе воздушная среда – горных массив разработок дает возможность студентам не только оценить степень влияния этих процессов на термодинамические параметры рудничного воздуха и пород, но и установить основные направления управления ими для повышения эффективности производственной деятельности.

Методические указания для выполнения практических заданий дисциплине «Тепловые процессы в горных выработках и горных массивах», главным образом ориентированы, на студентов, изучающих дисциплину «Тепловые процессы в горных выработках и горных массивах», по направлению подготовки 20.04.01 «Техносферная безопасность», направленности «Управление безопасностью на предприятиях минерально-сырьевого комплекса». Они также могут быть использованы при проведении практических занятий по дисциплине «Тепловой режим глубоких шахт и рудников» специализации «Технологическая безопасность и горноспасательное дело» специальности 21.05.04 «Горное дело».

Использование методических указаний для проведения практических занятий, дает возможность студентам, изучающим вышеперечисленные учебные дисциплины, для более глубокого понимания материала, излагаемого в соответствующих учебных курсах.

Методические указания, помимо зависимостей для вычисления температурных полей и примеров расчета, включают исходные данные, необходимые для их осуществления и процедуру выбора этих данных.

Условные обозначения

- a - коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$;
 a_m - коэффициент теплопроводности (диффузии), $\text{м}^2/\text{с}$;
В - барометрическое давление, МПа;
с - удельная теплоемкость, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$;
d - диаметр, м;
F - площадь поверхности, м^2 ;
f - сечение, м^2 ;
g - ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$;
G - расход воздуха, $\text{кг}/\text{с}$;
H - глубина, м;
h - высота, м;
i - энтальпия, $\text{кДж}/\text{кг}$;
j - удельные влаговыделения, $\text{кг}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$;
J - влаговыделения, $\text{кг}/\text{с}$;
k - коэффициент теплопередачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot^\circ\text{C})$;
l - длина, м;
L - удельная теплота замерзания воды, $\text{Дж}/\text{кг}$ ($L = 335 \text{ кДж}/\text{кг}$);
N - мощность, Вт, кВт;
P - парциальное давление, МПа;
q - удельные тепловыделения, $\text{Вт}/\text{м}^2$;
Q - количество теплоты, Вт, кВт;
S - удельная теплота испарения (конденсации) воды, $\text{кДж}/\text{кг}$;
 R_0 - универсальная газовая постоянная, $\text{Дж}/(\text{кмоль}\cdot\text{K})$ ($R_0 = 8,314 \text{ кДж}/(\text{кмоль}\cdot\text{K})$);
 R_t - радиус теплового влияния, м;
r - пространственная координата, перпендикулярная оси выработки, м;
T - температура пород, $^\circ\text{C}$, K;
t - температура воздуха, $^\circ\text{C}$, K;
U - периметр, м;
v - скорость, $\text{м}/\text{с}$;
w - влагосодержание пород, %; доли единиц;
x - влагосодержание, $\text{кг}/\text{кг}$, $\text{г}/\text{кг}$;
y - пространственная координата, направленная вдоль оси выработки, м;

- α - коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·°С);
 β - коэффициент массоотдачи, кг/(м²·с·МПа);
 δ - безразмерный радиус теплового влияния;
 $\varepsilon_{\text{ш}}$ - коэффициент шероховатости поверхности;
 η - коэффициент полезного действия;
 λ - коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С);
 $\lambda_{\text{м}}$ - коэффициент массопроводности, кг/(м·с·МПа);
 ν - кинематическая вязкость, м²/с;
 ξ - безразмерный радиус (глубина) промерзания;
 ρ - плотность, кг/м³;
 σ - геотермический градиент, °С/м;
 τ - время, с, ч;
 φ - влажность воздуха, %, доли единиц;
 ψ - угол наклона выработки, град.;
 ω - длительность годового периода, с, ч;
 k_{τ} - коэффициент нестационарного теплообмена, Вт/(м²·°С);
 $k_{\text{агр}}$ - коэффициент интенсификации теплообмена при агрегатных переходах влаги;
 β_{τ} - коэффициент нестационарного массообмена, кг/(м²·с·МПа);

Числа подобия

Тепловые:

Bi - Био

$$\left(Bi = \frac{\alpha d_{\text{эк}}}{2\lambda_n} \right);$$

F₀ - Фурье

$$\left(F_0 = \frac{4a_n \tau}{d_{\text{эк}}^2} \right);$$

Pd – Предводителяева $\left(Pd = \pi d_{\text{эк}}^2 / (2\omega a_n) \right)$

K₀ - Коссовича ($K_0 = wL\rho_{\text{пт}} / (C_{\text{пм}}\rho_{\text{пм}}[T_{\text{ф}} - t])$);

1. ВЫБОР ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ РАСЧЕТОВ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК И ГОРНЫХ МАССИВОВ

1.1. Расчётные параметры наружного воздуха устанавливаются по СП 131.13330.2012 Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99* (с изменениями п 1, 2).

1.2. Температура воздуха, подаваемого в горные выработки, принимается в зависимости от значений параметров наружного воздуха и использования различных мероприятий по его нагреву (охлаждению) (рис. 1).

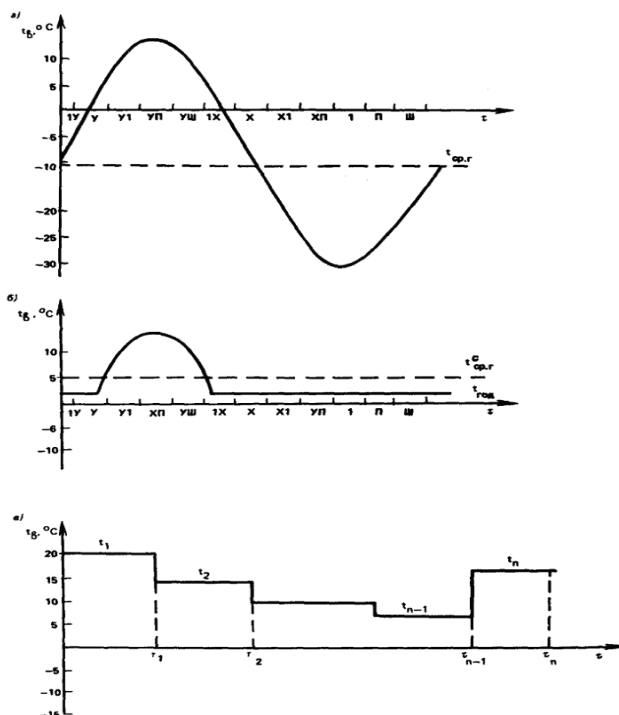


Рис. 1. Характер изменения температуры воздуха, поступающего в горные выработки; а - гармонический закон (изменение температуры атмосферного воздуха); б - изменение температуры воздуха при его подогреве до положительной температуры в зимнее время; в - ступенчатый закон изменения температуры воздуха

1.3. Температура пород, окружающих горные выработки, определяется по формуле

$$T_n = T_{н.с} + \sigma(H - H_{н.с}) \quad (1)$$

Значения температуры пород нейтрального слоя $T_{н.с}$, глубины его залегания $H_{н.с}$ и геотермического градиента σ устанавливаются на основании данных инженерно-геологических изысканий. При их отсутствии температура пород $T_{н.с}$ на глубине $H_{н.с}$, составляющей 25 м, принимается на 3 °С выше среднегодовой температуры воздуха в данном районе, а величина σ равной 0,03 °С/м.

1.4. Теплофизические и влагофизические свойства горных пород: теплопроводность λ_n , теплоемкость c_n , температуропровод-

ность a_n , плотность ρ_n , коэффициент диффузии a_{m_n} зависят от их происхождения, условий формирования, литологической характеристики, влажности, температуры, особенностей залегания в земной коре и изменяются в широких пределах: λ_n изменяется от 0,2 до 8,2 Вт/(м·°С); c_n - от 0,5 до 1,2 кДж/(кг·°С); a_n - от 10^{-7} до $22,5 \cdot 10^{-7}$ м²/с; ρ_n - от 1100 до 5100 кг/м³; a_{m_n} - от 10^{-8} до $20 \cdot 10^{-8}$ м²/с.

Значения теплофизических и влагофизических свойств горных пород следует принимать в соответствии с данными экспериментальных исследований, проведенных в условиях конкретных климатических зон, горно-промышленных районов или полей. Ориентировочные значения теплофизических и влагофизических свойств некоторых типов горных пород приведены в прил. 1 (табл. 1, 2, рисунок).

1.5. Термодинамические свойства воздуха: плотность ρ_v , теплоемкость c_v , теплопроводность λ_v , температуропроводность a_v , кинематическая вязкость ν_v , парциальные давления насыщенного $P_{нас}$ и ненасыщенного пара $P_{пар}$, концентрация водяного пара насыщенного воздуха K , влагосодержание x , удельная теплота парообразования S , энтальпия i устанавливаются в зависимости от температуры t и относительной влажности ϕ воздуха по данным прил. 2 (табл. 1) и формулам:

$$P_{\text{нас}} = 1,33 \cdot 10^{-4} \exp\left(\frac{360 + 18,7t}{236 + t}\right); \quad (2)$$

$$P_{\text{пар}} = \varphi P_{\text{нас}}; \quad (3)$$

$$K = \varphi K_{\text{нас}}; \quad (4)$$

$$x = 0,622 P_{\text{пар}} / (B - P_{\text{пар}}); \quad (5)$$

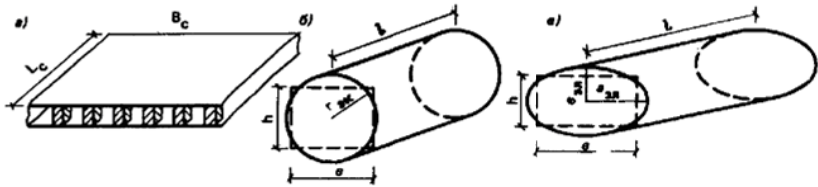


Рис. 2. Геометрические модели формы выработок ПС
a - шелеобразная; *б* - цилиндрическая с сечением круговой формы;
в - цилиндрическая с сечением эллиптической формы

$$S = 2500 - 2,38t; \quad (6)$$

$$i = 1005t + (2500 + 1,8068t) x. \quad (7)$$

Коэффициент диффузии воздуха при нормальных условиях $t = 0 \text{ }^\circ\text{C}$, $B = 0,101 \text{ МПа}$ принимается равным $2,09 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$. Для пересчета коэффициента диффузии на любую температуру и давление следует использовать формулу

$$a_{m_b} = \frac{5,25 \cdot 10^{-11} (t + 273)^{1,89}}{B}. \quad (8)$$

Коэффициент массопроводности воздуха λ_{m_b} , $\text{кг}/(\text{м} \cdot \text{с} \cdot \text{МПа})$ в зависимости от температуры и давления рассчитывается по формуле

$$\lambda_{m_b} = 4,16 \cdot 10^{-10} (t + 273)^{1,89} / B. \quad (9)$$

1.6. Схематизацию геометрических параметров, характеризующих размеры и форму ПС, следует производить в зависимости от соотношений между длиной l , шириной b и высотой выработок h , а также времени их существования τ :

при $l/b \leq 2$ ПС принимается щелеобразной формы, а горный массив, окружающий его, в виде полуограниченного пространства с плановыми размерами, соответствующими размерам горной выработки (рис. 2, а);

При $l/b > 2$ геометрическая форма выработок принимается:

в случае $\tau \leq 0,5r_{\text{эк}}^2/a_{\text{п}}$ - щелеобразной с размерами поперечного сечения, равными ширине и высоте выработки;

в случае $\tau > 0,5r_{\text{эк}}^2/a_{\text{п}}$ и $b/h \leq 2$ - цилиндрической с круговой формой поперечного сечения (рис. 2, б);

в случае $\tau > 0,5r_{\text{эк}}^2/a_{\text{п}}$ и $b/h > 2$ - цилиндрической с эллиптической формой поперечного сечения (рис. 2, в).

В приведенных соотношениях значение $r_{\text{эк}}$ устанавливается по величине периметра выработки $r_{\text{эк}} = U_{\text{выр}}/2\pi$.

2. РАСЧЕТ ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЙ ОТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ

2.1. Тепловыделения от энергетических источников теплоты определяются потребляемой $N_{\text{потр}}$ или установленной $N_{\text{уст}}$ мощностью и зависят от коэффициента полезного действия двигателя η и коэффициента, характеризующего степень их загрузки $k_{\text{загр}}$. Величина $k_{\text{загр}}$ принимается равной 0,5 - 0,7.

2.2. Тепловыделения при работе электрооборудования рассчитываются по формуле

$$Q_{\text{эл}} = m_{\text{эл}} N_{\text{потр}}, \quad (10)$$

где $m_{\text{эл}}$ - коэффициент электрических потерь, величина которого принимается равной для трансформаторов - 0,05; для осветительных приборов - 1; для кабелей - 0,01 на 1000 м длины кабеля.

2.3. Тепловыделения при работе насосов составляют:

$$Q_{\text{нас}} = (1 - \eta) k_{\text{загр}} N_{\text{уст}}. \quad (11)$$

Тепловыделения при работе транспорта на электрической тяге вычисляются по формуле

$$Q_{эл.тр} = q_{эл}A_{тр}l \pm 9,81A_{тр}\Delta H, \quad (12)$$

где $A_{тр}$ - средняя за сутки масса транспортируемого в единицу времени груза, кг/с; $q_{эл}$ - удельные тепловыделения от работы электровозного транспорта, составляющие для электровозов 0,63 - 0,83 Дж/(кг·м); для ленточных конвейеров 2,5 Дж/(кг·м); ΔH - разница между глубинами расположения начала и конца выработки, м; знак «+» принимается при перемещении груза вниз, и знак «-» вверх.

2.4. Тепловыделение при погрузочно-разгрузочных работах устанавливается:

при погрузочных работах (складирование груза)

$$Q_{пог} = k_{загр}N_{пог} - 4,9A_{тр}\Delta h; \quad (13)$$

при разгрузочных работах

$$Q_{раз} = k_{загр}N_{пог} + 4,9A_{тр}\Delta h; \quad (14)$$

где Δh - средняя высота погрузки (разгрузки), м.

2.5. Тепловыделения при работе транспортных машин с двигателями внутреннего сгорания вычисляются по формуле

$$Q_{дв.сг} = k_{загр}G_{топ}q_{топ}, \quad (15)$$

где $G_{топ}$ - часовой расход топлива, кг/с; $q_{топ}$ - удельные тепловыделения при сгорании (теплотворная способность) топлива, Дж/кг:

бензин	43750
керосин	42960
дизельное	
автотракторное.....	42620
соляровое масло	42630
моторное топливо	41370

2.6. Тепловыделения от одновременно работающих в ПС людей составляют:

$$Q_{л} = q_{л}n_{л}, \quad (16)$$

где $n_{\text{л}}$ - количество работающих людей, чел.; $q_{\text{л}}$ - удельные тепловыделения человека, составляющие при легкой работе 120 - 140 Вт; при работе средней тяжести 210 - 290 Вт; при тяжелой работе 410 - 580 Вт.

Пример. Рассчитать общее количество теплоты, выделяемое в ПС при работе: трансформатора, потребляющего мощность 100 кВт, осветительных приборов, мощностью 5 кВт, электровоза, транспортирующего по горизонтальной выработке, длиной 1000 м груз в количестве 20 кг/с; электропогрузчика, потребляющего при разгрузке с высоты $\Delta h = 3$ м груза в количестве 10 кг/с мощностью в 10 кВт ($k_{\text{загр}} = 0,6$); и 5 рабочих, выполняющих работу средней тяжести.

Решение.

По формулам (10), (12), (13) и (16) имеем:

$$Q_{\text{эл.тран}} = 0,05 \cdot 100 \cdot 10^3 = 5000 \text{ Вт};$$

$$Q_{\text{эл.осв}} = 1 \cdot 5 \cdot 10^3 = 5000 \text{ Вт};$$

$$Q_{\text{эл.тр}} = 0,83 \cdot 20 \cdot 1000 = 16600 \text{ Вт};$$

$$Q_{\text{эл.погр}} = 0,6 \cdot 10 \cdot 10^3 + 4,9 \cdot 10 \cdot 3 = 5850 \text{ Вт};$$

$$Q_{\text{л}} = 290 \cdot 5 = 1450 \text{ Вт}.$$

Общее количество теплоты ΣQ будет равно

$$\Sigma Q = 5000 + 5000 + 16600 + 5850 + 1450 = 33900 \text{ Вт} = 34 \text{ кВт}.$$

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТЕПЛО - И МАССООТДАЧИ

3.1. Коэффициент теплоотдачи от воздуха к горным породам при скорости движения воздуха, большей 0,5 м/с, рассчитывается по формуле

$$\alpha = 0,029 \varepsilon_{\text{ш}} \lambda_{\text{в}} / d_{\text{эк}} \text{Re}^{0,8}, \quad (17)$$

где величина коэффициента шероховатости $\varepsilon_{\text{ш}}$ принимается в соответствии с данными работы и составляет (1,2 - 1,5), а $d_{\text{эк}}$ выбирается по соотношению $d_{\text{эк}} = 4f_{\text{выр}}/U_{\text{выр}}$.

При скорости движения воздуха менее 0,5 м/с коэффициент теплоотдачи следует принимать равным 4 - 8 Вт/(м²·°С).

3.2. Для ориентировочной оценки коэффициента массоотдачи от поверхности горного массива к воздуху может быть использо-

вано соотношение

$$\beta_{\pi} = \alpha \frac{\lambda_{mB}}{\lambda_B}. \quad (18)$$

где α - рассчитывается по формуле (17)

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛО - И МАССООБМЕНА МЕЖДУ ВОЗДУХОМ И ПОРОДАМИ

4.1. Величину коэффициента нестационарного теплообмена для горной выработки щелеобразной формы следует вычислять по формуле

$$k_{\tau_m} = \alpha[1 - f(z)], \quad (19)$$

где $z = \alpha/\lambda_{\pi} \sqrt{a_{\pi} \tau}$, а значения функции $f(z)$ приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения функции $f(z)$

z	f(z)	z	f(z)	z	f(z)	z	f(z)
0,0	0,0000	2,5	0,7928	11	0,9487	40	0,9859
0,1	0,1036	3,0	0,8207	12	0,9530	45	0,9875
0,2	0,1910	3,5	0,8454	13	0,9566	50	0,9887
0,3	0,2654	4,0	0,8634	14	0,9597	60	0,9906
0,4	0,3202	4,5	0,8777	15	0,9624	70	0,9919
0,5	0,3843	5,0	0,8872	16	0,9647	80	0,9929
0,6	0,4323	5,5	0,8974	17	0,9668	90	0,9937
0,7	0,4741	6,0	0,9060	18	0,9686	100	0,9944
0,8	0,5109	6,5	0,9132	19	0,9703	110	0,9949
0,9	0,5435	7,0	0,9194	20	0,9718	120	0,9953
1,0	0,5724	7,5	0,9248	22	0,9744	130	0,9957
1,2	0,6214	8,0	0,9295	24	0,9765	140	0,9960
1,4	0,6614	8,5	0,9336	26	0,9783	150	0,9962
1,6	0,6975	9,0	0,9373	28	0,9799	160	0,9964
1,8	0,7217	9,5	0,9406	30	0,9812	180	0,9968
2,0	0,7434	10,0	0,9436	35	0,9839	200	0,9971

При значениях коэффициента теплоотдачи α , превосходя-

щих 30 Вт/(м²·°C), для определения $k_{\tau_{ш}}$ рекомендуется использовать формулу

$$k_{\tau_{ш}} = \lambda_{п} / \sqrt{\pi a_{п} \tau}. \quad (20)$$

4.2. Для цилиндрической выработки ПС с круговой формой поперечного сечения величину $k_{\tau_{ц}}$ рассчитывать по формулам:

при $0 \leq \tau \leq r_{эк}^2 / a_{п}$

$$k_{\tau_{ц}} = \alpha [1 - \text{Bi} / \text{Bi}' f(z)]; \quad (21)$$

при $\tau > r_{эк}^2 / a_{п}$

$$k_{\tau_{ц}} = \frac{\alpha}{1 + \text{Bi} \ln(1 + \sqrt{\tilde{\gamma} F_0})}, \quad (22)$$

где $\text{Bi}' = \text{Bi} + 0,375$; $z = \text{Bi}' \sqrt{F_0}$, значения функции $f(z)$ устанавливаются по данным табл. 2, значения параметра $\tilde{\gamma}$ приведены ниже:

Bi	0,2	0,5	1	2,5	10	∞
$\tilde{\gamma}$	1,8	2	2,2	2,5	2,9	π

При $\alpha > 30$ Вт/(м²·°C) расчёт $k_{\tau_{ц}}$ можно выполнять с использованием зависимости

$$k_{\tau_{ц}} = \frac{\lambda_{п}}{r_{эк}} (0,375 + 1 / \sqrt{\pi F_0}). \quad (23)$$

4.3. Коэффициент нестационарного теплообмена для выработок с поперечным сечением эллиптической формы следует определять по формуле

$$k_{\tau_{эл}} = b_{\tau} k_{\tau_{ц}}, \quad (24)$$

где b_τ поправка к коэффициенту нестационарного теплообмена, учитывающая отклонение геометрической формы поперечного сечения от круга с радиусом $r_{эк}$ и определяемая по номограмме на рис. 3 или по формуле

$$b_\tau = \frac{\ln \delta}{\ln \left\{ \sqrt{M[1 + 0,25N_\delta^2 + 1]} + \sqrt{M[1 + 0,25N_\delta^2 - 1]} \right\}}, \quad (25)$$

где

$$M = \frac{1 - k_{пр}}{2(1 + k_{пр})}; \quad N_\delta = (\delta^2 - 1) \left(1,5 \sqrt{\frac{1 + k_{пр}}{1 - k_{пр}}} - \sqrt{\frac{k_{пр}}{1 - k_{пр}^2}} \right)^2 + \frac{4k_{пр}}{1 - k_{пр}^2};$$

$$k_{пр} = \frac{h}{b}.$$

Безразмерный радиус теплового влияния $\delta = R_t/r_{эк}$ рассчитывается по формулам:

$$\delta = 0,837 \ln^{2,64} [2,72(1 - \sqrt{\tilde{\gamma}F_0})] \quad \text{при } 1 \leq F_0 \leq 50; \quad (26)$$

$$\delta = 2,72(1 + \sqrt{\tilde{\gamma}F_0}) \quad \text{при } F_0 > 50. \quad (27)$$

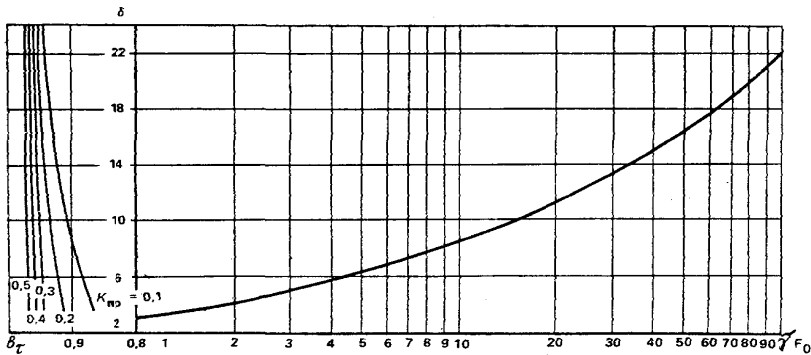


Рис 3. Номограмма для определения поправки коэффициенту нестационарного теплообмена b_τ , учитывающей отклонение геометрической формы поперечного сечения от круговой формы

4.4. Коэффициент нестационарного теплообмена k_{τ} для выработок, пройденных в породах, имеющих различные значения коэффициентов теплопроводности вдоль напластования λ_{\parallel} и перпендикулярно ему λ_{\perp} (рис. 4, а) вычисляется по формулам (19) - (22) при:

$$r_{\text{эк}} = \frac{b}{\pi} \sqrt{\frac{\lambda_{\perp}}{\lambda_{\parallel}}} \left(1 + \frac{h}{b} \sqrt{\frac{\lambda_{\parallel}}{\lambda_{\perp}}} \right); \quad (28)$$

$$k_{\text{пр}} = \frac{h}{b} \sqrt{\frac{\lambda_{\parallel}}{\lambda_{\perp}}}, \quad (29)$$

где $\lambda = 0,5(\lambda_{\parallel} + \lambda_{\perp})$.

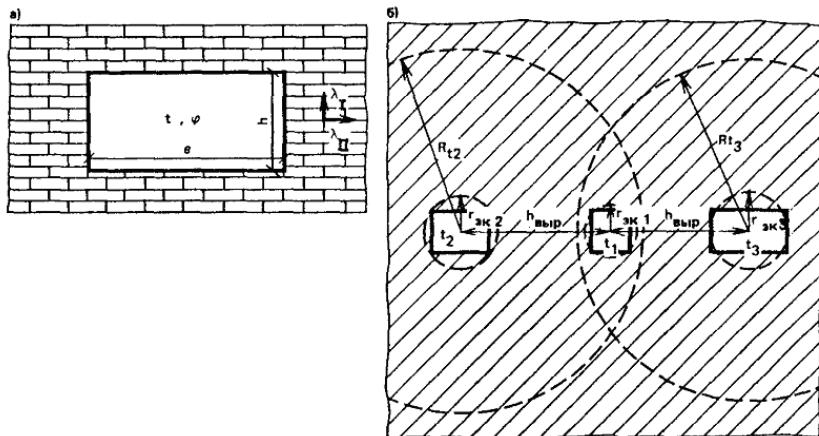


Рис. 4. Расчётные схемы к определению k_{τ}

а - для выработок, пройденных в породах с различными вдоль напластования и перпендикулярно к нему коэффициентами теплопроводности; б - системы взаимодействия камер в тепловом отношении выработок

4.5. Коэффициент нестационарного теплообмена для каждой выработки ПС, окружённой другими выработками и отстоящей от них на расстоянии $h_{\text{вып}}$ не больше, чем их радиусы теплового влияния R_{t_j} (рис. 4, б, з), т.е. $h_{\text{вып}} \leq R_{t_j}$, вычисляется по формуле

$$k_{\tau_1} = k'_{\tau_1} c_{\tau_2} c_{\tau_3} \dots c_{\tau_j} = k'_{\tau_1} \prod_{j=2}^{n_{\text{выр}}} c_{\tau_j}, \quad (30)$$

где $n_{\text{выр}}$ - число взаимодействующих выработок; k'_{τ_1} - рассчитывается по формулам (19) - (22), а величина поправки c_{τ_j} , учитывающей тепловое взаимодействие выработки с температурой t_1 и эквивалентным радиусом $r_{\text{эк}1}$ и выработки с температурой t_j и эквивалентным радиусом $r_{\text{эк}j}$, в зоне температурного влияния которой $R_{t_j} = \delta_j / r_{\text{эк}j}$ находится первая выработка, устанавливается при $r_{\text{эк}1} = r_{\text{эк}j}$ по формуле

$$c_{\tau_j} = 1 - \theta_j \left[1 - \frac{\delta_j \ln \frac{h_{\text{выр}}}{r_{\text{эк}j}} - 0,637 \left(\frac{h_{\text{выр}}}{r_{\text{эк}j}} + \frac{r_{\text{эк}1}}{r_{\text{эк}j}} \right) E(k_1) + 1}{\delta_j \ln \delta_j + 1 - \delta_j} \right], \quad (31)$$

где $\theta_j = \frac{t_j - T_e}{t_1 - T_e}$, а $E(k_1)$ - полный эллиптический интеграл II рода, определяемый при

$$k_1 = 2 \sqrt{h_{\text{выр}} / r_{\text{эк}1}} / \left(\frac{h_{\text{выр}}}{r_{\text{эк}1}} + 1 \right).$$

по формуле:

$$E(k_1) = -0,696 \cdot k_1^2 + 1,307 \cdot k_1 + 1,58$$

4.6. Коэффициент нестационарного теплообмена при переменной температуре воздуха, характер изменения которой представлен на рис. 1, следует рассчитывать по формуле

$$k_{\tau} = k_{\Sigma\tau} \frac{T_e - t_{\text{ср.г}}}{T_e - \tau} + \Delta k_{\tau} \frac{t_{\text{ср.г}} - t}{T_e - t}, \quad (32)$$

где $k_{\Sigma\tau}$ - вычисляется при полном времени существования ПС по формулам (19) - (22), а Δk_{τ} определяется в зависимости от характера изменения температуры воздуха:

для гармонического закона (рис. 1, а)

$$\Delta k_{\tau} = [0,75Bi/Bi' + 1,26(Pd)^{0,5} (Bi/Bi')^2] \lambda_{\text{п}} / r_{\text{эк}}, \quad (33)$$

При подогреве воздуха в зимний период до положительных температур (рис. 1, б) $\Delta k_{\tau_{\text{лет}}}$ рассчитывается по формуле (33) при значении ω , входящем в число Pd, равном:

$$\omega = 8760(1 - 0,63 \arcsin \frac{t'_{\text{ср.г}} - t_{\text{ср.г}}}{t_{\text{лет}} - t_{\text{ср.г}}}), \quad (34)$$

где $t_{\text{лет}}$, $t_{\text{ср.г}}$ - средняя температура воздуха в наиболее жаркий месяц и среднегодовая температура атмосферного воздуха, °C; $t'_{\text{ср.г}}$ - среднегодовая температура воздуха с учетом подогрева в зимний период времени до $t_{\text{под}}$

$$t'_{\text{ср.г}} = \frac{t_{\text{под}} \tau_{\text{под}} + 0,67(t_{\text{лет}} - t_{\text{под}})(8760 - \tau_{\text{под}})}{8760}. \quad (35)$$

Значение $\Delta k_{\tau_{\text{зим}}}$ вычисляется по формуле

$$\Delta k_{\tau_{\text{зим}}} = \alpha \left[1 - \frac{Bi}{Bi'} f(z_{\text{зим}}) \right], \quad (36)$$

где $z_{\text{зим}} = Bi' \sqrt{\frac{a_{\text{п}} \tau_{\text{зим}}}{r_{\text{эк}}^2}}$, значения функции $f(z_{\text{зим}})$ приведены в табл. 1, время $\tau_{\text{зим}}$ отсчитывается от 0 до $\tau_{\text{под}}$.

При ступенчатом законе изменения температуры воздуха, характеризующемся последовательно следующими значениями температур $t_1, t_2, \dots, t_{n-1}, t_n$ в периоды времени $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{n-1}, \tau_n$ (рис. 1, в)

$$k_{\tau} = k'_{\tau} \frac{T_e - t_1}{T_e - t_n} + k''_{\tau} \frac{t_1 - t_2}{T_e - t_n} + \dots + k_{\tau}^{(n)} \frac{t_{n-1} - t_n}{T_e - t_n}, \quad (37)$$

где k'_{τ} - определяется по полному времени существования выработки τ_n , k''_{τ} - по времени $\tau_n - \tau_1$, а $k_{\tau}^{(n)}$ - по времени $\tau_n - \tau_{n-1}$.

Пример. Рассчитать величину коэффициента нестационарного теплообмена для самого жаркого и самого холодного месяцев при гармоническом законе изменения температуры воздуха, характеризующегося значением среднегодовой температуры $+3,6^{\circ}\text{C}$ и температурами самого жаркого и самого холодного месяцев соответственно равными $17,6$ и $-10,4^{\circ}\text{C}$. Для тех же условий определить значение k_{τ} в случае подогрева воздуха зимой в течение 5 месяцев до температуры $+2^{\circ}\text{C}$. При расчёте принять $k_{\Sigma\tau} = 0,3 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$; $T_e = 12^{\circ}\text{C}$; $\alpha = 8 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$; $r_{\text{жк}} = 2 \text{ м}$; $a_n = 9,3 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$; $\lambda_{\text{пл}} = 2,02 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^{\circ}\text{C})$.

Решение.

1. Находим числа подобия Bi, Bi' и Pd

$$Bi = \frac{8 \cdot 2}{2,02} = 7,92; Bi' = 8,3; Pd = \frac{2 \cdot 3,14(2)^2}{8760 \cdot 3600 \cdot 9,3 \cdot 10^{-7}} = 0,857.$$

По формуле (33) вычисляем величину Δk_{τ}

$$\Delta k_{\tau} = \left[0,75 \frac{7,92}{8,3} + 1,26(0,857)^{0,5} \left(\frac{7,92}{8,3} \right)^2 \right] \frac{2,02}{2} = 1,72 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}).$$

Используя формулу (32) получим значения k_{τ} для летнего и зимнего периодов:

$$k_{\tau_{\text{лет}}} = 0,3 \frac{12 - 3,6}{12 - 17,6} + 1,72 \frac{3,6 - 17,6}{12 - 17,6} = 4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C});$$

$$k_{\tau_{\text{зим}}} = 0,3 \frac{12 - 3,6}{12 + 10,4} + 1,72 \frac{3,6 + 10,4}{12 + 10,4} = 1,23 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}).$$

2. При подогреве воздуха в зимнее время в течение 5 месяцев (3600 ч) до +2 °С для определения $k_{\tau_{\text{лет}}}$, вычисляем по формулам (35), (34) $t'_{\text{ср.г}}$ и ω

$$t'_{\text{ср.г}} = \frac{2 \cdot 3600 + 0,67(17,6 - 2)(8760 - 3600)}{8760} = 7^\circ \text{C};$$

$$\omega = 8760(1 - 0,63 \arcsin \frac{7 - 3,6}{17,6 - 3,6}) = 7400 \text{ ч.}$$

Величина числа подобия Pd составляет:

$$Pd = \frac{2 \cdot 3,14(2)^2}{3600 \cdot 7400 \cdot 9,3 \cdot 10^{-7}} = 1,01.$$

Используя формулу (33) получим:

$$k_{\tau_{\text{лет}}} = [0,75 \frac{7,92}{8,3} + 1,26(1,01)^{0,5} (\frac{7,92}{8,3})^2] \frac{2,02}{2} = 1,87 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ \text{C}).$$

Величину $\Delta k_{\tau_{\text{зим}}}$ определим при $\tau_{\text{зим}} = 2190$ ч.

$$z_{\text{зим}} = 8,3 \sqrt{\frac{9,3 \cdot 10^{-7} \cdot 2190 \cdot 3600}{2^2}} = 11,2.$$

Имеем

и $f(z) = (11,2) = 0,95$ (см. табл. 1).

$$k_{\tau_{\text{зим}}} = 8(1 - 0,954 \cdot 0,95) = 0,75 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ \text{C}).$$

Значения $k_{\tau_{\text{лет}}}$ и $k_{\tau_{\text{зим}}}$ вычислим по формуле (32):

$$k_{\tau_{\text{лет}}} = 0,3 \frac{12 - 7}{12 - 17,6} + 1,87 \frac{7 - 17,6}{12 - 17,6} = 3,27 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ \text{C});$$

$$k_{\tau_{\text{зим}}} = 0,3 \frac{12 - 7}{12 - 2} + 0,75 \frac{7 - 2}{12 - 2} = 0,525 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ \text{C}).$$

4.7. Коэффициент нестационарного теплообмена в ПС с от-

рицательной температурой воздуха (начальная температура пород положительна) следует определять путём умножения коэффициента нестационарного теплообмена, вычисленного по формулам (19) - (22), на коэффициент интенсификации теплообмена при агрегатных переходах влаги $k_{ар}$.

Величина $k_{ар}$ для ПС щелеобразной формы вычисляется по формуле

$$k_{ар_{ин}} = \frac{1}{(1 + k_T) \operatorname{erf} k_\beta}, \quad (38)$$

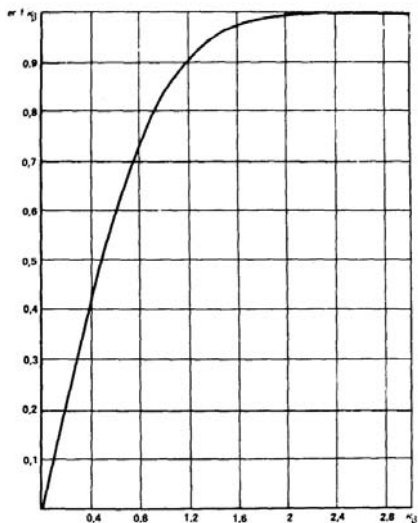


Рис. 5. График зависимости интеграла вероятности, erf, от параметра k_β

где

$$k_\beta = \frac{-0,5k_T k_\varepsilon + \sqrt{0,25k_T^2 k_\varepsilon^2 + 1,57k_0 + 1,11k_\varepsilon k_a^{0,5} + 0,48}}{1,77k_0 + 1,25k_T k_\varepsilon k_a^{0,5} + 0,54};$$

$$k_\beta = \beta_{пр} / 2\sqrt{a_{пм}}; \quad k_\varepsilon = \sqrt{\frac{\lambda_{пт} c_{пт} \rho_{пт}}{\lambda_{пм} c_{пм} \rho_{пм}}}; \quad k_T = \frac{T_\varepsilon - T_\phi}{T_\phi - t_{ср}};$$

$$k_a = \frac{a_{пт}}{a_{пм}};$$

$\beta_{пр}$ - коэффициент пропорциональности, характеризующий скорость движения зоны промерзания, M/\sqrt{c} ; $t_{ср}$ - средняя за расчётный период температура воздуха в выработках; $\text{erf } k_{\beta}$ - интеграл вероятности, значения которого приведены на рис. 5.

Глубина промерзания $R_{пр}$ при этом составляет:

$$R_{пр} = \beta_{пр} \sqrt{\tau}. \quad (39)$$

Для условий цилиндрической выработки с круговой формой поперечного сечения $k_{арп_u}$ следует рассчитывать по формуле:

$$k_{арп_u} = 1 + \frac{k_{арп_m} - 1}{1 + 0,5\sqrt{F_0}}. \quad (40)$$

Глубина промерзания пород вокруг выработки устанавливается по зависимости

$$\xi = \frac{R_{пр}}{r_{эк}} = \xi_1 \xi_2, \quad (41)$$

где величины ξ_1 и ξ_2 вычисляются по формулам

$$\xi_1 = (1 + \sqrt{\tilde{\gamma} F_0})^{\eta_r}; \quad \xi_2 = \exp\left[-\frac{1}{Bi} (1 - \eta_r)\right] \quad (42)$$

где

$$\eta_r = \frac{1}{(1 + k_r) k_{арп_u}}.$$

Величина безразмерного радиуса влияния δ рассчитывается по формуле

$$\delta = 1,915 \cdot \xi \cdot \text{Ln} [(\lambda_{пм} / \lambda_{пт}) \cdot (T_0 / t_{ср})] + 5,254 \cdot \xi \quad (43)$$

Коэффициент нестационарного теплообмена для выработок с поперечным сечением эллиптической формы вычисляется как произведение величин k_τ , $k_{\text{арпн}}$ и b_τ , рассчитанных по формулам (22), (40) и (31). Причем значение радиуса теплового влияния в формуле (31) находится из соотношения (43).

Коэффициент нестационарного теплообмена для выработок, пройденных в породах с отличающимися коэффициентами теплопроводности вдоль напластования λ_{\parallel} и перпендикулярно ему λ_{\perp} , следует определять как произведение k_τ и $k_{\text{арпн}}$, вычисленных по формулам (22) и (40) с учетом зависимостей (28), (29) и величины b_τ , рассчитанной по формуле (25) при значении радиуса теплового влияния δ , установленного с использованием зависимости (43).

Коэффициент нестационарного теплообмена для выработки в случае ее теплового взаимодействия с другими выработками, находящимися от нее на расстоянии $h_{\text{выр}} \leq R_t$ определяется аналогично п. 4.5 при значении δ , вычисленном по соотношению (43).

Пример. Определить коэффициент нестационарного теплообмена на 3 год эксплуатации выработки, пройденной в песчанике с начальной температурой $+10^\circ\text{C}$ и влагосодержанием 3 %. Коэффициент теплоотдачи равен $8 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, а температура воздуха, поддерживаемая в выработке, составляет -15°C . Выработка, имеющая ширину и высоту 10 и 3 м, окружена тремя другими выработками, имеющими такие же геометрические параметры и отстоящими от первой выработки на расстояние 10,5, 16 и 24 м. Температура воздуха, поддерживаемая в них, соответственно равна -1 , -5 и -30°C .

Решение.

В соответствии с данными прил. 1 (табл. 2) при $w_{\text{п}} = 3\%$ плотность песчаника составляет $2500 \text{ кг}/\text{м}^3$, а его теплофизические свойства в мерзлом и талом состояниях одинаковы и равны: теплоемкость $c_{\text{п}} = 0,84 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$; теплопроводность $2,6 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$, температуропроводность $12,2 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$.

Вычислим числа подобия Bi , F_0 при $r_{\text{жк}} = 3,5 \text{ м}$

$$Bi = \frac{8 \cdot 3,5}{2,6} = 10,8; \quad F_0 = \frac{12,2 \cdot 10^7 \cdot 3 \cdot 8760 \cdot 3600}{(3,5)^2} = 9,4.$$

Находим по формуле (22) коэффициент нестационарного теплообмена k_{τ_u} для цилиндрической выработки кругового сечения (при $\tilde{\gamma} = 2,9$)

$$k_{\tau_u} = \frac{8}{1 + 10,8 \ln(1 + \sqrt{2,9 \cdot 9,4})} = 0,386 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ \text{С}).$$

Вычислим для каждой выработки значения чисел подобия K_0 и k_{τ}

$$K_{0_1} = \frac{835 \cdot 10^3 \cdot 0,03 \cdot 2500}{0,84 \cdot 10^3 \cdot 2500(0 + 15)} = 0,8; \quad k_{\tau_1} = \frac{10 - 0}{0 + 15} = 0,67;$$

$$K_{0_2} = \frac{335 \cdot 10^3 \cdot 0,03 \cdot 2500}{0,84 \cdot 10^3 \cdot 2500(0 + 1)} = 12; \quad k_{\tau_2} = \frac{10 - 0}{0 + 1} = 10;$$

$$K_{0_3} = \frac{335 \cdot 10^3 \cdot 0,03 \cdot 2500}{0,84 \cdot 10^3 \cdot 2500(0 + 5)} = 2,4; \quad k_{\tau_3} = \frac{10 - 0}{0 + 5} = 2;$$

$$K_{0_4} = \frac{335 \cdot 10^3 \cdot 0,03 \cdot 2500}{0,84 \cdot 10^3 \cdot 2500(0 + 30)} = 0,4; \quad k_{\tau_4} = \frac{10 - 0}{0 + 30} = 0,33;$$

По формуле (38) определим для каждой выработки величины $k_{\text{арм}}$:

$$k_{\text{арм}1} = 1,4; \quad k_{\text{арм}2} = 1,2; \quad k_{\text{арм}3} = 1,4; \quad k_{\text{арм}4} = 1,3.$$

По формуле (40) вычислим $k_{\text{ар}u}$:

$$k_{\text{арп}_{\text{н1}}} = 1 + \frac{1,4 - 1}{1 + 0,5\sqrt{27,3}} = 1,1; \quad k_{\text{арп}_{\text{н2}}} = 1,05;$$

$$k_{\text{арп}_{\text{н3}}} = 1,1; \quad k_{\text{арп}_{\text{н4}}} = 1,07.$$

Используя формулы (42 - 43), получим величины глубин промерзания пород вокруг каждой выработки ξ :

$$\eta_{\tau_1} = \frac{1}{(1 + 0,67)1,1} = 0,54; \quad \zeta_1 = 2,8; \quad \zeta_2 = 0,95; \quad \xi = 2,66;$$

$$\eta_{\tau_2} = \frac{1}{(1 + 10)1,05} = 0,087; \quad \zeta_1 = 1,15; \quad \zeta_2 = 0,91; \quad \xi = 1,04;$$

$$\eta_{\tau_3} = \frac{1}{(1 + 2)1,1} = 0,303; \quad \zeta_1 = 1,78; \quad \zeta_2 = 0,93; \quad \xi = 1,66;$$

$$\eta_{\tau_4} = \frac{1}{(1 + 0,4)1,07} = 0,67; \quad \zeta_1 = 3,6; \quad \zeta_2 = 0,97; \quad \xi = 3,5.$$

По формуле (43) найдём радиус теплового влияния каждой выработки:

$$\delta_1 = 2,66 \cdot 4,5 = 12; \quad \delta_2 = 1,04 \cdot 5 = 5,2; \quad \delta_3 = 1,66 \cdot 5 = 8,3; \quad \delta_4 = 3,5 \cdot 3,3 = 11,6.$$

По номограмме рис. 3 при $k_{\text{пр}} = 3/10 = 0,3$ и $\delta_1 = 12$ определим поправку b_τ к коэффициенту нестационарного теплообмена. Получим $b_\tau = 0,96$.

По формуле (31) вычислим поправки c_τ , учитывающие тепловое взаимодействие выработок:

$$\theta_2 = \frac{-1 - 10}{-15 - 10} = 0,44; \quad \delta_2 = 5,2; \quad \frac{h_{\text{выпр}}}{r_{\text{ЭК}}} = 3; \quad c_{\tau_2} = 0,93;$$

$$\theta_3 = \frac{-5 - 10}{-15 - 10} = 0,6; \quad \delta_3 = 8,3; \quad \frac{h_{\text{выпр}}}{r_{\text{ЭК}}} = 4,6; \quad c_{\tau_3} = 0,92;$$

$$\theta_4 = \frac{-30 - 10}{-15 - 10} = 1,6; \quad \delta_4 = 11,6; \quad \frac{h_{\text{выпр}}}{r_{\text{ЭК}}} = 6,9; \quad c_{\tau_4} = 0,85.$$

Окончательно для k_τ получим:

$$k_{\tau} = 1,1 \cdot 0,386 \cdot 0,96 \cdot 0,93 \cdot 0,92 \cdot 0,85 = 0,296 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°С)}.$$

4.8. Температуру поверхности пород в выработках ПС при известном коэффициенте нестационарного теплообмена следует рассчитывать по формуле

$$T_{\text{пов}} = t + k_{\tau}(T_e - t)/\alpha. \quad (44)$$

4.9. Коэффициент нестационарного массообмена β_{τ} при известных температуре поверхности пород $T_{\text{пов}}$, их начальном влаго-содержании $w_{\text{п}}$, а также температуре t и относительной влажности φ воздуха определяется по зависимости

$$\beta_{\tau} = \frac{\beta'_{\tau}(w_{\text{п}}\rho - K)}{P_{\text{нас}}(T_{\text{пов}}) - P(t)}, \quad (45)$$

где $P_{\text{нас}}(T_{\text{пов}})$, $P(t)$ - рассчитываются при температурах $T_{\text{пов}}$ и t по формулам (2), (3), а концентрация водяного пара в воздухе K вычисляется при температуре t по формуле (4) и данным прил. 3.

Коэффициент массообмена β'_{τ} для выработок ПС с щелеобразной, круговой и эллиптической формой поперечного сечения, а также в условиях взаимного влияния выработок друг на друга ориентировочно определяется по формулам (19), (22), (24), (30), (31) при замене в них коэффициентов теплопроводности $\lambda_{\text{п}}$ и теплопроводности $a_{\text{п}}$ на коэффициент диффузии $a_{\text{м}_{\text{п}}}$ и коэффициента теплоотдачи α на коэффициент массоотдачи $\beta'_{\text{п}}$, равный

$$\beta'_{\text{п}} = 0,126\beta_{\text{п}}, \quad (46)$$

где $\beta_{\text{п}}$ - рассчитывается по формуле (20).

Пример. Рассчитать величину коэффициента нестационарного массообмена на 3 год эксплуатации выработки, пройденной в плотном известняке с температурой 6 °С и влажностью 5% . Сечение выработки составляет 12 м^2 , а ее периметр 10 м . Количество воздуха, подаваемое для проветривания выработки $G'_{\text{в}} = 10 \text{ м}^3/\text{с}$, а его температура и влажность равны $t = 16 \text{ °С}$ и $\varphi = 80 \%$. Коэффициент теплоотдачи составляет $6 \text{ Вт (м}^2 \cdot \text{°С)}$.

Решение.

На основании расчётов по формуле (20) величина коэффициента массоотдачи от пород к воздуху получена равной $\beta_{\text{п}} = 0,023$ кг/(м²·с·МПа). По данным прил. 2 (табл. 2 и рисунок) плотный известняк имеет следующие значения теплофизических и влагофизических свойств: плотность 2500 кг/м³; теплоемкость 0,92·10³ Дж/(кг·°С); теплопроводность 2,7 Вт/(м·°С); температуропроводность 11,7·10⁻⁷ м²/с; коэффициент диффузии 0,1·10⁻⁸ м²/с.

При эквивалентном радиусе выработки $r_{\text{эк}} = 10/2 \cdot 3,14 = 1,6$ м числа подобия Bi , F_0 равны

$$Bi = \frac{6 \cdot 16}{2,7} = 3,6; \quad F_0 = \frac{11,7 \cdot 10^{-7} \cdot 3 \cdot 8760 \cdot 3600}{(1,6)^2} = 43;$$

Тогда по формуле (22) при $\tilde{\gamma} = 2,6$

$$k_{\tau_{\text{ц}}} = \frac{6}{1 + 3,6 \ln(1 + \sqrt{2,6 \cdot 43})} = 0,61 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ \text{С}).$$

Температуру поверхности пород вычислим по формуле (44)

$$T_{\text{пов}} = 16 + 0,61(6 - 16)/6 = 15 \text{ } ^\circ \text{С}.$$

Числа подобия $Bi_{\text{м}}$ и $F_{0\text{м}}$, характеризующие интенсивность массообменных процессов, определим при $r_{\text{эк}} = 1,6$ м и коэффициенте массообмена $\beta'_{\text{п}}$, вычисленном по формуле (46):

$$\beta'_{\text{п}} = 0,126 \cdot 0,023 = 0,0029 \text{ м}/\text{с}.$$

$$Bi_{\text{м}} = \frac{0,0029 \cdot 1,6}{0,1 \cdot 10^{-8}} = 4,64 \cdot 10^6; \quad F_{0\text{м}} = \frac{0,1 \cdot 10^{-8} \cdot 3 \cdot 8760 \cdot 3600}{(1,6)^2} = 3,7 \cdot 10^{-2}.$$

По формуле (23) вычислим β'_{τ}

$$\beta'_{\tau} = \frac{0,1 \cdot 10^{-8}}{1,6} \times \left(0,375 + \frac{1}{\sqrt{3,14 \cdot 3,7 \cdot 10^{-2}}} \right) = 0,2 \cdot 10^{-8} \text{ м}/\text{с}.$$

По данным прил. 3 при температурах $T = 15 \text{ } ^\circ \text{С}$ и $t = 16 \text{ } ^\circ \text{С}$ определим $P_{\text{нас}}(15 \text{ } ^\circ \text{С}) = 17 \text{ МПа}$, $P_{\text{нас}}(16 \text{ } ^\circ \text{С}) = 18,13 \text{ МПа}$, $K_{\text{нас}}(16 \text{ } ^\circ \text{С}) = 13,6 \cdot 10^{-3} \text{ кг}/\text{м}^3$. По формулам (3) и (4) при $\varphi = 0,8$ вычислим $P(16 \text{ } ^\circ \text{С}) = 0,8 \cdot 18,3 = 14,5 \text{ МПа}$ и $K(16 \text{ } ^\circ \text{С}) = 0,8 \cdot 13,6 \cdot 10^{-3} = 10,9 \cdot 10^{-3} \text{ кг}/\text{м}^3$.

Окончательно по формуле (45) получим

$$\beta_{\tau} = \frac{0,2 \cdot 10^{-8} (0,05 \cdot 2500 - 10,9 \cdot 10^{-3})}{17 - 14,5} = 10^{-7} \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{МПа}).$$

4.10. Коэффициент теплопередачи воздушного потока, движущегося в вентиляционном трубопроводе, к воздуху в выработке, рассчитывается по формуле

$$k_{\text{в.тр}} = \frac{1}{1/\alpha_1 + \delta_{\text{в.тр}}/\lambda_{\text{в.тр}} + 1/\alpha_2}, \quad (49)$$

где коэффициенты теплоотдачи от воздуха внутри вентиляционного трубопровода к его стенке α_1 и от стенки к воздуху в выработке определяются по формуле (19); $\epsilon_{\text{шт}}$ для стальных трубопроводов составляет 1, а для прорезиненных в зависимости от диаметра $d_{\text{в.тр}}$ находится по соотношению $\epsilon_{\text{шт}} = 2,4 - 0,8d_{\text{в.тр}}$. При проветривании выработок охлажденным воздухом величину α_2 следует умножить на коэффициент $\xi_{\text{кон}}$, учитывающий интенсификацию теплообмена при конденсации влаги на наружной поверхности вентиляционного трубопровода и определяемый по соотношению $\xi_{\text{кон}} = 1 + 1^{0,15}$.

5. РАСЧЁТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА ПО ДЛИНЕ ВЫРАБОТКИ

5.1. Температура рудничного воздуха выработки длиной L , тепловыделений от энергетических источников, расположенных в выработке $Q_{\text{энерг}}$, весом расходе воздуха $G_{\text{в}} = \rho_{\text{в}} Q_{\text{в}}$, вычисляется по формуле

$$t_{\text{н}} = t_{\text{к}} \exp\left(\frac{k_{\tau} U_{\text{выр}} l}{c_{\text{эф}} G_{\text{в}}}\right) + \left(T_{\text{е}} + \frac{Q_{\text{энерг}}}{k_{\tau} U_{\text{выр}} l}\right) \left[1 - \exp\left(\frac{k_{\tau} U_{\text{выр}} l}{c_{\text{эф}} G_{\text{в}}}\right)\right]; \quad (50)$$

где $c_{\text{эф}}$ - эффективная теплоемкость воздуха, рассчитываемая по формуле

$$c_{\text{эф}} = 1006 + 2470n'_{\text{апр}}\varphi_{\text{ср}}0,101/V, \quad (51)$$

где $n'_{\text{апр}}$ - коэффициент, значения которого в зависимости от ожидаемого интервала изменения температуры воздуха в выработке ус-

танавливаются по данным табл. 2.

Таблица 2

Значения коэффициента $n'_{\text{апп}}$ для различных диапазонов изменения температуры

$\Delta t, ^\circ\text{C}$	$n'_{\text{апп}}$	$\Delta t, ^\circ\text{C}$	$n'_{\text{апп}}$
-40 ... -30	0,01	15 - 20	0,83
-30 ... 20	0,05	15 - 25	0,95
-20 ... 10	0,09	20 - 25	1,10
-10 ... 0	0,19	20 - 30	1,32
0 ... 10	0,40	25 - 30	1,40
5 ... 15	0,53	25 - 35	1,69

$$\varphi_k = 2\varphi_{\text{ср}} - \varphi_n, \quad (52)$$

$$\varphi_{\text{ср}} = \frac{0,5\varphi_n + 0,8x_n \frac{B}{P_{\text{нас}}(t_k)} + 0,8\beta_\tau BU_{\text{выр}} l \frac{P_{\text{нас}}(T_{\text{пов.ср}})}{G_B P_{\text{нас}}(t_k)} + 0,8B \frac{\Sigma j}{G_B P_{\text{нас}}(t_k)}}{1 + 0,8\beta_\tau BU_{\text{выр}} l \frac{P_{\text{нас}}(t_{\text{ср}})}{G_B P_{\text{нас}}(t_k)}}, \quad (53)$$

где Σj - суммарные влаговыделения от работающих людей $j_{\text{л}}$, оборудования $j_{\text{об}}$ и грузов $j_{\text{гр}}$, размещаемых в выработках.

Коэффициент нестационарного теплообмена k_τ в зависимости (50) для горных выработок с положительной температурой вычисляется по формулам (19) - (37), а для горных выработок с отрицательной температурой - по формулам (38) - (42).

5.2. При использовании для подогрева наружного воздуха в зимнее время до положительных температур теплоты горных пород необходимая длина выработок, в которых осуществляется подогрев воздуха (теплоаккумулирующие выработки), рассчитывается по формуле

$$l_{\text{ак}} = \frac{1}{A_{\text{ак}}} \ln \frac{t_n - 0,5(T_e - 2 + t_{\text{ср.г}}) - B_{\text{ак}}/A_{\text{ак}}}{t_{\text{к.тп}} - 0,5(T_e - 2 - t_{\text{ср.г}}) - B_{\text{ак}}/A_{\text{ак}}}, \quad (54)$$

где $t_{\text{к.тп}}$ - требуемая температура воздуха в конце теплоаккумулирующей выработки, $^\circ\text{C}$

$$A_{\text{ак}} = \frac{k_{\text{арп}} \Delta k_{\tau} U_{\text{выр}}}{c_{\text{эф}} G_{\text{в}}}; \quad (55)$$

$$B_{\text{ак}} = \frac{0,5k_{\Sigma\tau} U_{\text{выр}} (T_e + 2 - t_{\text{ср.г}})}{G_{\text{в}} c_{\text{эф}}}. \quad (56)$$

6. РАСЧЁТ ПОЛЕЙ ТЕМПЕРАТУР И ВЛАГОСОДЕРЖАНИЙ В ПОРОДНОМ МАССИВЕ, ОКРУЖАЮЩЕМ ГОРНЫЕ ВЫРАБОТКИ

6.1. Температурные поля для выработки со щелевой формой сечения следует рассчитывать по формулам:

для выработки с положительной температурой

$$v = \operatorname{erfc} Z, \quad (57)$$

где $Z = \frac{r}{2\sqrt{a_{\text{п}}\tau}}$, $\operatorname{erfc} Z = 1 - \operatorname{erf} Z$, а значения функции $\operatorname{erf} Z$ устанавливаются по графику на рис. 5 при $Z = k_{\beta}$;

для горных выработок с отрицательной температурой

$$v_{\text{м}} = \frac{T_{\text{м}} - t}{T_{\text{ф}} - t} = \operatorname{erfc} Z_{\text{м}} / \operatorname{erfc} k_{\beta}; \quad (58)$$

$$v_{\text{т}} = \frac{T_{\text{м}} - T_e}{T_{\text{ф}} - T_e} = \operatorname{erfc} Z_{\text{т}} / \operatorname{erfc}(k_{\beta} k_a^{-0,5}), \quad (59)$$

где

$$Z_{\text{м}} = \frac{r}{2\sqrt{a_{\text{пм}}\tau}}, \quad Z_{\text{т}} = \frac{r}{2\sqrt{a_{\text{пт}}\tau}},$$

а величина параметра k_{β} определяется или по формуле (38). Глубина зоны промерзания рассчитывается по формуле (39).

Пример. Определить величину температуры пород в кровле выработки с щелеобразной формой сечения на расстоянии 1 м от

поверхности их контакта с воздухом через 10 сут. Породы представлены песчаником, имеющим температуру, влагосодержание и теплофизические свойства, совпадающие с принятыми в примере п. 4.7. Расчет провести для средних температур воздуха в выработке +2 °С и -15 °С.

Решение.

1. По формуле (57) при

$$Z = \frac{1}{2\sqrt{12,2 \cdot 10^{-7} \cdot 10 \cdot 24 \cdot 3600}} = 0,49;$$

$$v = 0,488; T_{\text{п}} = T_e - v(T_e - t) = 10 - 0,488(10 - 2) = 6,1 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

2. По формуле (38) при значениях $k_{\text{т}} = 0,67$ и $K_0 = 0,8$, $k_{\text{арм}} = 1,4$.

Тогда $\text{erf } k_{\beta} = 0,84$, а k_{β} по графику на рис. 5 составляет $k_{\beta} = 1$. По формуле (39) получим значение глубины промерзания

$$R_{\text{пр}} = 2\sqrt{12,2 \cdot 10^{-7} \cdot 10 \cdot 24 \cdot 3600} = 2,05 \text{ м},$$

Так как $r < R_{\text{пр}}$, то по формуле (58) при $Z_{\text{м}} = 0,49$ и $v_{\text{м}} = 0,488/0,84 = 0,58$, имеем:

$$T_{\text{м}} = t + (T_{\text{ф}} - t)v_{\text{м}} = -15 + 15 \cdot 0,58 = -6,3 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

6.2. Температурные поля в породах для выработки с круговой формой сечения определяются следующими формулами: для выработок с положительной температурой:

при $0 \leq \tau \leq \frac{r_{\text{ЭК}}^2}{a_n}$:

$$v = \frac{T_0 - T(R, Fo)}{T_0 - t_{\text{в}}} = \sqrt{\frac{1}{R} \frac{Bi}{Bi'}} \{ \text{erfc } X - \exp(-X^2) \cdot [1 - f(Z)] \} \quad (60)$$

где $X = \frac{R-1}{2\sqrt{Fo}}$; $Z = Bi' \sqrt{Fo} + X$

значения функции $f(z)$ $\varphi(Z, Y)$ находятся по таблице 1

$\text{erfc } X = 1 - \text{erf } X$, где значения функции $\text{erf } X$ находятся по графику

на рис.5 при $k_{\beta} = X$

при $\tau > \frac{r_{\text{эк}}^2}{a_n}$:

$$v = \frac{T_0 - T(r, \tau)}{T_0 - t} = \frac{\text{Bi}(\delta \ln \delta / R + R - \delta)}{\delta - 1 + \text{Bi}(\delta \ln \delta + 1 - \delta)}, \quad (61)$$

где величина δ устанавливается по формулам (26-27) при цилиндрической форме выработок с эллиптическим поперечным сечением

$$v_{\text{эл}} = \frac{T(r, y, \tau) - t}{T_0 - t} = b_{\tau} \frac{\ln \frac{A_r + B_r}{a_{\text{эл}} + b_{\text{эл}}}}{\ln \delta}, \quad (62)$$

где $a_{\text{эл}}$ и $b_{\text{эл}}$ - большая и малая полуоси эквивалентного эллипса, устанавливаемые при $k_{\text{пр}} = h/b$ по соотношениям:

$$a_{\text{эл}} = \frac{2b(1 + k_{\text{пр}})}{\pi[1,5(1 + k_{\text{пр}}) - \sqrt{k_{\text{пр}}}]}; \quad (63)$$

$$b_{\text{эл}} = \frac{2bk_{\text{пр}}(1 + k_{\text{пр}})}{\pi[1,5(1 + k_{\text{пр}}) - \sqrt{k_{\text{пр}}}]}, \quad (64)$$

Радиус теплового влияния δ и поправка к коэффициенту нестационарного теплообмена b_{τ} определяются по формулам (26 - 27). Координаты A_r и B_r связаны с декартовой системой координат соотношениями:

$$A_r = \sqrt{B^2 + a_{\text{эл}}^2 - b_{\text{эл}}^2}; \quad (65)$$

$$B_r = 0,707 \sqrt{-a_{\text{эл}}^2 + b_{\text{эл}}^2 + y^2 + r^2 + \sqrt{(-a_{\text{эл}}^2 + b_{\text{эл}}^2 + y^2 + r^2) + 4r^2(a_{\text{эл}}^2 - b_{\text{эл}}^2)}}; \quad (66)$$

и изменяются от $a_{\text{эл}}$ и $b_{\text{эл}}$ до значений A_{δ} и B_{δ} , рассчитываемых по формулам:

$$A_{\delta} = a_{\text{эл}} \sqrt{\frac{1 - k_{\text{пр}}^2}{2} \left[\sqrt{1 + 0,25N_{\delta}^2} - 1 \right]}; \quad (67)$$

$$B_{\delta} = a_{\text{эл}} \sqrt{\frac{1 - k_{\text{пр}}^2}{2} \left[\sqrt{1 + 0,25N_{\delta}^2} - 1 \right]}; \quad (68)$$

где параметр N_{δ} определяется по формуле (25) при известном значении радиуса теплового влияния δ .

Пример. Рассчитать температуру пород, окружающих выработку, в точке, расположенной на расстоянии 10 м от оси выработок. Ширина и высота первой выработки соответственно равны 8 и 4 м, а второй 10 и 2,5 м. Температура воздуха, поддерживаемая в выработках составляет +2 °С, а коэффициент теплоотдачи равен 8 Вт/(м²·°С). Теплофизические свойства принять аналогично примеру п. 4.7.

Решение.

Для первой выработки при $b/h = 8/4 = 2$ при расчете используем формулу (61).

При $r_{\text{эк}} = (8 + 4)/3,14 = 3,82$ м; $Bi = 8 \cdot 3,82/2,6 = 12$; $F_0 = 12,2 \cdot 10^{-7} \cdot 5 \cdot 8760 \cdot 3600 / (3,82)^2 = 13,2$. При $\tilde{\gamma} = 2,95$, и формуле (27) $\delta = 15$.

По формуле (61) при $R = 10/3,82 = 2,61$ получим

$$v_{\text{ц}} = \frac{12 \left(15 \ln \frac{15}{2,61} - 2,61 + 15 \right)}{15 - 1 + 12(15 \ln 15 + 1 - 15)} = 0,509;$$

$$T_{\text{п}} = 10 - 0,509(10 - 2) = 6 \text{ °С}.$$

Для второй выработки при $b/h = 4$ ($k_{\text{пр}} = 0,25$) принимаем модель, соответствующую эллиптической форме поперечного сечения. Искомая точка при этом в декартовой системе имеет координаты $y = 0$, $r = 10$ м.

По формулам (63), имеем

$$a_{\text{эл}} = \frac{2 \cdot 10(1 + 0,25)}{3,14[1,5(1 + 0,25) - \sqrt{0,25}]} = 5,79 \text{ м};$$

$$b_{\text{эл}} = \frac{2 \cdot 10 \cdot 0,25(1 + 0,25)}{3,14[1,5(1 + 0,25) - \sqrt{0,25}]} = 1,45 \text{ м};$$

$$B_r = 0,707\sqrt{-5,79^2 + 1,45^2 + 10^2 + \sqrt{(-5,79 + 1,45^2 + 10^2 + 4 \cdot 10^2(5,79^2 - 1,45^2))}} = 10 \text{ м};$$

$$A_r = 10^2 + (5,79)^2 - (1,45)^2 = 11,5 \text{ м}.$$

При $r_{\text{ЭК}} = 3,98 \text{ м}$; $Bi = 12,2$; $F_0 = 12,2$; $\tilde{\gamma}F_0 = 35,9$; $\delta = 14,5$ и $b_r = 0,955$ (см. рис. 3) по формуле (62) получим:

$$v_{\text{эл}} = 0,955 \frac{\ln \frac{11,5 + 10}{5,79 + 1,45}}{\ln(14,5)} = 0,39,$$

откуда $T_n = 2 + 0,39(10 - 2) = 5,1 \text{ }^\circ\text{C}$.

При цилиндрической форме выработок с круговым или эллиптическим поперечными сечениями, пройденными в породах с различными коэффициентами теплопроводности вдоль напластования λ_{\parallel} и перпендикулярно к нему λ_{\perp} - по формуле (62) с учетом соотношений (28) - (29) при

$$a'_{\text{эл}} = a_{\text{эл}} \sqrt{\frac{0,5(\lambda_{\parallel} + \lambda_{\perp})}{\lambda_{\parallel}}} \quad b_{\text{эл}} = b_{\text{эл}} \sqrt{\frac{0,5(\lambda_{\parallel} + \lambda_{\perp})}{\lambda_{\parallel}}}.$$

Для ПС с отрицательной температурой:

при щелеобразной форме выработок - по формулам (58) - (59);

при цилиндрической форме выработок с круговым поперечным сечением, в случае

$$0,5 \frac{r_{\text{ЭК}}^2}{a_n} \leq \tau \leq \frac{r_{\text{ЭК}}^2}{a_n}$$

$$v_{ц.м} = \frac{T_{пм} - T_{\phi}}{T_{\phi} - t} = \frac{1}{\sqrt{R}} \operatorname{erfc} Z_M / \operatorname{erf} k_{\beta}; \quad (69)$$

$$v_{ц.т} = \frac{T_{пт} - T_e}{T_{\phi} - T_e} = \frac{1}{\sqrt{R}} \operatorname{erfc} Z_r / \operatorname{erf}(k_{\beta} k_a^{-0.5}), \quad (70)$$

$$Z_M = \frac{R-1}{2\sqrt{F_{0M}}}; \quad Z_r = \frac{R-1}{2\sqrt{k_a F_{0M}}},$$

где k_{β} а величина k_{β} вычисляется аналогично п. 6.1:

$$\tau > \frac{r_{\text{ЭК}}^2}{a_n}$$

в случае

$$v_{ц.м} = \frac{T_{пм} - T_{\phi}}{t - T_{\phi}} = \frac{\ln \xi / R}{\ln \xi + 1/Bi}; \quad (71)$$

$$v_{ц.т} = \frac{T_{пт} - T_e}{T_{\phi} - T_e} = \frac{\ln R / \delta - R / \delta + 1}{\ln \xi / \delta - \xi / \delta + 1}, \quad (72)$$

где величины ξ и δ рассчитываются по формулам (41), (43);

при цилиндрической форме выработок с эллиптическим поперечным сечением:

$$v_{\text{эл.м}} = \frac{T_{пм} - t}{T_{\phi} - t} = b''_{\tau} \frac{\ln \frac{A_r + B_r}{a_{\text{эл}} + b_{\text{эл}}}}{\ln \xi}; \quad (73)$$

$$v_{\text{эл.т}} = \frac{T - T_{\phi}}{T_e - T_{\phi}} = \frac{b''_{\tau} \ln \frac{A_r + B_r}{a_{\text{эл}} + b_{\text{эл}}} - \ln \xi}{b''_{\tau} / b'_{\tau} \ln \delta - \ln \xi}, \quad (74)$$

где величины b'_{τ} и b''_{τ} определяются по формуле (25) или по номограмме рис. 3 при известных значениях δ и ξ , которые, в свою оче-

редь, рассчитываются по формулам (41), (43). Координаты A_r и B_r в формуле (73) изменяются от границ контура эллиптической выработки до контура, соответствующего границе промерзания A_ξ и B_ξ , а в формуле (74) от контура, соответствующего границе промерзания A_ξ и B_ξ до контура, совпадающего с зоной теплового влияния выработки A_δ и B_δ . Значения A_ξ и B_ξ , A_δ и B_δ устанавливаются по формулам (67), (68). Связь координат A_r и B_r с декартовой системой координат (y, r) осуществляется по формулам (65), (66).

Пример. Рассчитать температуру пород, окружающих выработку ПС, для условий предыдущего примера, приняв температуру воздуха, равной -15°C .

Решение.

Для первой выработки при $r_{\text{жк}} = 3,82$ м; $Bi = 12$; $F_0 = 13,2$; $K_0 = 0,8$; $k_r = 0,67$, по формулам (38), (40) получим:

$$k_{\text{ар}_{\text{ц}}} = 1,4; \quad k_{\text{ар}_{\text{н}}} = 1,14.$$

По формуле (41) найдем величину $\xi = 2,55$. Используя график рис. формулу (43) получим $\delta = 11,5$. Так как $R = r/r_{\text{жк}} = 2,61 > \xi$, то для вычислений температуры пород необходимо применять формулу (72):

$$v_{\text{ц.г}} = \frac{\ln \frac{(2,61)}{(11,5)} - \frac{2,61}{11,5} + 1}{\ln \frac{(2,55)}{(11,5)} - \frac{2,55}{11,5} + 1} = 0,975,$$

откуда

$$T_{\text{пт}} = T_e + v_{\text{ц.г}}(T_{\text{ф}} - T_e) = 10 + (0 - 10)0,975 = 0,25^\circ\text{C}.$$

Для второй выработки при $r_{\text{жк}} = 3,98$ м; $Bi = 12,2$; $F_0 = 12,2$; $K_0 = 0,8$; $k_r = 0,67$ аналогично расчетам для первой выработки получим: $k_{\text{ар}_{\text{ц}}} = 1,4$ $k_{\text{ар}_{\text{н}}} = 1,15$ $\xi = 2,45$; $\delta = 11$.

По формулам (65), (66) с учётом соотношения (25), определённого при $\xi = 2,45$, установим большую A_ξ и малую B_ξ полуоси эллиптической границы промерзания:

$$N_{\xi} = (2,45^2 - 1) \left(1,5 \sqrt{\frac{1+0,25}{1-0,25}} - \sqrt{\frac{0,25}{1-0,25^2}} \right)^2 + \frac{4 \cdot 0,25}{1-0,25^2} = 11,2;$$

$$A_{\xi} = 5,79 \sqrt{\frac{1-0,25^2}{2}} (\sqrt{1+0,25 \cdot 11,2^2} + 1) = 10,3 \text{ м};$$

$$B_{\xi} = 5,79 \sqrt{\frac{1-0,25^2}{2}} (\sqrt{1+0,25 \cdot 11,2^2} - 1) = 8,6 \text{ м}.$$

Так как расчетная точка расположена за пределами зоны промерзания, то для определения температуры пород используем формулу (74). По номограмме рис. 3 при $\delta = 11$ и $\xi = 2,45$ соответственно получим $b'_{\tau} = 0,95$ и $b''_{\tau} = 0,85$. Тогда

$$v_{\text{эл.г}} = \frac{0,85 \ln \frac{(11,5+10)}{(5,79+1,45)} - \ln 2,45}{\frac{0,85}{0,95} \ln 11 - \ln 2,45} = 0,02,$$

откуда

$$T_{\text{пт}} = 0 + (10 - 0)0,02 = 0,2 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

6.3. Температурное поле в породах при наличии системы взаимовлияющих в тепловом отношении выработок рассчитывается в следующей последовательности: определяются расстояния от точки, в которой определяется температура пород, до центра каждой выработки r_j , и по одной из формул (60) - (74) устанавливаются безразмерные температуры:

$$v_j = \frac{T_e - T_j}{T_e - t_j};$$

Далее вычисляется температура, сформировавшаяся в искомой точке от любых двух выработок

$$\bar{v}_2 = v_1 + v_2 - v_1 v_2, \quad (75)$$

Тепловое влияние третьей выработки v_3 (при известной величине \bar{v}_2) учитывается аналогичным образом.

$$\bar{v}_3 = \bar{v}_2 + v_3 - v_2 v_3. \quad (76)$$

Суммарная температура пород в искомой точке устанавливается в результате последовательного учета в соответствии с формулами (75) - (76) теплового влияния каждой выработки

$$T_n = T_e - \bar{v}_n (T_e - t_n). \quad (77)$$

Пример. Рассчитать результирующую температуру, сформировавшуюся в горном массиве от влияния четырех выработок, если начальная температура пород $T_e = 15$ °С, а расчетные температуры пород в искомой точке от влияния каждой из выработок составляют $T_1 = 8$ °С; $T_2 = 5$ °С; $T_3 = 12$ °С; $T_4 = 2$ °С. Температура воздуха в четвертой выработке $t_4 = 1$ °С.

Решение.

Найдём безразмерные температуры v_i

$$v_1 = \frac{15 - 8}{15 - 1} = 0,5; \quad v_2 = \frac{15 - 5}{15 - 1} = 0,714; \quad v_3 = \frac{15 - 12}{15 - 1} = 0,214;$$

$$v_4 = \frac{15 - 2}{15 - 1} = 0,93.$$

По формулам (75), (76) найдем

$$\bar{v}_2 = 0,5 + 0,714 - 0,5 \cdot 0,714 = 0,857;$$

$$\bar{v}_3 = 0,857 + 0,214 - 0,857 \cdot 0,214 = 0,888;$$

$$\bar{v}_4 = 0,888 + 0,93 - 0,888 \cdot 0,93 = 0,992.$$

По формуле (77) имеем:

$$T_n = 15 - 0,992(15 - 1) = 1,1 \text{ °С.}$$

6.4. Температурные поля, формирующиеся в горных породах при изменении температуры воздуха в выработках в соответствии с одним из законов, представленных на рис. 1, рассчитываются следующим образом: зависимость изменения температуры воздуха от времени разбивается на временные интервалы, в течение которых температура воздуха считается постоянной t_n ; по одной из формул (60 -62) при временах $(\tau - \tau_n)$, отсчитываемых от начала интервала с температурой t_n , вычисляются безразмерные температуры пород

$$v = \frac{T_n - t_n}{T_e - t_n};$$

Температура пород T_n на момент времени τ определяется по формуле:

$$T_n = t_m + v(\tau)(T_e - t_0) + \sum_{n=1}^m (t_n - t_{n-1})v(\tau - \tau_n), \quad (78)$$

где t_m , t_0 - температура воздуха в последний временной интервал и начальная температура воздуха; m - число временных интервалов.

6.5. Поля влагосодержаний в породах, окружающих выработки ПС, w_n рассчитываются по формуле

$$w_n = w_e + v_m(w_e \rho_n + k_b), \quad (79)$$

где v_m определяется аналогично полям температур по зависимостям (57), (60) - (62) при замене в них коэффициентов теплопроводности

λ_n и температуропроводности a_n на коэффициент диффузии a_{m_n} и коэффициента теплоотдачи на коэффициент массоотдачи β'_n , определяемый соотношением (18).

Библиографический список

1. *Венгеров И.Р.* Теплофизика шахт и рудников. Математические модели. т. 2. Базисные модели// – Донецк: - 2012. Донбасс:.– 684 с.
2. *Галкин А.Ф.* Тепловой режим подземных сооружений Севера// Новосибирск– 2000. Наука:. 304 с.
3. *Гендлер С.Г.* Тепловой режим подземных сооружений./СПб. - 1987. ЛГИ:.. 101 с.
4. *Дядькин Ю.Д.* Геотермальная теплофизика/ Дядькин Ю.Д., Гендлер С.Г., Смирнова Н.Н.// СПб. - 1993. Наука:.. 253 с.
5. *Дядькин Ю.Д.* Основы горной теплофизики для шахт и рудников Севера//М.- 1968. Недра:.. 256 с.
6. *Шувалов Ю.В.* Термодинамика/ Шувалов Ю.В., Гендлер С.Г., Мовчан И.Б.//СПБ. – 2006. РИЦ СГГИ:.. – 101 с.
7. *Шувалов Ю.В.* Регулирование теплового режима шахт и рудников Севера//СПб. - 1988. ЛГИ:.. 192 с.

Приложение 1

Тепло и влагофизические характеристики горных пород

Таблица 1

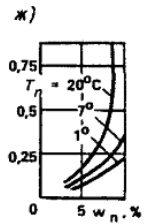
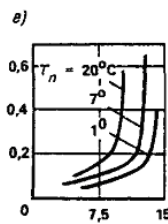
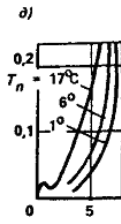
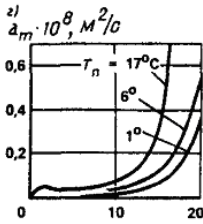
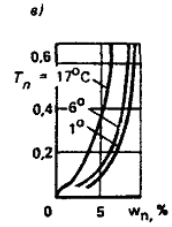
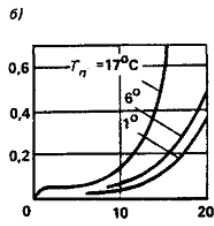
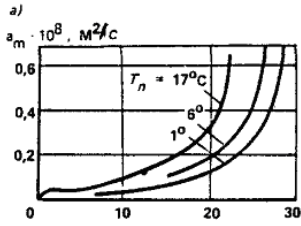
Теплофизические характеристики горных пород

Наименование породы	Плотность ρ , кг/м ³	Удельная теплоемкость c_p , кДж/(кг·с)	Коэффициент теплопроводности $\lambda_n \cdot 10^3$ кВт/(м·с)	Коэффициент температуропроводности $a_n \cdot 10^7$, м ² /с
Базальт	2300	0,921	3,50	1,35
Гранит	2720	0,917	2,21	8,84
Доломит	2675	0,929	1,73	6,96
Известняк	2000	0,920	1,16	6,31
"	2600	0,871	1,43	6,33
Ракушечник	1400	0,921	0,86	6,66
Песчаник	2380	0,791	2,64	14,03
"	2590	0,988	1,05	4,10
"	2900	0,749	2,02	9,30
Мергель	2130	1,570	1,93	5,82
Мел	2020	1,965	1,80	4,56
Серный колчедан	4600	0,860	4,20	10,30
Сланец	2690	0,992	2,22	8,31
"	2330	0,913	1,88	8,83
Сланец глинистый	2770	0,319	1,88	8,30
"	2430	0,992	0,93	3,86
Сланец песчаный	2740	0,849	1,89	8,14
Уголь	1340	0,971	0,22	1,69

Таблица 2

Теплофизические характеристики некоторых типов горных пород в талом и мерзлом состояниях

Порода	Влажность $w_p, \%$	Плотность $\rho_p, \text{кг/м}^3$	Удельная теплоемкость $c_p, \text{кДж/(кг}\cdot\text{с)}$	Коэффициент теплопроводности $\lambda_p \cdot 10^3, \text{кВт/(м}\cdot\text{с)}$	Коэффициент температуропроводности $a_p \cdot 10^7, \text{м}^2/\text{с}$
Песок	5	1200	1,0/0,92	0,47/0,6	3,9/5,6
	10	1200	1,13/0,92	0,72/0,92	5,3/8,1
	5	1400	1,0/0,88	0,66/0,8	4,7/6,4
	10	1400	1,1/0,92	1,0/1,95	6,7/9,2
	15	1400	1,21/1,0	1,16/1,57	6,9/10,6
	15	1600	1,21/1,1	1,45/1,86	7,5/11,9
	15	1800	1,21/0,96	1,8/2,2	8,3/12,5
	15	2000	1,21/0,96	2,2/2,56	8,3/13,1
Супесь	10	1200	1,13/0,92	0,44/0,52	3,3/4,7
	10	1400	1,1/0,92	0,84/0,8	3,9/6,1
	15	1600	1,21/0,96	1,1/1,28	5,6/8,3
	15	1800	1,21/0,96	1,38/1,52	6,4/8,6
	15	2000	1,21/0,96	1,63/1,74	6,7/8,9
Суглинки и глины	10	1400	1,10/0,92	0,51/0,79	3,3/6,1
	15	1400	1,21/1,00	0,65/0,98	3,9/6,9
	20	1400	1,34/1,05	0,76/1,09	4,2/7,5
	20	1600	1,34/1,05	1,02/1,30	4,7/7,8
	20	1800	1,34/1,05	1,10/1,40	4,7/8,1
	20	2000	1,34/1,05	1,44/1,70	5,6/8,6
Уголь	3	1400	1,05	0,29/0,3	1,9/1,9
	10	1450	1,26/1,13	0,3/0,41	1,9/2,5
Песчаник	3	2500	0,84/0,84	2,6/2,6	12,2/12,2
	6	2500	0,92/0,88	2,7/2,8	11,7/12,8
Глинистый и песчаный и сланцы	2	2500	0,84	1,7/1,7	8,3/8,3
	6	2500	0,92	1,86/1,98	8,1/8,6



Значения коэффициента диффузии некоторых типов горных пород в зависимости от температуры и влажности

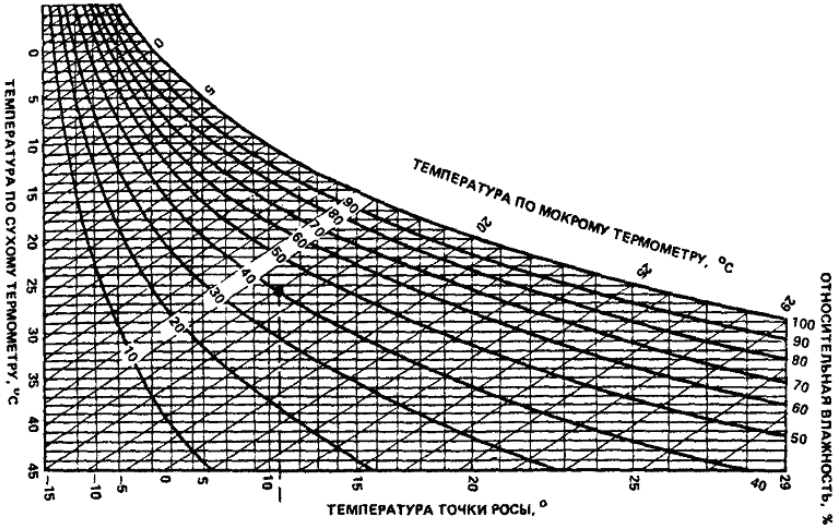
a - детритовый известняк; *б* - крупноолитовый известняк; *в* - плотный известняк; *г* - мелкоолитовый известняк; *д* - кристаллический известняк; *е* - туф; *ж* - уплотненный известняк

Приложение 2

Термодинамические свойства воздуха при давлении 0,101 МПа

t, °C	Теплофизические свойства сухого воздуха					P _{нас} , МПа	k _{нас} , кг/м ³
	ρ _в , кг/м ³	c _в , кДж/(кг·°C)	λ _в , Вт/(м·°C)	a _в ·10 ⁶ , м ² /с	ν _в ·10 ⁶ , м ² /с		
-20	1,396	1,009	2,28	16,2	12,79	1,23	1,1
-18	1,385	1,009	2,3	16,4	12,72	1,48	1,3
-16	1,374	1,009	2,31	16,7	12,65	1,74	1,5
-14	1,363	1,009	2,33	16,9	12,57	2,06	1,7
-12	1,353	1,009	2,34	17,2	12,5	2,44	2,0
-10	1,342	1,009	2,36	17,4	12,43	2,85	2,3
-8	1,332	1,009	2,38	17,7	12,6	3,265	2,7
-6	1,322	1,008	2,39	18	12,77	3,83	3,1
-4	1,312	1,007	2,41	18,2	12,94	4,48	3,6
-2	1,303	1,006	2,42	18,6	13,11	5,24	4,2
0	1,293	1,005	2,44	18,8	13,28	6,09	4,9
2	1,284	1,005	2,45	19	13,46	7,05	5,6
4	1,275	1,005	2,47	19,3	13,63	8,11	6,4
6	1,265	1,005	2,48	19,5	13,81	9,31	7,3
8	1,256	1,005	2,5	19,8	13,98	10,66	8,3
10	1,248	1,005	2,51	20	14,16	12,25	9,4
12	1,239	1,005	2,53	20,3	14,34	14	10,6
14	1,23	1,005	2,54	20,6	14,52	15,94	12
16	1,222	1,005	2,56	20,8	14,7	18,13	13,6
18	1,213	1,005	2,57	21,1	14,88	20,6	15,3
20	1,205	1,005	2,59	21,4	15,06	23,3	17,2

Приложение 3



Психрометрическая диаграмма

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Условные обозначения.....	4
1. Выбор исходных данных для расчетов теплового режима горных выработок и горных массивов.....	6
2. Расчет тепловыделений от энергетических источников.....	9
3. Определение коэффициентов тепло- и массоотдачи	11
4. Определение коэффициентов нестационарного тепло- и массообмена между воздухом и породами	12
5. Расчёт распределения температуры воздуха по длине выработки.....	27
6. Расчёт полей температур и влагосодержаний в породном массиве, окружающем горные выработки	29
Библиографический список.....	39
Приложение 1	40
Приложение 2	43
Приложение 3	44

ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ И ГОРНЫХ МАССИВАХ

*Методические указания к практическим занятиям
для студентов магистратуры направления 20.04.01*

Сост.: *С.Г. Гендлер, И.Р. Фазылов*

Печатается с оригинал-макета, подготовленного кафедрой
безопасности производств

Ответственный за выпуск *С.Г. Гендлер*

Лицензия ИД № 06517 от 09.01.2002

Подписано к печати 03.12.2021. Формат 60×84/16.
Усл. печ. л. 2,6. Усл.кр.-отт. 2,6. Уч.-изд.л. 2,2. Тираж 30 экз. Заказ 1092.

Санкт-Петербургский горный университет
РИЦ Санкт-Петербургского горного университета
Адрес университета и РИЦ: 199106 Санкт-Петербург, 21-я линия, 2