

**Л.А. ПУЧКОВ
Г.М. ЕРЕМИН**

**ТЕПЛО-
ВЛАГОПЕРЕНОС
В ПОРОДАХ ОТВАЛОВ
И ИХ ДЕФОРМАЦИИ**



**МОСКВА
ИЗДАТЕЛЬСТВО «ГОРНАЯ КНИГА»
2016**

УДК 622.693.26+621.1.016.4(03)

ББК 33.1

П70

Книга соответствует «Гигиеническим требованиям к изданиям книжным для взрослых. СанПиН 1.2.1253—03», утвержденным Главным государственным санитарным врачом России 30 марта 2003 г. (ОСТ 29.124—94). Санитарно-эпидемиологическое заключение Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей № 77.99.60.953.Д.014367.12.15

Пучков Л.А., Еремин Г.М.

П70 Тепло- влагоперенос в породах отвалов и их деформации. — М.: Издательство «Горная книга», 2016. — 135 с.: ил.
ISBN 978-5-98672-442-3

Приведены основные положения новых воззрений на устойчивость и деформируемость породных откосов отвалов на карьерах. С привлечением знаний и свойств физических тел из различных областей науки (климатология, геология месторождений полезных ископаемых, механики и физики горных пород) показаны особенности и закономерности изменения физико-механических свойств пород отвалов во времени в результате теплообменных процессов между слоями пород различных сезонов, перемещения заземленного воздуха и фильтрации воды. Устойчивость отвалов и их деформации могут зависеть от соотношения количества тепла (холода) в породах отвалов и интенсивности протекания теплообменных процессов в контактных зонах и увлажнения (водонасыщения) пород. Определены условия, при которых отвалы могут постепенно смещаться по склону или деформироваться по типу горных селей. Установлена пластическая составляющая деформаций, что позволяет рекомендовать к применению на карьерах самотранспортирующихся отвалов за контуры карьера с большим

Для специалистов, занимающихся проблемами устойчивости отвалов на карьерах, а также для студентов горнотехнического профиля.

УДК 622.693.26+621.1.016.4(03)

ББК 33.1

ISBN 978-5-98672-442-3

© Л.А. Пучков, Г.М. Еремин, 2016

Издательство «Горная книга», 2016

© Дизайн книги. Издательство «Горная кни-

га», 2016

1. КЛИМАТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РАЙОНОВ СЕВЕРНЫХ ШИРОТ, ГДЕ ВЕДУТСЯ РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Северные районы нашей страны, где ведётся разработка месторождений как открытым, так и закрытым способом отличаются рядом специфических особенностей. К таким районам можно отнести Хибины и Заполярный на Кольском полуострове, Норильск, Удокан и др.

Наряду с общими характерными чертами этих районов, таких как суровые природные условия, удалённость от основных промышленных центров, слабая транспортная связь с ними, недостаточная развитая инфраструктура районов они отличаются также большим разнообразием климатических, топографических, инженерно-геологических и гидрогеологических условий.

Опыт разработки месторождений в этих зонах показал, что увеличение жесткости погоды, низкие температуры, туманы, атмосферные осадки, снеговетровые потоки и заносы в карьерах значительно влияют на все процессы открытых горных работ, вызывая простой основного горнотранспортного оборудования, процессов добычи в карьерах, снижая их оптимальные параметры и показатели, особенно при ведении вскрышных работ и отвалообразования в различные сезоны и, особенно в холодные периоды года [1, 2, 3].

Многолетние и сезонные колебания горных пород приводит к изменению физико-технических и технологических свойств пород с изменением их температурного и теплового режима, следствием чего является сезонная глубина оттаивания и промерзания пород, морозного пучения и наледообразования и др. [3, 4, 5]

На графиках рис. 1.1, 1.2 показано изменение температуры наружного воздуха и выпадение твёрдых осадков в районах Хибин, Удокана и Норильска.

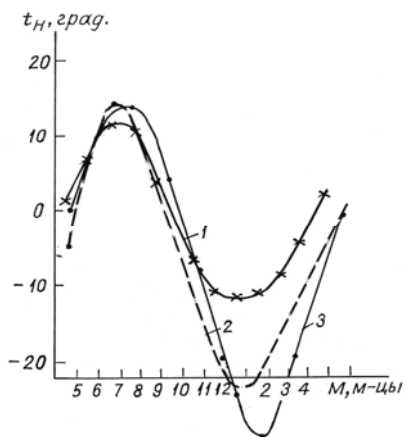


Рис. 1.1. Изменение температуры воздуха по месяцам для районов Хибин (1), Норильска (2), Удокана (3)

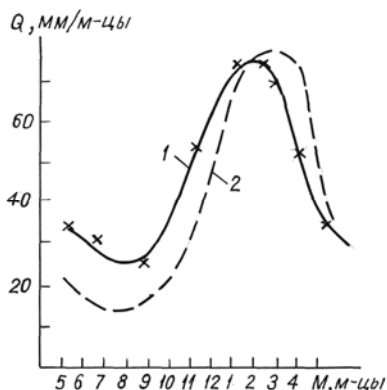


Рис. 1.2. Изменение выпадения осадков в течение года в районах 1 – Хибин; 2 – Норильска

На рис. 1.3 приведено изменение температуры пород от наружного воздуха. На рис. 1.4 показана прочность замерзающих пород со значительным включением глинистых частиц – район Норильска (1) и при попадании снега в породу, руду – Хибин (2,3).

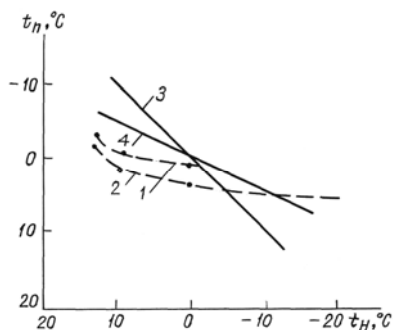


Рис. 1.3. Изменение температуры промерзания с глубиной: 1 – нулевая изотерма; 2 – $p_n = 7$ м, $t = -4^\circ\text{C}$; 3 – температура поверхности почвы от $t_{\text{нар}}$: $H_{\text{упр}} = 7-8$ м

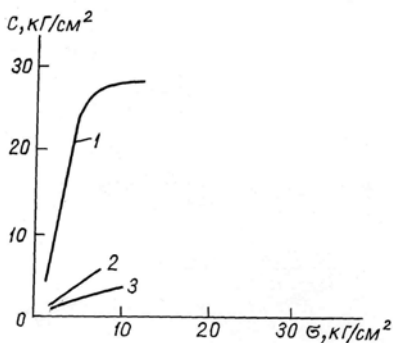


Рис. 1.4. Изменение сцепления пород при замерзании глинистой породы (Норильск) (1) и кусковатого материала (Хибин) (2, 3) (со снегом)

По данным исследований, если районы Норильска относятся к зонам с вечной мерзлотой, то в районе Хибин склоны гор с северной ориентацией имеют промерзание до 100 м, а в южных температура коренных пород ниже 10 м находится на уровне +2,6–2,8.

Ниже приводятся результаты изучения влияния тепловых процессов на изменение физико-механических свойств пород отвалов и их устойчивости на склонах.

2. ИЗУЧЕНИЕ СЕЗОННОЙ СТРУКТУРЫ ПОРОД ОТВАЛОВ И ИХ ВЛИЯНИЯ НА УСТОЙЧИВОСТЬ НА СКЛОНАХ

Изучение условий отвалообразования в различных климатических зонах показывает, что отвальная порода по действующим инструкциям, как холодного, так и теплого периодов отсыпки размещается в одни и те же отвалы [1, 2, 3].

Для выяснения причины особенностей деформации отвалов в разных зонах проведено изучение опыта эксплуатации отвалов на рудниках Центральный и Восточный АО «Апатит» на протяжении 20–30 летнего периода их эксплуатации.

На графике рис. 2.1 приведены структуры пород отвалов, отсыпанных в различные периоды (табл. 2.1). При этом красным цветом показаны слои теплого периода отсыпки. Отвалы пород, отсыпанные на южных склонах № 4, № 4а, № 6, № 13, № 17, кроме отвалов № 1, № 2 деформировались типа техногенных горных селей с обрушением в долины. Последние два отвала деформировались с постепенным сползанием по склону. Из других отвалов № 5 (вторая половина) вообще не деформировался (примёрз к склону). Отвалы северной и северо-восточной экспозиции (№ 8, 9, 10) деформировались плавно без разрыва сплошности и без разжижения пород, и смещались на пологие участки склонов длительно по времени (10–15 лет и более).

Таблица 2.1

Характеристика отвалов рудника Центральный АО «Апатит» в начальный период их эксплуатации

Номер отвала	Отсыпка отвала		Срок работы отвала, месяцев	Объем отсыпанного порошка, млн м ³	Интенсивность отсыпки, тыс. м ³ /м	Отметка рабочей площадки отвала, м	Высота отвала, м	Длина фронта отсыпки, м	Средний угол наклона основания, град.	Горизонтальная проекция длины отвала, м	Средняя вертикальная мощность отвала, м	Площадь отвала на склоне, тыс. м ²	Расстояние от отвала от стальной орошейки, м
	начало	конец											
1	Октябрь 1961 г.	Октябрь 1964 г.	33	2.05	62	1038	190	290	32	280	28	125	58
2	Август 1964 г.	Июль 1965 г.	12	0.83	69	1013	217	100	35	260	24	35	—
3	Октябрь 1964 г.	Действует	50	2.70	54	1050, 1060	400	270	30	630	21	220	—
4	Август 1964 г.	Март 1967 г.	30	1.44	48	1000, 985, 970	200	130	37	300	30	51	40
4а	Июль 1969 г.	Июль 1970 г.	13	0.86	66	985, 970		80	37				
5	Февраль 1967 г.	Апрель 1969 г.	15	3.22	214	985	280	250	33	415	27	180	16
6	Апрель 1967 г.	Декабрь 1969 г.	24	2.44	101	1000, 985, 970	280	80	32	465	47	53	77
7	Март 1968 г.	Февраль 1969 г.	11	0.42	38	960	205	110	27	300	16	27	32
8	Апрель 1968 г.	Действует	20	3.59	180	1015, 985	360	160	35	660	29	233	29
9	Апрель 1969 г.	Октябрь 1970 г.	13	2.09	161	970	270	170	31	450	34	400	39
10	Сентябрь 1969 г.	Действует	10	1.49	149	1026	300	20	32	480	24	115	

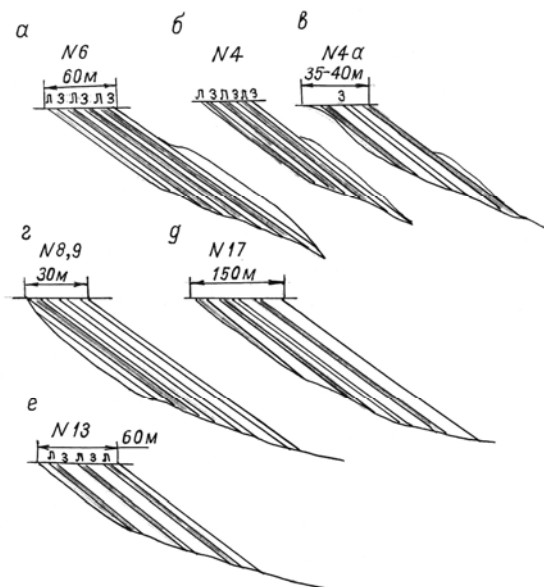


Рис. 2.1. Схема структур пород отвалов формировавшихся ранее на крутых склонах обрушившихся как техногенные соли (отвалы № 4-17) 1 - теплый период отсыпки

Роль и влияние слоев теплого периода отсыпки пород будет прослежена ниже на основе изучения всех факторов, как горногеологического характера, так теплофизических свойств пород при смерзании и таянии снега в них.

На графике рис. 2.2 показана глубина промерзания для районов Норильска (1) и Хибин (2) в зависимости от комплексного параметра произведения времени в сутках на отрицательную температуру воздуха. Глубина промерзания может быть также определена по зависимостям, приведённым на рис. 2.3, иллюстрирующих линейную связь отношения глубины промерзания к температуре воздуха и слоя от времени (в сутках) в полулогарифмических координатах и глубины промерзания от времени в логарифмических координатах.

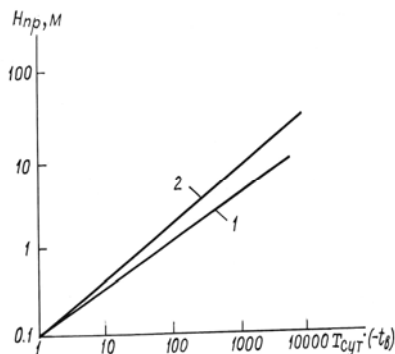


Рис. 2.2. Изменение глубины промерзания в зависимости от времени и отрицательной температуры воздуха: 1, 2 – соответственно район Норильска и Кировска

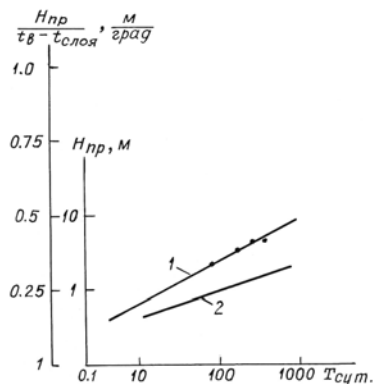


Рис. 2.3. Изменение глубины промерзания на градус разности температуры воздуха и слоя замерзания во времени: 1, 2 – соответственно при $t = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$; $t = -5\text{ }^{\circ}\text{C}$

Скорость промерзания можно оценить по зависимости, приведённой на графике рис. 2.4 и объясняющей линейную зависимость этой скорости от отношения времени к разности температур воздуха и пород в логарифмических координатах.

Скорость оттаивания и время оттаивания может быть определена на основе данных эксперимента, проведённого на установке по таянию снега в породе в зависимости от количества сообщаемого тепла и скорости продвижения материала.

На графиках рис. 2.5, 2.6 показана зависимость времени оттаивания снега в зависимости от удельного количества тепла (температуры) сообщаемого единице породной массы. Чем выше эта величина, тем быстрее происходит таяние снега и наоборот. Соотношение долей оттаявшего материала к количеству сообщаемого тепла имеет криволинейную зависимость от разности температуры сообщаемого тепла и температуры породы со снегом. Время оттаивания сокращается при повышении доли тепла к единице материала со снегом и размера (толщины) тающего тела (рис. 2.7).

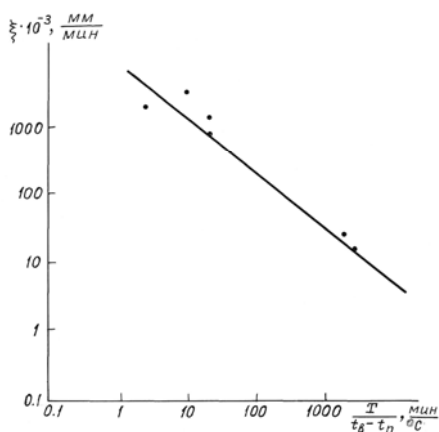


Рис. 2.4. Изменение скорости промерзания в зависимости от соотношения время – разность температур воздуха и нагревания пород

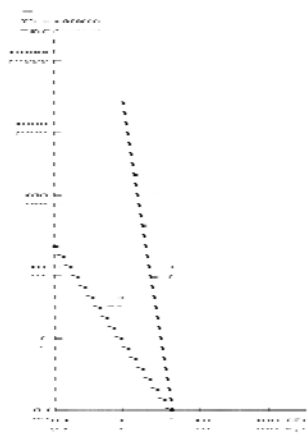


Рис. 2.5. Изменение времени оттаивания пород в зависимости от температуры: 1,2 – соответственно при высоких и низких температурах

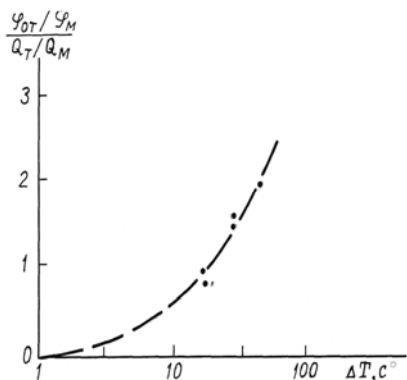


Рис. 2.6. Изменение соотношения доли оттаявшего материала к мерзлоте к соотношению количества тепла подогрева к мерзлоте в зависимости от разности температур подогрева и мерзлых пород

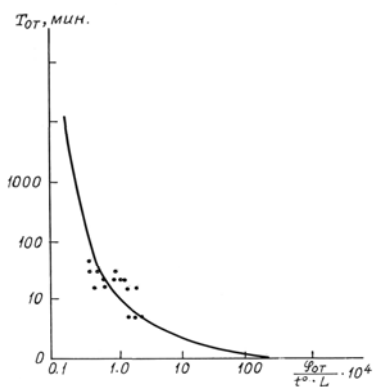


Рис. 2.7. Изменение времени оттаивания породы в зависимости от отношения доли оттаявшей породы к температуре и глубине оттаивания

3. ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ГОРНЫХ ПОРОД

3.1. Теплофизические показатели и свойства мелкодисперсных пород

По методу Н.С.Иванова коэффициент теплопроводности определяется по формуле [4]:

$$\lambda = m \frac{\Delta v_1 + \Delta v}{\Delta v_o} \quad (3.1)$$

где m – коэффициент формы; Δv – перепада температур на тепломерных пластинах; Δv_o – перепад температуры на 2-х горных образцов.

Разработан графоаналитический метод определения температуропроводности (Иванов, 1956 г.).

Коэффициент кондуктивной теплопроводности мерзлых горных пород в зависимости от температуры:

$$\lambda(v') = \lambda_T + (\lambda_M - \lambda_T) \left\{ \frac{A}{W_o} \left[\frac{1}{(1 + a\Delta v + b\Delta v)^2} - 1 \right] \right\} \quad (3.2)$$

Коэффициент температуропроводности промерзших песчанистых горных пород определяется согласно комплексной номограмме на рис. 3.1.

Правая часть этой номограммы (рис.3.1, б) позволяет определить значение коэффициента температуропроводности при заданных значениях льдистости, объемной плотности минерального скелета и для значения отношения $\Delta\lambda/\lambda_T = -0,4$. Левая часть (рис. 3.1, а) предназначена для отыскания истинного значения коэффициента температуропроводности при заданном значении этого отношения.

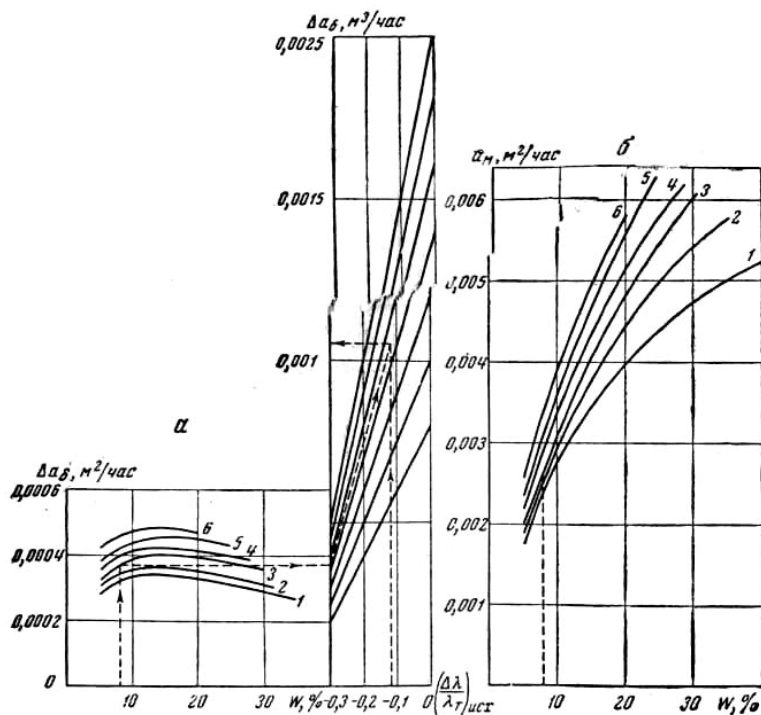


Рис. 3.1. Номограмма для определения коэффициента температуропроводности промерзших песчанистых горных пород в зависимости от влажности и объемной плотности: значения $\gamma_{\text{ск}}$, кг/м³: 1 – 1300; 2 – 1400; 3 – 1500; 4 – 1600; 5 – 1700; 6 – 1800

П р и м е р . Определить коэффициент температуропроводности промерзших песчанистых горных пород при следующих параметрах: $W = 8 \%$, $\gamma_{\text{ск}} = 1500$ кг/м³, $(\Delta\lambda/\lambda_T)_{\text{исх}} = -0,12$.

Из номограммы (рис. 3.1, б) находим коэффициент температуропроводности при заданных параметрах W и $\gamma_{\text{ск}}$ и при $(\Delta\lambda/\lambda_T)_{\text{исх}} = -0,4$; он равен: $a'_m = 0,0027$ м²/час. При тех же значениях W и $\gamma_{\text{ск}}$ и заданном значении $(\Delta\lambda/\lambda_T)_{\text{исх}} = -0,12$, находим поправку Δa_δ из номограммы (рис. 3.1, а).

Эта поправка находится в точке пересечения пунктирных линий, показанных на номограмме; она равна:

$\Delta a_{\delta} = 0,00105 \text{ м}^2/\text{час}$. Искомый коэффициент температуропроводности находится из соотношения: $a_m = a'_m + \Delta a_{\delta} = 0,00375 \text{ м}^2/\text{час}$.

Коэффициент температуропроводности промерзших глинистых горных пород находится из номограммы на рис. 3.2, *а, б* аналогично схеме определения песчанистых сред с той лишь разницей, что вместо отношения $(\Delta\lambda/\lambda_T)_{\text{исх}}$ здесь используется приращение $\Delta\lambda_{\text{исх}}$.

Пример. Определить коэффициент температуропроводности промерзших глинистых горных пород при следующих значениях параметров: $W = 17,5 \%$, $\gamma_{\text{ск}} = 1400 \text{ кг/м}^3$ и $\Delta\lambda_{\text{исх}} = 0,135$.

По номограмме (рис.3.2, *а*) находим значение a'_m при заданных W и $\gamma_{\text{ск}}$ и при $\Delta\lambda_{\text{исх}} = -0,1$; оно равно $a'_m = 0,00216$. По номограмме (рис. 3.2, *б*) определяем поправку Δa_{δ} для значения $\Delta\lambda_{\text{исх}} = 0,135$ она равна $\Delta a = 0,00045$. Искомый коэффициент температуропроводности при заданных значениях параметров находится из соотношения:

$$a_m = a'_m + \Delta a_s = 0,021 \text{ м}^2/\text{час}.$$

Для горных пород в области положительных температур перенос тепла термоградиентным механизмом можно оценить с помощью эффективного коэффициента температуропроводности:

$$\lambda_{\text{э.т.}} = \lambda_{\text{к.т.}} + \gamma_{\text{ск}} (a'_{\text{в}} \cdot \delta_{\text{в}} \cdot h_{\text{в}} + a_{\text{п}} \cdot \delta_{\text{п}} \cdot h_{\text{п}}). \quad (3.3)$$

где $\lambda_{\text{к.т.}}$ – коэффициент кондуктивной теплопроводности такого материала, $a'_{\text{в}}$, $a_{\text{п}}$ – коэффициенты потенциалопроводимости влаги, $h_{\text{в}}$, $h_{\text{п}}$ – энтальпия влаги и пара, $\delta_{\text{в}}$, $\delta_{\text{п}}$ – термоградиентные коэффициенты влаги и пара.

Для категорий почв и горных пород вся или значительная часть воды находится в жидком состоянии. Это означает, что изменение коэффициента теплопроводности почв

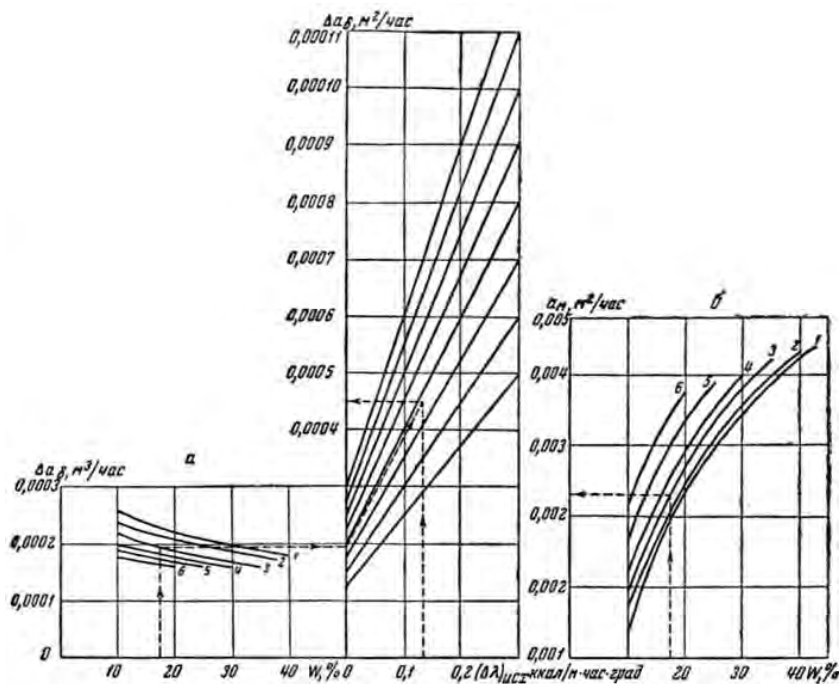


Рис. 3.2. Номограмма для определения коэффициента температуропроводности промерзших глинистых горных пород в зависимости от влажности и объемной плотности: значения $\gamma_{ск}$, кг/м³: 1 – 1200; 2 – 1300; 3 – 1400; 4 – 1500; 5 – 1600; 6 – 1700

и горных пород на первой стадии охлаждения при общем влагосодержании, не превышающем 5–6 %, будет определяться для тонкодисперсных сред в основном величиной температурного коэффициента теплопроводности K_λ . Уменьшение K_λ в интервалах температуры $+4,5^\circ \div -4^\circ$ и влажности 0–6 % и наличие минимума функции $K_\lambda(W)$ свидетельствуют о положительной величине температурного коэффициента теплопроводности.

Под температурным коэффициентом теплопроводности понимается величина, определяемая из соотношения:

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. КЛИМАТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РАЙОНОВ СЕВЕРНЫХ ШИРОТ, ГДЕ ВЕДУТСЯ РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ	5
2. ИЗУЧЕНИЕ СЕЗОННОЙ СТРУКТУРЫ ПОРОД ОТВАЛОВ И ИХ ВЛИЯНИЯ НА УСТОЙЧИВОСТЬ НА СКЛОНАХ	7
3. ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ГОРНЫХ ПОРОД	12
3.1. Теплофизические показатели и свойства мелкодисперсных пород	12
3.2. Теплофизические характеристики крупнодисперсных пород	22
4. АНАЛИЗ ДАННЫХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГОРНЫХ ПОРОД И ИХ ИЗМЕНЕНИЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ КОМПЛЕКСНЫХ ФАКТОРОВ	24
5. ИЗУЧЕНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ФИЛЬТРАЦИИ ВОЗДУХА И ВЛАГИ В ПОРИСТЫХ СРЕДАХ КАК ОТВАЛЬНАЯ ГОРНАЯ МАССА	33
5.1. Выявление особенностей и закономерностей процессов филь- трации воздуха в мелкозернистых средах по опытным данным	33
5.2. Определение количественных показателей фильтрующегося воздуха через кусковую массу, содержащую мелкозернистые фракции	46
5.3. Особенности и закономерности фильтрации жидкости и газа в обрушенных породах (блоках)	49
5.4. Учёт числа Рейнольдса при фильтрации жидкости и газа (воз- духа) в породах отвалов	52
6. ОСОБЕННОСТИ И ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПЕРЕДАЧИ ТЕПЛА В ПОРОДАХ	59
6.1. Общие положения о передаче тепла в горных породах	59
6.2. Тепло-воздухообмен между слоями пород и фильтрация воз- духа и воды при таянии снега	62
6.2.1. Оценка количества тепла при таянии 1 м ³ породы	69
6.3. Оценка количества тепла в слоях породы в отвале	70
6.4. Теплообмен в слоях породы различных сезонов отвалообразования	73
6.4.1. Методические положения по оценке количества тепла, идущего на таяние снега	73

6.5. Определение количественных показателей процессов снеготаяния и формирования поверхности ослабления в породах отвала и его деформации.....	82
6.5.1. Оценка объема пор в породах отвала и количества переносимого тепла.....	82
6.6. Определение продолжительности снеготаяния и водонасыщения пород отвалов и их скоростей деформации до обрушений.....	84
6.7. Примеры расчета устойчивости отвалов	86
7. ОБОСНОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОРОД В ПРОЦЕССЕ ТАЯНИЯ СНЕГА И РАЗВИТИЯ ДЕФОРМАЦИЙ ОТВАЛОВ	90
7.1. Изменения прочностных характеристик пород в процессе эксплуатации отвалов	90
7.2. Определение продолжительности эксплуатации отвала до начала интенсивной его деформации	98
7.3. Сценарий развития деформаций отвалов и их обрушение со склонов	102
8. ТЕХНОЛОГИИ ОТВАЛООБРАЗОВАНИЯ И ПАРАМЕТРЫ ОТВАЛОВ	108
8.1. Обоснование выбора рационального расположения основного отвала на Центральном руднике с экологических позиций при доработке карьера до отметки минус 50 м	117
ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ.....	129
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	132