МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования

«Забайкальский государственный университет»

(ФГБОУ ВО «ЗабГУ»)

Факультет горный

Кафедра подземной разработки месторождений полезных ископаемых

**УЧЕБНЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

**для студентов заочной формы обучения**

по дисциплине «Термодинамика»

для специальности 21.05.04Горное дело

специализация «Подземная разработка рудных месторождений»

Общая трудоемкость дисциплины (модуля)

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Виды занятий | Распределение по семестрам | | | Всего часов |
| 6  семестр | ----семестр | ----  семестр |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Общая трудоемкость | 216 |  |  | 216 |
| Аудиторные занятия, в т.ч.: | 22 |  |  | 22 |
| лекционные (ЛК) | 10 |  |  | 10 |
| практические (семинарские) (ПЗ, СЗ) | 12 |  |  | 12 |
| лабораторные (ЛР) | - |  |  | - |
| Самостоятельная работа студентов (СРС) | 158 |  |  | 158 |
| Форма промежуточной аттестации в семестре | 36 |  |  | 36 |
| Курсовая работа (курсовой проект) (КР, КП) | - |  |  | - |

**Краткое содержание курса**

|  |  |
| --- | --- |
| № темы, раздела | Наименование тем, разделов дисциплины |
| 1 | 2 |
|  | ***Основные понятия термодинамики:***  Термодинамические системы и их параметры; внутренняя энергия и внешняя работа; первый закон термодинамики.  ***Термодинамические процессы:***  Понятие о термодинамических процессах; энтальпия и энтропия; второй и объединенный законы термодинамики; термодинамическая вероятность и третий закон термодинамики; теорема Нернста; нулевое начало термодинамики; уравнения состояния.  ***Фазовые переходы в горных породах:***  Общие сведения о фазовых переходах; фазовые переходы первого и второго рода; полиморфные превращения; основные уравнения термодинамики фазовых переходов; фазовые переходы при неодинаковом давлении фаз; давление в сосуществующих фазах при искривленной поверхности их раздела; уравнение Пойнтинга.  ***Основы химической термодинамики:***  Тепловые эффекты химических реакций; закон Гесса и его следствия; уравнение Кирхгофа; химическое равновесие; принцип Ле Шателье.  ***Теплофизические свойства минералов и горных пород:***  Теплоемкость, теплопроводность и температуропроводность минералов и горных пород; способы их измерения и расчета; их зависимость от температуры; тепловое расширение минералов и горных пород и остаточные температурные деформации в горных породах.  ***Физико-механические, электрические и магнитные свойства минералов и горных пород:***  Упругие, прочные, электрические и магнитные свойства минералов и горных пород и их зависимость от температуры; комплексы физических свойств горных пород и их зависимость от температуры.  ***Физико-механические, теплофизические и водно-физические свойства мерзлых горных пород и их строение:***  Подземные льды; физико-механические, электрические, теплофизические свойства мерзлых горных пород; зависимость свойств мерзлых горных пород от температуры, литологического и гранулометрического состава; терминология; особенности разработки мерзлых и талых рыхлых горных пород. |
|  | ***Потоки жидких и газовых теплоносителей:***  Уравнение первого закона термодинамики для потока; основные дифференциальные уравнения процессов течения жидкости и газов; сопло Ловаля; температура адиабатного торможения потока.  ***Теплообмен в горных породах:***  Основной закон теплопроводности (уравнение Фурье); дифференциальное уравнение теплопроводности; частные случаи данного уравнения; начальные, граничные и краевые условия; источники тепла и тепловые режимы; виды теплоносителей и теплообмена; методы определения термодинамических параметров теплоносителей; пограничный слой и механизм конвективного теплообмена.  ***Методы расчета основных параметров тепловых процессов:***  Критерии подобия в термодинамике, физический смысл и пределы их изменений; безразмерные величины, имеющие смысл критериев; условия однозначности; методы расчета основных параметров тепловых процессов. |
|  | ***Тепло земных недр:***  Термодинамические параметры земной коры; источники тепла земных недр; процессы теплопереноса в недрах Земли; использование тепла земных недр; типы геолого-тектонических геотермических областей; мерзлые породы как термодинамические системы.  ***Замораживание горных пород при проведении выработок***:  Сущность способа проходки выработок с предварительным замораживанием пород; технология проходки выработок; схемы замораживания при строительстве стволов, горизонтальных и наклонных выработок.  ***Термическое и термодинамическое разрушение пород:***  Огневое бурение и расширение скважин; физическая сущность и термодинамические модели процессов; оборудование и технология.  Бурение скважин при использовании двухфазных теплоносителей и знакопеременном тепловом воздействии; физическая сущность и термодинамические модели процессов; оборудование и технология.  Электротермический способ разрушения горных пород; физическая сущность и термодинамическая модель процесса.  ***Промерзание горных пород:***  Определение глубины промерзания поверх­ностного слоя горных пород; влияние состава по­род, их влажности и теплофизических характеристик на процесс промерзания горных пород; излучение, поглащение и отражение лучистой энергии; энергетический (тепловой) баланс Земли. Суммарная солнечная радиация. Отраженная коротко-волновая радиация и длинноволновое эффективное излучение. Структура теплового баланса.  ***Оттайка мерзлых горных пород:***  Характеристики способов оттаивания мерзлых пород; условия при­менения различных способов оттайки; технология солнечно-радиационного оттаивания; технология фильтрационно­-дренажного оттаивания; технология фильтрационно-дождевального оттаивания; технология игловой гидрооттайки.  ***Окускование полезных ископаемых и концентратов:***  Назначение и классификация процессов окускования; агломерация, окомковывание, брикетирование полезных ископаемых. |

**Форма текущего контроля**

***Контрольная работа***

К решению практических работ следует приступать только после изучения соответствующего раздела курса. Решать задания, строго придерживаясь своего варианта. Номера вариантов заданий в практических работах определяются по таблице вариантов в зависимости от последней цифры номера зачетной книжки студента.

**При выполнении задания соблюдать следующие условия:**

- выписывать условия задачи и исходные данные;

- решение задач сопровождать кратким пояснительным текстом, в котором указывать, какая величина определяется и по какой формуле, какие величины подставляются в формулу, и откуда они берутся;

- вычисления производить в единицах системы СИ;

- после решения задачи нужно дать краткий анализ полученных результатов и сделать выводы.

**Практические работы оформляются согласно МИ 01-03-2023 «Общие требования к построению и оформлению учебной текстовой документации»**

**ЗАДАНИЕ № 1**

Определить работу разрушения и изменение внутренней энергии негабаритного куска горной породы объема *V* (табл. 1) с начальной температурой *Т1* = 293 К при его термическом дроблении путем разогрева по поверхности пробуренного в нем шпура.

Считать, что при заданном способе дробления другие виды работ, кроме работы расширения куска породы, отсутствуют; удельная объемная теплоемкость *CV* и коэффициент теплового расширения ω в данном диапазоне температур постоянны; разрушение куска негабарита происходит в тот момент, когда давление расширения породы, направленное перпендикулярно радиуса шпура, достигнет при нагреве величины *σр.*

Таблица 1

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Наименование показателя | № варианта | | | | | | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Объем куска *V*, м3 | 0,8 | 1,6 | 1,2 | 1,8 | 1,9 | 2,0 | 1,9 | 1,0 | 1,6 | 1,4 |
| Среднее значение объемной теплоемкости *СV*, Дж/(м3⋅К) | 1600 | 1620 | 1640 | 1660 | 1680 | 1580 | 1610 | 1630 | 1650 | 1670 |
| Среднее значение коэффициента теплового расширения горной породы  *ω* ⋅105, 1/К | 2,0 | 2,1 | 2,2 | 2,1 | 2,0 | 2,1 | 2,2 | 2,0 | 1,9 | 1,8 |
| Температура негабарита при его разрушении *Т2*, К | 313 | 311 | 309 | 307 | 305 | 303 | 301 | 306 | 312 | 310 |
| Предел прочности породы на растяжение *σр* ⋅10-5, Па | 150 | 155 | 160 | 165 | 170 | 165 | 160 | 155 | 150 | 145 |

***Рекомендации к расчету***

Согласно первому закону термодинамики:

где *Q*1-2 – количество тепла, затраченного на разрушение негабарита, Дж;

*U*1-2 – изменение внутренней энергии негабарита, Дж;

*А*1-2 – работа разрушения (расширения) куска негабарита, Дж.

С учетом принятых допущений:

**ЗАДАНИЕ № 2**

Определить энтальпию *I* (Дж) и энтропию *S* (Дж/К) куска горной породы заданного состава и объема *V* (м3) при температуре *Т* (табл. 2). Изменение изобарной удельной теплоемкости *СР* (Дж/(кг⋅К)) от стандартной температуры *Т* = 298 К (25 °С) до заданной температуры происходит по закону

где *x, y, z* – постоянные коэффициенты;

*μ* – молекулярная масса минерала, кг/моль.

Значения теплофизических констант породообразующих минералов приведены в табл. 3.

Таблица 2

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Наименование  показателя | № варианта | | | | | | | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Минеральный состав куска, % (по объему):  - магнетит Fe3O4  - гематит Fe2O3  - кварц SiO2 | 35  30  35 | 40  25  35 | 40  20  40 | 35  25  40 | 30  25  45 | | 35  25  40 | 35  20  45 | 30  20  50 | 32  18  50 | 36  22  42 |
| Объем куска *V*, м3 | 1,2 | 1,9 | 1,3 | 1,8 | 1,4 | | 1,1 | 1,5 | 1,0 | 1,6 | 1,2 |
| Температура *Т*, К | 404 | 422 | 402 | 420 | 404 | | 418 | 406 | 416 | 408 | 414 |

Таблица 3

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Наименование  показателя | Величина | | |
| Магнетит | Гематит | Кварц |
| Плотность *γi*, кг/м3 | 5200 | 5274 | 2648 |
| Молекулярная масса *μi*, кг/моль | 0,23155 | 0,15970 | 0,06009 |
| Стандартная удельная :  - энтальпия *i298*, Дж/кг  - энтропия *s298*, Дж/(кг⋅К) | 106199  651,512 | 97504  547,692 | 115458  688,427 |
| Значения констант:  *- x*  *- y*  *- z*⋅10-5 | 39,22  0,01886  -10,01 | 23,49  0,01860  -3,55 | 11,22  0,00820  -2,7 |

***Рекомендации к расчету***

Энтальпия *I* (Дж) куска горной породы объема *V* при температуре *Т* определяется по выражению

где *I*298 и *I*T – энтальпия куска горной породы при стандартной температуре *Т* = 298 К (25 °С) и заданной температуре *Т*, Дж;

*i*298 и *i*T – удельная энтальпия горной породы заданного состава при стандартной температуре *Т* = 298 К (25 °С) и заданной температуре *Т*, Дж/кг;

*γ* – плотность куска горной породы, кг/м3.

Величины *i*298 и *i*T определяются с учетом их свойства аддитивности.

Величины *i*T*i* для каждого минерала определяются путем численного интегрирования следующего выражения

где *СP*(*Т*) – заданная функция изменения изобарной удельной теплоемкости *СP* от стандартной температуры 298 К до заданной температуры *Т*.

Энтропия S (Дж/К) куска горной породы объема *V* при температуре *Т* определяется по выражению

где *S*298 и *S*T – энтропия куска горной породы объема *V* при стандартной температуре Т = 298 К и заданной температуре *Т*, Дж/К;

*s*298 и *s*T – удельная энтропия горной породы заданного состава при стандартной температуре Т = 298 К (25 °С) и заданной температуре *Т*, Дж/кг.

Величины *s*298 и *s*T определяются также с учетом их свойства аддитивности.

Величины *s*T*i* для каждого минерала определяются путем численного интегрирования следующего выражения

**ЗАДАНИЕ № 3**

***Задача 3.1:***Построить графики зависимостей удельной теплоемкости, тепло- и температуропроводности горной породы заданного состава (табл. 4) от температуры *Т* при ее изменении от 293 К (20 °С) до 773 К (500 °С). Теплофизические свойства породообразующих минералов при температуре 293 К (20 °С) приведены в табл. 5.

Таблица 4

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Наименование  показателя | № варианта | | | | | | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Минеральный состав куска, % (по объему):  - гранит  - известняк  - песчаник | 35  65  - | 40  60  - | 30  70  - | 75  25  - | -  35  65 | -  60  40 | -  70  30 | -  20  80 | 20  80  - | 40  60  - |

Таблица 5

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Наименование  показателя | Величина | | |
| Гранит | Известняк | Песчаник |
| Плотность *γi*, кг/м3 | 2722 | 2478 | 2630 |
| Удельная теплоемкость *ci*, Дж/(кг⋅К) | 916,9 | 887/6 | 963,0 |
| Удельная теплопроводность *λi*, Вт/(м⋅К) | 1,637 | 0,724 | 1,482 |
| Константы, входящие в формулы зависимостей величин *ci* и *λi* от *Т*:  *- A*  *- n*, Дж/(кг⋅К⋅°С)  *- b*, 1/°С | 0,20  1,40  0,00027 | 0,38  2,40  0,00035 | 0,70  2,33  0,00025 |

***Рекомендации к расчету***

Удельная теплоемкость *ci*, (Дж/(кг·К)) минералов при температуре породы от 20 °С до 500 °С определяется по выражению

где *ci20* – удельная теплоемкость минерала при *Т = 20* °С, Дж/(кг·К);

*п –* константа, зависящая от типа породы, Дж/(кг·К·°С);

*TC –* температура породы в °C;

*i* =1, 2, 3 – порядковый номер минерала.

Удельная теплопроводность *λi*, (Вт/(м·К)) породообразующих минералов в диапазонах температур *ТC* от 20 °С до 200 °С *(λ200i*)и от 200 °С до 500 °С (*λ500i*) определяется по выражениям

где *λ20i* – удельная теплопроводность *i*-го минерала при *T* = 20 °С, Вт/(м·К);

*K1* – коэффициент, учитывающий слоистость пород (принять равным 1);

*b* – константа, зависящая от типа породы, 1/°С.

Удельную теплоемкость *c* (Дж/(кг·К)) и удельную теплопроводность *λ* (Вт/(м·К)) горной породы определить, учитывая, что они обладают свойством аддитивности. Например:

где *mi* – относительное массовое содержание *i*-го минерала в породе.

Удельное тепловое сопротивление *ξ* ((м·К)/Вт) горной породы определяется по выражению

Удельная температуропроводность породы *α* (м2/с) при заданных значениях температуры определяется по выражению

где *γ* – плотность горной породы, кг/м3.

Величину *γ* определить, как и величины *λ* и *c*, используя ее свойство аддитивности.

По полученным значениям *λ*, *c*, *α*, *ξ*, при *TC* равной 20, 200 и 500 °С, построить графики их зависимости от температуры. Сделать вывод по полученным данным.

***Задача 3.2:*** Определить удельное тепловое сопротивление *ξ*гп((м⋅К)/Вт) и удельную теплопроводность *λ*гп (Вт/(м⋅К)) горной породы ранее заданного состава (таблица 4) при *Т* = 20 °С с учетом ее пористости *П* и водонасыщенности порового пространства *Кв* (табл. 6).

Таблица 6

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Наименование  показателя | № варианта | | | | | | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| *П,* отн.ед. | 0,04 | 0,09 | 0,06 | 0,07 | 0,08 | 0,01 | 0,10 | 0,03 | 0,12 | 0,05 |
| *Кв,* отн.ед. | 0,50 | 0,55 | 0,60 | 0,45 | 0,70 | 0,35 | 0,80 | 0,25 | 0,40 | 0,15 |

***Рекомендации к расчету***

Величины *ξ*гп и *λ*гп = l/*ξ*гп определить, считая породу двухфазной изотропной и однородной, по выражению

где *ξ* и *ξ*з = 1/*λ*з – удельное тепловое сопротивление горной породы без учета ее пористости и водонасыщенности заполнителя порового пространства (смеси воздуха и воды), (м⋅К)/Вт.

Величина *λ*з определяется по выражению

где *λ*вод, *λ*в – удельная теплопроводность воды (*λ*вод = 0,599 Вт/(м⋅К)) и воздуха (*λ*в = 0,0257 Вт/(м⋅К)) при T = 20 °С.

Значение удельного теплового сопротивления *ξ* горной породы при *TC* = 20 °С определено ранее (задача № 3.1).

**ЗАДАНИЕ №4**

*Расчет теплофизических характеристик горных пород*

Аналитическая теория теплопроводности представляет собой теорию распространения тепла в различных неравномерно нагретых телах. Эти материальные тела (горные породы) рассматриваются как сплошные среды, без учета молекулярного строения и молекулярных свойств веществ и характеризуются только лишь макросвойствами или теплофизическими характеристиками: коэффициентами теплопроводности и температуропроводности, удельной и объемной теплоемкостью и др.

Теплопроводность любого твердого вещества состоит из электронной проводимости, обусловленной движением свободных электронов и колебаниями атомов кристаллической решетки.

В металлических жидкостях (жидких или расплавленных металлах) распространение тепла происходит как и в твердых телах – главным образом электронной проводимостью.

В неметаллических жидкостях распространение тепла с одной стороны происходит, как и в твердых телах, а с другой – как в газах.

Самыми плохими проводниками тепла являются газы.

Коэффициент температуропроводности является основным тепловым параметром для процессов теплопроводности. Он характеризует соотношение между двумя тепловыми свойствами тела: способностью проводить тепло и способностью аккумулировать его.

Для определения теплофизических характеристик горных пород разработаны различные методы – стационарные, нестационарные и комплексные. Они позволяют на одном приборе измерять отдельные

тепловые свойства пород.

Конструкция лабораторных установок для определения теплофизических характеристик породы включает: образец породы, холодильник, нагреватель, термопары, тепломеры и другие различные измерительные приборы.

Образцы породы естественного сложения вырезают из монолита мерзлых горных пород в форме прямоугольной пластины или диска диаметром 0,06…0,08 м, толщиной 0,005…0,030 м.

Измерение температуры поверхности образцов горной породы и среды производится с помощью термопар или термометров сопротивления. Наибольшее распространение имеют медь-копелевые, медь-константановые, хромель-копелевые, платино-платинородиевые, тантал-вольфрам-рениевые и вольфрам-вольфрам-рениевые термопары. Для более точного измерения перепадов температур применяются дифференциальные многоспайные термопары.

Термо-ЭДС термопар измеряется компенсационными приборами – потенциометрами, гальванометрами и милливольтметрами.

Для измерения тепловых потоков используются тепломеры, как правило, работающие по методу дополнительной стенки.

Тепломеры тарируются при изготовлении и их шкала дается сразу в Вт/(м2. mВ).

***Рекомендации к расчету рассмотрены на примере:***

Определить теплофизические характеристики (коэффициенты теплопроводности, температуропроводности и удельную теплоемкость) образца мерзлой горной породы массой *mм* = 4,0 ⋅ 10-3, кг, объемом *V* = 2,0 ⋅ 10-6 м3.

Плотность скелета образца породы принять равной *ρп* = 2600 кг/м3. Температура образца горной породы *tобр*= – 18 °С. Толщина пластины горной породы *h* = 0,02 м. диаметр исследуемого образца горной породы *d* = 0,07 м. Пористость породы *n* = 0,31 дол. ед. Образец мерзлой горной породы помещен в калориметр. Температура блока калориметра *tбл* = 20,0 °С. Удельная теплоёмкость ампулы калориметра – с*а* = 390 Дж / (кг ⋅ °С). Масса ампулы – *mа*= 12,0 ⋅ 10-3 кг.

После включения нагревателя калориметра (время нагрева *τ* = 350 с, сопротивление нагревателя *R* = 9,0 Ом, сила тока, проходящего через нагреватель *I* = 0,3 А) температура на торцах образца составила *t1* = – 8,73 оС, *t2* = – 8,93 оС.

Показания разности температур по дифференциальной термопаре *Δtд* = 0,21 оС. Для определения потока тепла через образец породы используется тепломер марки № 4311, ЭДС тепломера *Е* = 10,9 mВ, а постоянная градуировки тепломера – *β* = 2,6 Вт/(м2. mВ).

Решение:

1. Средняя плотность образца горной породы в мерзлом состоянии (*ρср*) определяется по формуле



где *mм* – масса исследуемого образца породы, кг;

*V* – объем этого же образца горной породы, м3.

*ρср* = 4,0 . 10-3 / (2,0 . 10-6) = 2000 кг/м3.

1. Суммарная влажность образца горной породы (*Wс*) определяется по формуле



где *ρср* – средняя плотность горной породы в мерзлом состоянии;

*ρn* – плотность скелета породы;

*n* – пористость пород, доли ед.

*Wс* = {2000 / [(1 – 0,31) . 2600]} – 1 = 0,12 доли ед.

1. Льдистость образца горной породы (*G*) определяется по формуле



*G* = 2000 . [0,12 / (1 + 0,12)] = 214 кг/м3.

1. Количество тепла (*Q*), сообщенное блоку калориметра за время (*τ* ) определяется по формуле



где *I* – средняя сила тока, проходящего через нагреватель, А;

*Rн* – сопротивление нагревателя калориметра, Ом;

*τ* – время нагрева, с;

*Q* = 0,32 . 9,0 . 350 = 284 Дж.

1. Разность температур между блоком калориметра и образцом горной породы (*Δt*) определяется по формуле:

*Δt* = *tбл* – *tобр*.

Тогда *Δt* = 20,0 + 18,0 = 38,0 оС

1. Удельная теплоемкость образца горной породы (*см*) определяется по формуле



*см* = (284 – 390.12,0.10-3 .38,0) / (4,0 .10-3 .38,0) = 697,4 Дж/(кг. оC).

1. Объемная теплоемкость образца горной породы (*сом*) определяется по формуле



где *со* – объемная теплоемкость породы, кДж / (м3 . оС);

*с* – удельная теплоемкость породы, кДж / (кг . оС);

*ρ* – объемная масса горных пород, кг / м3

*сом* = 697,4 . 2000 = 1394800 Дж / (м3 .оС);

*сом* = 0,000278 . 1394800 = 387,7 Вт . ч/(м3 .оС),

здесь 0,000278 – переводной коэффициент из (Дж) в (Вт . ч).

1. Учитывая разность температур по показаниям термопар:

|*t2 – t1*| = 8,93 – 8,73 = 0,2 оС,

рассчитывается среднее значение разности температур на торцах образца горной породы (*Δt1*) по формуле:

*Δt1* = (|t2 – t1| + Δtд) / 2.

Тогда *Δt1* = (0,20 + 0,21) / 2 = 0,205 оС.

1. Градиент температур (*grad t*) определяется по формуле



где *Δt* – разность температур на противоположных сторонах пластины образца горной породы, оС;

*h* – толщина пластины образца горной породы, м.

*grad t* = 0,205 / 0,02 = 10,25 оС/м.

1. По величине ЭДС, используя градуировку тепломера, определяется поток тепла через образец горной породы (*q*) по формуле



где *Е* – ЭДС определяется по показаниям тепломеров, mВ;

*β* – постоянная шкала градуировки тепломеров, Вт / (м . mВ).

*q* = 10,9 . 2,6 = 28,34 Вт / м2.

1. Теплопроводность мерзлой (*λм*) и талой (*λт*) горной породы определяется в зависимости от потока тепла через образец соответственно по формулам



где *λ* – коэффициент теплопроводности пород, Вт / (м. оС);

*q* – тепловой поток, Вт/м2;

*grad t* – температурный градиент, оС/м.



где *λт* и *λм* – коэффициент теплопроводности соответственно мерзлых и талых пород, Вт/(м . оС)

*λм* = 28,34 / 10,25 = 2,76 Вт / (м . оС);

*λт*= 0,8 . λм = 0,8 . 2,76 = 2,21 Вт / (м . оС).

1. Коэффициенты температуропроводности мерзлой (*ам*) и талой (*ат*) горной породы определяются соответственно по формулам

ам = λм / Сом

ат = λ*т* / Сом

*ам*= 2,76 / 387,7 = 0,0071 м2/ч = 1,97 . 10-6 м2 / с;

*ат* = 2,21 / 387,7 = 0,0057 м2/ч = 1,58 . 10-6 м2 / с.

**Задание для самостоятельной работы**

Определить теплофизические характеристики горной породы (теплоемкость, коэффициенты теплопроводности и температуропроводности) согласно условиям, приведенным в табл. 7, 8.

*Таблица 7*

**Исходные данные к расчету теплофизических характеристик**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| № | Образец горной породы | | | | | Показания | Нагреватель | | |
| ва- рианта | масса (mобр) кг.10-3 | объем (V), м3. 10-6 | темпе-ратура (t), оС | толщина (h),  м | пористость (n),  доли ед. | дифференциальной термопары (Δt), оС | время нагрева (τ), с | сила тока (I), А | сопро-тивле- ние  (R), Ом |
| 1 | 3,64 | 2,00 | -18,03 | 0,014 | 0,342 | 0,156 | 327 | 0,320 | 9,00 |
| 2 | 3,68 | 1,90 | -17,54 | 0,015 | 0,326 | 0,169 | 280 | 0,326 | 9,05 |
| 3 | 3,84 | 1,80 | -16,12 | 0,016 | 0,340 | 0,185 | 316 | 0,327 | 9,02 |
| 4 | 4,73 | 2,15 | -15,34 | 0,017 | 0,334 | 0,194 | 310 | 0,328 | 9,07 |
| 5 | 4,37 | 2,10 | -14,22 | 0,016 | 0,342 | 0,210 | 295 | 0,329 | 9,08 |
| 6 | 5,05 | 2,50 | -13,18 | 0,014 | 0,325 | 0,226 | 317 | 0,330 | 9,09 |
| 7 | 4,51 | 2,15 | -12,84 | 0,020 | 0,339 | 0,242 | 309 | 0,321 | 9,10 |
| 8 | 3,99 | 2,05 | -12,66 | 0,015 | 0,333 | 0,261 | 281 | 0,322 | 9,11 |
| 9 | 5,49 | 2,50 | -12,24 | 0,017 | 0,337 | 0,278 | 293 | 0,323 | 9,12 |
| 10 | 5,02 | 2,30 | -12,08 | 0,016 | 0,318 | 0,289 | 305 | 0,324 | 9,13 |
| 11 | 3,96 | 2,00 | -11,91 | 0,019 | 0,346 | 0,306 | 327 | 0,325 | 9,14 |
| 12 | 4,17 | 2,00 | -11,44 | 0,018 | 0,341 | 0,320 | 309 | 0,326 | 9,15 |

*Таблица 8*

**Показания приборов**

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| №  ва-  ри-анта | Показания  термопар, оС | | Калориметр | | | Тепломер | |
| t1 | t2 | масса ампулы,  кг . 10-3 | теплоемкость ампулы,  Дж / (кг. оС) | температура блока, оС | ЭДС,  mВ | постоянная  градуировки,  Вт / (м2 . mV) |
| 1 | -11,925 | -12,087 | 12,5 | 390 | 21,07 | 10,45 | 2,0 |
| 2 | -5,144 | -5,307 | 12,4 | 390 | 21,46 | 10,52 | 2,1 |
| 3 | -3,365 | -3,538 | 12,3 | 385 | 20,48 | 10,68 | 2,2 |
| 4 | -4,282 | -4,720 | 12,2 | 385 | 21,56 | 10,79 | 2,3 |
| 5 | -8,734 | -8,934 | 12,1 | 380 | 20,88 | 10,92 | 2,4 |
| 6 | -9,023 | -9,237 | 12,0 | 380 | 21,52 | 11,14 | 2,5 |
| 7 | -7,488 | -7,722 | 13,9 | 375 | 21,96 | 11,44 | 2,6 |
| 8 | -6,592 | -6,849 | 13,8 | 370 | 22,54 | 11,88 | 2,7 |
| 9 | -10,454 | -10,720 | 13,7 | 385 | 23,66 | 11,91 | 2,8 |
| 10 | -4,062 | -4,345 | 13,6 | 380 | 23,12 | 12,02 | 2,9 |
| 11 | -7,295 | -7,591 | 13,5 | 385 | 24,09 | 12,14 | 3,0 |
| 12 | -5,048 | -5,360 | 13,4 | 380 | 25,56 | 12,25 | 3,1 |

**ЗАДАНИЕ № 5**

Определить значение коэффициента нестационарного теплообмена *kτ* (Вт/(м2⋅К)) и температуру стенки выработки *θс* при расчетном времени охлаждения горных пород *τ1* и *τ2.* Исходные данные приведены в табл. 9.

Таблица 9

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Наименование  показателя | № варианта | | | | | | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Расчетное время охлаждения горных пород:  *- τ1*, ч  *- τ2*, лет | 1  5 | 5  4 | 10  3 | 5  6 | 1  7 | 10  8 | 1  5 | 5  4 | 5  9 | 10  2 |
| Коэффициент теплоотдачи *α*, Вт/(м2⋅К) | 18,5 | 20,0 | 22,0 | 17,8 | 21,2 | 15,5 | 20,4 | 18,8 | 19,6 | 16,5 |
| Площадь поперечного сечения выработки *S*, м2 | 8,2 | 6,5 | 11,8 | 9,4 | 9,3 | 7,9 | 8,0 | 6,6 | 5,7 | 10,3 |
| Коэффициент теплопроводности пород  *λ*, Вт/(м⋅К) | 2,4 | | 1,6 | | 2,2 | | 1,8 | | 2,0 | |
| Коэффициент температуропроводности пород *а*⋅106 м2/с | 1,8 | | 1,2 | | 3,0 | | 2,4 | | 3,8 | |
| Температура пород в массиве *tn*, °С | 27 | 23 | 21 | 19 | 25 | 28 | 20 | 22 | 24 | 26 |
| Температура воздуха  *tв*, °С | 12 | 14 | 16 | 15 | 13 | 14 | 16 | 17 | 18 | 18 |

***Рекомендации к расчету***

Необходимо определить коэффициент теплообмена и температуру стенки выработки в с по трем различным методикам.

1. По «Единой методике прогнозирования температурных условий в шахтах» коэффициент теплообмена *k*τ равен:

где – критерий Био;

, где *b* – коэффициент, равный 0,375 для выработок, проветриваемых до одного года, или 0,5 для выработок, проветриваемых от одного до 10 лет;

*f*(*z*) - значение функции, определяемое по табл. 10 для величины , где – критерий Фурье, для каждого заданного значения τ;

– эквивалентный радиус выработки, м.

Таблица 10

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| z | *f(z)* | z | *f(z)* | z | *f(z)* | z | *f(z)* |
| 0 | 0 | 1,2 | 0,6214 | 5,5 | 0,8974 | 14 | 0,9597 |
| 0,1 | 0,1036 | 1,4 | 0,6614 | 6,0 | 0,9060 | 16 | 0,9647 |
| 0.2 | 0,1910 | 1,6 | 0,6975 | 6,5 | 0,9139 | 18 | 0,9686 |
| 0,3 | 0,2654 | 1,8 | 0,7217 | 7,0 | 0,9194 | 20 | 0,9718 |
| 0,4 | 0,3202 | 2,0 | 0,7434 | 7,5 | 0,9248 | 30 | 0,9812 |
| 0,5 | 0,3843 | 2,5 | 0,7928 | 8,0 | 0,9295 | 40 | 0,9859 |
| 0,6 | 0,4323 | 3,0 | 0,8207 | 8,5 | 0,9336 | 50 | 0,9887 |
| 0,7 | 0,4741 | 3,5 | 0,8454 | 9,0 | 0,9373 | 70 | 0,9919 |
| 0,8 | 0,5109 | 4,0 | 0,8634 | 9,5 | 0,9406 | 100 | 0,9944 |
| 0,9 | 0,5435 | 4,5 | 0,8777 | 10,0 | 0,9436 | 150 | 0,9962 |
| 1,0 | 0,5724 | 5,0 | 0,8872 | 12,0 | 0,9450 | 200 | 0,9971 |

Температура стенки выработки *θ*с (°С) при *τ* = *τ*1 и *τ* = *τ*2:

2. По А.Н. Щербаню и др.:

- для выработок, проветриваемых до одного года (до 31,5⋅106 с)

- для выработок, проветриваемых от одного до 10 лет (3,15⋅108 с)

Температура стенки выработки *θ*с (°С):

3. Сравнить полученные данные между собой и с полученными на основе критериальных графических зависимостей *Ки* = *f*1 (Fo*,* Bi)и *θ*с = *f*2 (Fo*,* Bi), где *Ки = kτ R*о / *λ* – критерий Кирпичева (безразмерный коэффициент нестационарного теплообмена), *θ´*с = (*θ*с – *t*в) / (*t*п – *t*в) – безразмерная температура стенки выработки.

**ЗАДАНИЕ № 6**

Определить значение коэффициента гармонического теплообмена *k*гт (Вт/(м2⋅К)) для заданного месяца года (1 - январь, 2 - февраль и т.д.) и исходных данных, приведенных в табл. 11. Максимальное отклонение сезонной температуры от среднегодовой *ω*г = 42 °С.

Таблица 11

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Наименование  показателя | № варианта | | | | | | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Месяц года | 2 | 12 | 5 | 10 | 11 | 8 | 7 | 1 | 6 | 3 |
| Среднегодовая температура воздуха *tcp*, °С | -2 | -4 | +5 | -6 | +2 | -5 | +4 | -3 | +6 | -1 |
| Температура горной породы в массиве *θп*, °С | 16 | 27 | 18 | 21 | 20 | 17 | 24 | 15 | 28 | 30 |
| Коэффициент теплопроводности горной породы λ, Вт/(м⋅К) | 3,2 | 4,5 | 3,3 | 4,4 | 3,2 | 4,3 | 3,1 | 4,2 | 3,0 | 3,8 |
| Коэффициент температуропроводности горной породы *а*⋅10-6, м2/с | 0,83 | 0,98 | 1,02 | 1,06 | 1,08 | 1,10 | 1,12 | 0,80 | 0,85 | 0,92 |
| Коэффициент теплоотдачи горной выработки  *α0*, Вт/(м2⋅К) | 12,4 | 8,4 | 14,6 | 7,5 | 10,7 | 6,9 | 10,3 | 13,4 | 12,0 | 9,8 |

***Рекомендации к расчету:***

Величина *k*гт определяется по выражению

где *η* – коэффициент, учитывающий уменьшение температурной волны на поверхности стенки выработки;

*z* – количество часов в году *(z* = 8760 ч).

Значения функций и для *z* = 8760 ч приведены в табл. 12 и 13.

Таблица 12

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| *αо,* Вт/(м2⋅К) | Вт/(м2⋅К), при Дж/(м2⋅с0,5⋅К) | | | | | |
| 700 | 1400 | 2100 | 2800 | 3500 | 4200 |
| 2,326 | 0,477 | 0,826 | 1,047 | 1,256 | 1,489 | 1,500 |
| 4,652 | 0,500 | 0,965 | 1,314 | 1,663 | 1,930 | 2,163 |
| 6,978 | 0,512- | 1,012 | 1,396 | 1,849 | 2,186 | 2,489 |
| 11,630 | 0,535 | 1,058 | 1,477 | 2,000 | 2,419 | 2,811 |
| 18,608 | 0,547 | 1,105 | 1,535 | 2,093 | 2,570 | 3,012 |
| 34,890 | 0,547 | 1,105 | 1,570 | 2,163 | 2,675 | 3,059 |

Таблица 13

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Месяц | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|  | 1,0 | 0,87 | 0,5 | 0 | 0,5 | 0,87 | -1,0 | 0,87 | -0,5 | 0 | 0,5 | 0,8 |

**ЗАДАНИЕ № 7**

Определить коэффициент теплоотдачи горной выработки конвекцией α (Вт/(м2⋅К)) при исходных данных, приведенных в табл. 14, для следующих вариантов:

A) выработка сухая, стенки гладкие, крепь круглая деревянная (диаметр стоек крепи *d*, расстояние между осями стоек по длине выработки *l*);

Б) выработка влажная, стенки гладкие, без крепи;

B) выработка сухая, крепь – набрызгбетон (толщина крепи *δ*, удельная теплопроводность набрызгбетона *λ*).

Плотность воздуха *ρ* = 1,29 кг/м3, его температура *Т*в = 20 °С.

Таблица 14

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Наименование  показателя | №варианта | | | | | | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Площадь поперечного сечения выработки *S*, м2 | 4,5 | 5,6 | 8.6 | 6,8 | 7,2 | 7,6 | 6,0 | 8,2 | 5,2 | 9,6 |
| Средний периметр сечения выработки в свету  *П*, м | 8,5 | 10,0 | 12,0 | 10,8 | 11,2 | 11,5 | 10,4 | 11,8 | 9,6 | 12,5 |
| Расход воздуха *Q*, м3/с | 11,2 | 15,5 | 22,8 | 18,4 | 19,3 | 20,9 | 18,0 | 20,6 | 12,7 | 24,3 |
| *d*, м | 0,20 | | 0,25 | | 0,20 | | 0,20 | | 0,25 | |
| *l*, м | 1,6 | 1,5 | 2,0 | 1,4 | 1,2 | 1,5 | 1,3 | 2,2 | 1,5 | 2,0 |
| *δ*, м | 0,05 | | 0,20 | | 0,10 | | 0,15 | | 0,10 | |
| *λ*, Вт/(м⋅К) | 1,6 | 2,5 | 1,3 | 2,2 | 1,2 | 1,8 | 1,4 | 2,0 | 2,2 | 2,6 |
| Барометрическое давление *В*, Па | 96000 | | 99000 | | 102000 | | 98000 | | 100000 | |

***Рекомендации к расчету***

Для сухих выработок типа А расчетное значение коэффициента теплоотдачи конвекцией а рассчитывается по выражению

где *ε* - коэффициент, учитывающий влияние шероховатости стенок выработки на параметры теплообмена (для выработок без крепи *ε* = 1, для выработок с крепью определяется по табл. 15, где – эквивалентный диаметр горной выработки, м);

– массовый расход воздуха, кг/с.

Таблица 15

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| *d/D*экв | Коэффициент *ε* при значении *l / d* | | |
| 3,5 | 7 | 14 |
| 0,06 | 2,15 | 2,00 | 1,85 |
| 0,09 | 2,50 | 2,30 | 2,15 |
| 0,12 | 2,80 | 2,60 | 2,40 |

Для влажных выработок типа Б определяется приведенный коэффициент теплоотдачи *α*пр с учетом теплового коэффициента массоотдачи *β* (Вт/(м2⋅Па)). Для ориентировочных расчетов:

где – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м2⋅К).

Коэффициент массоотдачи *β* рассчитывается по формуле

где *В* – барометрическое давление воздуха, Па;

*r* – удельная теплота испарения влаги, Дж/кг (при *Т*в = 20 °С *r* = 2,445⋅106 Дж/кг).

Для выработок, закрепленных всплошную бетоном (типа В), кирпичом или деревом, определяется коэффициент теплоотдачи *α´*, учитывающий процессы теплообмена на границах «горная порода - крепь» и «крепь - шахтный воздух», по выражению

где – коэффициент теплоотдачи при *ε* = 1, Вт/(м2⋅К).

**ЗАДАНИЕ № 8**

Определить основные технологические показатели процесса искусственного замораживания горных пород рассольным способом (нагрузку на ледопородное ограждение, толщину его стенки, схему расположения замораживающих скважин) перед проходкой вертикального ствола диаметром вчерне *D* (м) при исходных данных, приведенных в табл. 16.

Тип пород – обводненные пески средней крупности. Диаметр замораживающей колонки *dк* = 0,15 м; температура рассола *Тр* = -26 °С; температура стенки замораживающей колонки *Тст* = -18 °С; конечная температура замороженной горной породы *Тп* = -12 °С. Коэффициент запаса прочности *k* = 2,5.

Таблица 16

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Наименование  показателя | № варианта | | | | | | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| *D*св, м | 5,5 | 9,0 | 6,0 | 8,5 | 6,5 | 8,0 | 7,0 | 5,5 | 7,5 | 6,0 |
| Глубина замораживания *Н1*, м | 100 | 90 | 80 | 70 | 60 | 50 | 40 | 65 | 75 | 45 |
| Мощность водоносных пород *H2*, м | 20 | 22 | 18 | 24 | 16 | 25 | 15 | 23 | 17 | 21 |
| Плотность горной породы γ, кг/м3 | 1400 | 1550 | 1350 | 1300 | 1450 | 1500 | 1320 | 1480 | 1420 | 1360 |
| Пористость пород *n*, % | 3,0 | 3,2 | 4,5 | 4,4 | 3,5 | 3,8 | 4,0 | 3,6 | 4,2 | 3,4 |
| Угол внутреннего трения талых пород *ϕт*, град. | 15 | 30 | 18 | 27 | 20 | 25 | 23 | 17 | 26 | 19 |
| Прочность замороженных пород на сжатие *σ*сж, МПа | 11,0 | 11,5 | 12,0 | 12,5 | 10,8 | 11,4 | 12,3 | 11,2 | 12,4 | 10,6 |
| Расстояние между замораживающими скважинами *l*, м | 1,2 | 1,6 | 1,3 | 1,5 | 1,4 | 1,2 | 1,6 | 1,3 | 1,5 | 1,4 |
| Плотность льда *γл*, кг/м3 | 920 | 880 | 850 | 910 | 900 | 940 | 870 | 890 | 930 | 860 |
| Удельная теплоемкость породного скелета *Cn*, Дж/(м3⋅К) | 750 | 920 | 780 | 900 | 800 | 880 | 820 | 860 | 840 | 720 |
| Удельный земной теплоприток *U*, кДж/м2 | 16 | 17 | 25 | 24 | 18 | 19 | 23 | 22 | 20 | 21 |
| Удельная теплопроводность замороженной породы *λ*, Вт/(м⋅К) | 3,50 | 2,80 | 3,35 | 2,95 | 3,20 | 3,10 | 2,90 | 3,05 | 2,75 | 2,85 |
| Удельная теплота ледообразования *r*, кДж/кг | 314 | 296 | 284 | 276 | 256 | 224 | 244 | 308 | 265 | 237 |
| Начальная температура горной породы *Т0*, °С | 8,0 | 7,0 | 6,5 | 6,0 | 5,5 | 6,0 | 8,0 | 7,5 | 7,0 | 6,5 |

***Рекомендации к расчету***

1. Определяем глубину замораживающих скважин (*L*скв, м) по формуле

где hi – мощность i-го отдельного слоя грунта, м;

n – количество отдельных слоев грунта;

(6…10) – величина заглубления скважин в водоупорный слой, м.

2. При глубине (Н, м) до 500 м допускаемое отклонение замораживающих скважин (*а*, м) от вертикали рассчитывают по упрощенной формуле

3. Определяем максимальное давление на внешнюю поверхность цилиндра ЛПО (Pmax, МПа), передаваемое от окружающих грунтов и взвешивающего давления воды по формуле

где *P*г – горизонтальное давление грунтов, МПа (100 т/м2 = 1 МПа);

*P*гст – величина полного гидростатического давления воды, МПа.

Горизонтальное давление грунтов (*P*г, т/м2) определяем по формуле профессора П.М. Цимбаревича

где *ɣ*i – плотность (объёмный вес) грунта i-го слоя, кг/м3;

hi – мощность i-го отдельного слоя грунта, м;

n – количество отдельных слоев грунта;

Аn – коэффициент бокового распора отдельных слоев грунта n.

где ϕ - угол внутреннего трения пород, град.

Значения коэффициента бокового распора (*А*п) для отдельных видов грунта приведены в табл. 17.

Таблица 17

Коэффициент бокового распора для различного грунта

|  |  |
| --- | --- |
| Виды грунта | Коэффициент бокового распора *A*п |
| Мелкозернистые пески и плывуны, а также разжиженные грунты | 0,757 |
| Галька, щебень, гравий, песок | 0,526 |
| Наносы, слежавшиеся грунты, пластичные глины | 0,387 |
| Гипс, бурый и неплотный каменный уголь, глинистые сланцы | 0,164 |
| Плотные сланцы, средней плотности известняки и песчаники | 0,017 |
| Кварцевые породы, габбро | 0,004 |
| Плотные кварциты, кремний, базальт | 0,0012 |

Величина полного гидростатического давления (*P*гст, т/м2) определяется по формуле

где *ɣ*в – объёмный вес воды, *ɣ*в = 1 т/м3;

hв – высота водяного столба, м.

4. Необходимая толщина (*Е*, м) цилиндрического ЛПО ствола шахты круглого сечения глубиной до 100 м определяется по формуле Ляме-Годолина

где *R*вч – радиус ствола в вчерне, м

*R*св, *D*св – соответственно радиус и диаметр ствола в свету, м;

*d*кр – толщина крепи, м;

*σ*доп – допускаемое напряжение на сжатие для замороженного грунта, МПа

*σ*сж – предел прочности замороженного грунта на сжатие, МПа (см. табл. 18);

*P*max – максимальное давление на внешнюю поверхность цилиндра, передаваемое от окружающих грунтов и взвешивающего давления воды, МПа.

Таблица 18

Пределы прочности при сжатии замороженного грунта и льда

в зависимости от температуры

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Грунты, насыщенные водой | Пределы прочности при сжатии (кгс/см2)\* при температуре, °С | | | | |
| -1…-5 | -5…-10 | -10…-15 | -15…-20 | -20…-25 |
| Чистый лед |  |  | 18 |  |  |
| Песок | 25-85 | 85-127 | 127-144 | 144-152 | 152-180 |
| Супесь | 20-65 | 65-88 | 88-105 | 105-122 | 122-140 |
| Глинистый | 15-45 | 45-60 | 60-75 | 75-95 | 95-100 |
| Пылеватоилистый | 10-15 | 15-35 | 35-45 | 45-65 | 65-70 |
| Лед | - | - | 13-18 | 18-20 | 20-30 |

\* 1 кгс/см2 = 0,0980665 МПа

Толщина цилиндрического ЛПО шахты (*E*, м)глубиной свыше 100 м может быть определена по формуле Домке

5. Диаметр окружности (*D*зам, м), на которой располагают центры замораживающих скважин с учетом среднего отклонения скважин, определяется по формуле

где *D*вч – диаметр ствола вчерне, м

6. Определяем необходимое количество скважин (*N*общ) по формуле

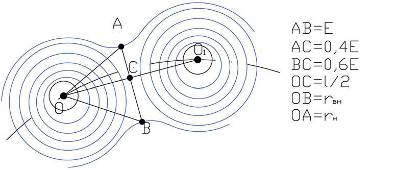
где Nскв – количество основных замораживающих скважин, шт.

*l* – расстояние между двумя соседними замораживающими скважинами (зависит от многих факторов и принимается по опыту замораживания, но не менее 1,2 м для стволов шахт)

*N*терм – количество термометрических скважин, шт. (не менее двух для измерения температур грунта);

*N*гидр – количество гидрогеологических скважин, шт. (не менее 10% общего количества основных замораживающих скважин для наблюдения за колебаниями уровня грунтовых вод).

7. Фактическая толщина ЛПО будет больше E за счёт намерзания породы не только в замковых, но и в главных плоскостях ограждения. Она определяется внутренним (*r*вн, м) и наружным (*r*н, м) радиусами промерзания пород вокруг каждой замораживающей колонки.



.

8. Определяем фактические внутренний (*D*вн, м) и наружный (*D*н, м) диаметры ЛПО вокруг ствола по формулам

**ЗАДАНИЕ № 9**

Определить объемную *Vо* (м3/с) и линейную *V*(м/с) скорость хрупкого термического разрушения при бурении скважины с плоским и полусферическим забоем в железистых кварцитах (содержание кварца и магнетита по 50%) при исходных данных, приведенных в табл.19. Физико-механические свойства кварца, магнетита и железистого кварцита (коэффициент линейного теплового расширения *β* (1/К), модуль упругости Юнга *Е* (Па), коэффициент Пуассона *μ*, модуль всестороннего сжатия *К* (Па), модуль сдвига *G* (Па), пределы прочности на сжатие *σсж*и растяжение *σр* (Па)) приведены в табл.20.

Таблица 19

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Наименование  показателя | Номер варианта | | | | | | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 0 |
| Диаметр скважины  *D,м* | 0,20 | 0,32 | 0,20 | 0,32 | 0,25 | 0,25 | 0,20 | 0,32 | 0,25 | 0,20 |
| Температура теплоносителя в центре забоя *Т0*, 0С | 1250 | 1280 | 1300 | 1260 | 1320 | 1220 | 1340 | 1200 | 1350 | 1180 |
| Коэффициент теплоотдачи α,  Вт/ (м2∙К) | 3200 | 3320 | 2800 | 3340 | 3000 | 3180 | 3400 | 3150 | 2750 | 3070 |
| Удельная теплопроводность породы *λ*, Вт/ (м∙К) | 3,26 | 3,54 | 2,53 | 2,85 | 3,88 | 4,07 | 3,36 | 2,65 | 3,43 | 3,62 |
| Коэффициент температуропроводности горной породы *а*∙10-6, м2/с | 2,80 | 3,24 | 3,05 | 2,76 | 3,33 | 2,97 | 3,19 | 3,42 | 3,55 | 2,56 |
| Параметр распределения температуры на забое скважины δ, м | 0,065 | 0,105 | 0,065 | 0,105 | 0,080 | 0,080 | 0,065 | 0,105 | 0,080 | 0,065 |

Таблица 20

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Минерал | *β∙105,* 1/К | *Е∙10-10,* Па | *μ* | *К∙10-10,* Па | *G∙10-10,* Па | *σсж ∙10-10,* Па | *σh ∙10-10,* Па |
| Кварц | 1,30 | 9,51 | 0,07 | 3,70 | 4,44 | 4000 | 210 |
| Магнетит | 1,60 | 23,19 | 0,26 | 16,10 | 9,20 | 520 | 140 |
| Железистый кварцит:  -вариант 1  2  3  4  5  6  7  8  9  0 | 1,50  1,52  1,54  1,48  1,46  1,49  1,51  1,53  1,47  1,55 | 15,10  15,14  15,18  15,22  15,08  15,04  15,00  15,05  15,15  15,20 | 0,20  0,18  0,16  0,15  0,17  0,19  0,21  0,20  0,18  0,17 | 7,90  7,88  7,86  7,84  7,80  7,92  7,91  7,89  7,87  7,85 | 6,35  6,40  6,45  6,38  6,36  6,41  6,43  6,37  6,39  6,44 | 2050  2020  2000  1980  1960  1990  2010  2040  1970  2030 | 175  180  185  190  170  172  182  188  178  186 |

***Рекомендации к расчету***

Объемная скорость хрупкого термического разрушения *Vо* (м3/с) определяется по следующим выражениям:

- при плоском забое скважины

,

- при полусферическом забое скважины

,

где – температура поверхности железистого кварцита в момент разрушения по механизму потери устойчивости, 0С

Температура определяется по выражению

Линейная скорость *V*(м/с) равна

**ЗАДАНИЕ № 10**

Расчет глубины промерзания пород

***Рекомендации к расчету рассмотрены на примере:***

Определить глубину промерзания пород при отсутствии снежного покрова и при наличии снежного покрова на последнее число каждого месяца холодного периода. При отсутствии снежного покрова вычисления выполнить по упрощённой формуле и по уточнённой формуле.

Результаты сравнить по абсолютной и относительной величине (в % к глубине промерзания, вычисленной по уточнённой формуле).

Исходные данные: льдистость мерзлых горных пород *G* = 200 кг / м3, объёмная теплоёмкость мёрзлых пород *сом* = 600 Вт.ч / (м3.оС), коэффициент теплопроводности мёрзлых пород *λм* = 2,36 Вт / (м.оС), высота снежного покрова *hсн* = 0,5 м, коэффициент теплопроводности снега *λсн*= 0,27 Вт / (м3.оС); температура наружного воздуха в холодные месяцы года составляет: сентябрь – 10, октябрь – 20, ноябрь – 25, декабрь – 30, январь – 35, февраль – 30, март – 15, апрель – 10 оС ниже нуля.

Решение

1. Определяем среднюю температуру и продолжительность промерзания на конец каждого месяца холодного периода: на конец сентября – *tп* = – 10 оС, *τ* = 30 . 24 = 720 ч; на конец октября – *tп* = (10 . 30 + 20 . 31) / (30 + 31) = – 15,08 оС, *τ* = (30 + 31) . 24 = 1464 ч; на конец ноября – *tп* = (10 . 30 + 20 . 31 + 25 . 30) / (30 + 31 + 30) = – 18,35 оС, *τ* = (30 + 31 + 30) . 24 = 2184 ч. Аналогично имеем – на конец декабря *tп* = – 21,24 оС, *τ* = 2904 ч, на конец января *tп* = – 24,23 оС, *τ* = 3648 ч, на конец февраля *tп* = – 25,14 оС, *τ* = 4320 ч, на конец марта *tп* = – 23,65 оС, *τ* = 5064 ч, на конец апреля *tп* = – 21,95 оС, *τ* = 5784 ч.

2. По упрощённой формуле определяем глубину промерзания пород при отсутствии снежного покрова на конец сентября



где *λм*–коэффициент теплопроводности мёрзлой горной породы, Вт / (м . оС);

*tп*– температура поверхности пород, оС;

*τ* – продолжительность промерзания горной породы, ч;

*Qф* – расход тепла на замерзание воды, содержащейся в 1 м3 породы, определяется по формуле:



где *L* – скрытая теплота кристаллизации воды, *L* = 93 Вт.ч / кг;

*G* – льдистость горной породы, кг/м3.

 = 1,33 м.

Аналогично получим глубину промерзания: на конец октября – 2,34 м; на конец ноября – 3,15 м; на конец декабря – 3,90 м; на конец января – 4,68 м; на конец февраля – 5,18 м; на конец марта – 5,44 м; на

конец апреля – 5,60 м.

3. Определяем глубину промерзания по уточнённой формуле на конец сентября



где с*ом* – объёмная теплоёмкость мёрзлых пород, Вт.ч/(м . оС).

 = 1,24 м.

Глубина промерзания пород, вычисленная по уточненной формуле на 0,09 м или на 7,3 % меньше, чем по упрощенной формуле. Результаты расчётов для других месяцев получены аналогично и представлены в табл. 21.

Таблица 21

**Результаты расчетов глубины промерзания горных пород**

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Дата | Глубина промерзания, м | | Разность | | Глубина промерзания под снегом, м |
| по упрощенной формуле | по уточненной  формуле | абсолют.,  м | относит.,  % |
| 30 сентября | 1,33 | 1,24 | 0,09 | 7,3 | 0,18 |
| 31 октября | 2,34 | 2,09 | 0,24 | 11,7 | 0,19 |
| 30 ноября | 3,15 | 2,76 | 0,38 | 13,9 | 0,82 |
| 31 декабря | 3,90 | 3,37 | 0,53 | 15,7 | 1,17 |
| 31 января | 4,68 | 3,96 | 0,71 | 18,0 | 1,56 |
| 28 февраля | 5,18 | 4,37 | 0,81 | 18,5 | 1,84 |
| 31 марта | 5,44 | 4,63 | 0,81 | 17,5 | 2,03 |
| 30 апреля | 5,60 | 4,82 | 0,78 | 16,2 | 2,17 |

4. Определяем глубину промерзания пород при наличии снежного покрова, т.е. в естественных условиях, для чего предварительно определяем условную мощность теплоизоляции *hт*. При этом термическое сопротивление снежного покрова составит:

*hсн* / *λсн* = 0,5 / 0,27 = 1,85 м2. оС/Вт.

Условная мощность слоя теплоизоляции снежного покрова определяется по формуле:

*hт* =*λм\** (*hсн* / *λсн)*

Тогда *hт* = 2,36. 1,85 = 4,26 м.

Глубина промерзания пород в конце сентября с учетом снежного покрова определяется по формуле



где *hт* – условная мощность слоя теплоизоляции снежного покрова, м:

 = 0,18 м.

Аналогично определяется глубина промерзания в конце каждого месяца. Результаты расчётов приведены в табл. 21.

При этом следует иметь в виду, что из-за использования средних значений коэффициента теплопроводности снега и максимальной высоты снежного покрова, которая наблюдается только к концу холодного сезона, вычисленные значения глубины промерзания могут отличаться от наблюдаемых в реальных природно- климатических условиях.

Для уточнения расчётных значений необходимо иметь данные о высоте снежного покрова в течение холодного периода (по данным ближайшей метеостанции).

Коэффициент теплопроводности снега принимается в зависимости от слёживаемости снега по справочным данным или по результатам измерений.

**Задание для самостоятельной работы**

1. Определить глубину промерзания в естественных условиях. Для снега принять коэффициент теплопроводности *λсн*= 0,27 Вт/(м.оС).

2. Определить глубину промерзания при полном отсутствии снежного покрова.

3. Варианты исходных данных принять согласно табл. 22.

4. Льдистость, объемную теплоемкость и коэффициент теплопроводности принять по исходным данным примера.

5. Выполнить анализ полученных результатов.

Таблица 22

**Исходные данные к расчёту глубины промерзания**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Вариант | Высота снежного покрова, м | Температура холодного периода, оС ниже нуля | | | | | | | |
| сент. | окт. | нояб. | декаб. | янв. | фев. | март | апр. |
| 1. пр. Дамбуки | 0,90 | - | 3,3 | 18,8 | 28,9 | 31,1 | 24,9 | 15,1 | 1,9 |
| 2. пр. Уркима | 0,80 | - | 5,1 | 21,0 | 31,4 | 32,8 | 26,4 | 15,7 | 3,3 |
| 3. пр. Ципикан | 0,40 | - | 5,0 | 19,6 | 28,3 | 30,3 | 25,7 | 16,3 | 3,7 |
| 4. р. Бодайбо | 0,60 | - | 2,6 | 19,0 | 28,5 | 31,8 | 26,0 | 15,4 | 3,0 |
| 5. пр. Дальняя Тайга | 0,50 | - | 3,4 | 18,1 | 25,9 | 26,2 | 23,5 | 14,7 | 3,5 |
| 6. Енисейск, Красн.край | 0,90 | - | 0,4 | 12,5 | 20,9 | 22,0 | 19,0 | 10,6 | 0,9 |
| 7. Северо-  Енисейск | 0,85 | - | 4,2 | 17,6 | 25,6 | 26,8 | 23,4 | 15,2 | 5,0 |
| 8. Сусуман,  Магадан.обл. | 0,45 | 3,0 | 15,1 | 30,4 | 38,0 | 39,8 | 35,6 | 28,1 | 14,0 |
| 9. пр. Софийск | 0,60 | - | 5,1 | 20,6 | 30,7 | 33,3 | 26,4 | 17,1 | 5,2 |
| 10. Усть-Кара | 0,25 | - | 1,1 | 17,3 | 29,0 | 31,4 | 26,2 | 14,6 | 0,0 |
| 11. Нер.Завод  пр. Ср.Борзя | 0,20 | - | 0,7 | 15,0 | 25,8 | 28,9 | 23,5 | 13,1 | 0,0 |
| 12. Усть-Нера | 0,40 | 5,5 | 14,5 | 34,4 | 46,4 | 48,9 | 42,8 | 30,6 | 12,2 |

**ЗАДАНИЕ № 11**

Расчёт солнечно – радиационного оттаивания мёрзлых горных пород

***Рекомендации к расчету рассмотрены на примере:***

Выполнить расчёт солнечно – радиационного оттаивания мёрзлых горных пород для следующих условий (табл. 23):

Таблица 23

**Метеопараметры района разработки месторождения (р. Бодайбо)**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Наименование | Обозначение | Ед. изм. | Величина |
| Солнечная радиация | *Q* | Вт/м2 | 170 |
| Средняя температура воздуха за теплый  период года | *tв* | °С | +10,5 |
| Скорость ветра | *V* | м/с | 1,5 |
| Упругость водяного пара | *е* | н/м2 | 1050 |
| Продолжительность теплого периода | *τ* | сутки | 148 |
| Температура мёрзлых пород | *tм* | °С | - 2,1 |

Тепловые свойства пород: коэффициенты теплопроводности соответственно талых и мёрзлых пород *λт*=1,04 Вт / (м⋅°С), *λм*= 1,3 Вт / (м⋅°С); льдистость *G* = 248 кг/м3; объёмная теплоёмкость мёрзлых пород *сом* = 519 Вт.ч/ (м3⋅°С).

Характеристика теплопрозрачного покрытия: высота установки *δв* = 0,05м, толщина пленки *δп* = 0,06⋅10-3 м; коэффициенты отражения *Аг* = 0,08, *Ап* = 0,17, *А1* = 0,1, *А* = 0,12; коэффициенты поглощения *α* = 0,028, *α1* = 0,43; коэффициент пропускания *ρ1* = 0,813; коэффициент теплопроводности *λп* = 0,2 Вт / (м ⋅ °С).

Учитывая суровые условия района р. Бодайбо принять в мае месяце 26 дней оттайки или 624 час.

Решение:

1. Определяем глубину оттаивания при естественном способе по формуле



где *τ* – продолжительность оттаивания (продолжительность тёплого периода, когда температура воздуха выше 0 оС), ч;

*Qф* – удельная теплота фазового перехода (*Qф* = 93 . *G* Вт . ч / м3, здесь *G* – льдистость, кг / м3);

*λт*,*λм*– коэффициенты теплопроводности талых и мёрзлых пород, Вт/(м . оС);

*aм* – коэффициент температуропроводности мёрзлых пород, м2/ч, *aм* = *λ м* / *Сом*, здесь *Сом* – объёмная теплоёмкость мёрзлых пород, Вт . ч / (м . оС);

*tм* – среднегодовая температура мёрзлых пород, оС;

*M*, Вт / м2; *N*, Вт / (м2⋅ °С) – средние за тёплый период значения параметров теплообмена, рассчитываются раздельно для «естественного» способа и для способа оттаивания с применением теплопрозрачных покрытий в зависимости от значений метеопараметров по формулам :

Предварительно рассчитываем коэффициенты *Ме* и *Ne* по формулам:





где *К1*...*К10* – постоянные коэффициенты, характеризующие вид поверхности, для «естественного» способа оттаивания принимают: *К1*= 4060, *К2* = 0,057, *К3* = 1980, *К4* = 0,038, *К5* = 24,6, *К6* = 3,72, *К7* = 131 . 10 –6 , *К8* = 15,4, *К9* = 7,32, *К10* = 0,052;

*А* – альбедо (коэффициент отражения коротковолновой солнечной радиации);

*Q* – среднее за тёплый период значение потока солнечной радиации, Вт/м2;

*V* – среднее значение скорости ветра, м / с;

*tв* – средняя за тёплый период температура воздуха, оС;

*e* – упругость водяного пара, н / м2;

Ме = (1 – 0,12) ⋅ 170 + 4060 + 0,057 ⋅ 1050 + (1980 + 0,038 ⋅ 1050) ⋅ 1,5 +

+ [ 24,6 + (3,72 – 131⋅10-6 × 1050) ⋅ 1,5] ⋅ 10,5 = 8152,674 Вт/м2;

Ne = 15,4 + 7,32 ⋅ 1,5 + 0,052⋅ 10,5 = 26,93 Вт / (м2 ⋅ °С).

Удельная теплота кристаллизации воды – плавления льда определяется как произведение скрытой теплоты кристаллизации воды и льдистости пород:

Qф = 93 . 248 = 23064 Вт . ч / м3;

Тогда глубина оттаивания составит на конец мая:



на конец июня:



на конец июля:



на конец августа:



на конец сентября:



2. Определяем глубину оттаивания при использовании теплопрозрачного покрытия по формуле, изложенной в пункте 1.

Вначале рассчитываем параметры *Mп* и *Nп* по формулам:





*α1*, *α2*, *α3* , *ϕ, То* определяют по формулам :

где α1 = 6,164 + 3,605 ⋅ *V*;

α2 = 4,77 ⋅ [1 + (0,55 – 1370 ⋅ *δп*) ⋅ *V*];

α3 = 0,37 ⋅ [1 + (1,72 – 3440 ⋅ *δп*) ⋅ *V*];

*ϕ* = *α1*⋅ *λп*/ (*α2*+ 2,27 ⋅ *α3*/ *δв0,25*) – *α1*⋅ *δп*+ *λп*,

где *δв*– высота установки покрытия (толщина воздушного промежутка), м;

*δп*– толщина покрытия, м;

*ρ1*, *α* – интегральные коэффициенты пропускания и поглощения покрытия с учётом многократного отражения лучистых потоков между поверхностями пород и покрытия, определяются по формулам:





где *Аг* – альбедо открытой увлажнённой поверхности пород;

*Ап* – альбедо покрытия;

*k* – коэффициент ослабления (для плёнки *k* = 2,6 - 3,7);

*Δρ1*– относительное ослабление лучистого коротковолнового потока слоем конденсата (*Δρ1* = 0,03 - 0,04);

*α1*– коэффициент поглощения энергии покрытием в длинноволновом диапазоне;

*А1* – коэффициент отражения длинноволнового излучения покрытием;

*λп* – коэффициент теплопроводности покрытия, Вт / (моС);

*Lн* – средняя интенсивность энергозатрат на испарение осадков, (по экспериментальным наблюдениям *Lн*= 12,9 Вт / м );

*То* – температура открытой поверхности, оК, определяется по формуле:



При оттайке под пленкой необходимо (*λт*) умножать на коэффициент 1,2 (1,04\*1,2=1,248).

При этом срок оттаивания мерзлых горных пород(*τ* ) нужно увеличить на 10–15 сут.

*То* = (273 ⋅1,04+2,47 ⋅ 8152.7) / (1,04+ 2,47 ⋅ 26,93) = 302 °K;

*α1* = 6,164 + 3,605 ⋅ 1.5 = 11,57;

*α2* = 4.77 ⋅ [1 + (0.55 – 1370 ⋅ 0,06 ⋅10-3) ⋅ 1,7] = 8,56;

*α3* = 0,37 ⋅ [1 + (1,72 – 3440 ⋅ 0,06 ⋅10-3 ) ⋅ 1,7] = 1,3;

*ϕ* = 11,57⋅ 0,2/ (8,56+ 2,27 ⋅ 1,3/ 0,050,25) – 11,57⋅ 0,06 ⋅ 10-3+ 0,2 = 0,356.

Температура воздуха принимается по шкале Кельвина:

*Тв* = 10,5 + 273 = 283,5 °K.

*Мп*= 0,2/ 0,356 ⋅ {11,57 ⋅ 283,5 + 170 ⋅ [1 – 0,813 ⋅ (1-0,08) – 0,17–

– 0,08⋅ 0,8132 ⋅ (1 – 2 ⋅ 0,17) – 0,028] –12,9}+

+ (1 + 0,06 ⋅ 10-3 ⋅ 11,57 / 0,365) ⋅ {170 ⋅ [0,028 / 2 +

+ 0,813 ⋅ (1 – 0,08)] + (1 – 0,1 – 0,43 / 2) ⋅ (4,9 ⋅ 302 – 50 –

– 0,1 ⋅ 170)} = 3136,8 Вт/м2;

Nп = (8,56 + 2,27 ⋅ 1,3/ 0,050,25) ⋅ [1+ (11,57⋅ 0,06 ⋅ 10-3–

– 0,2) / 0,356)] + 4,9 ⋅ (1 – 0,1 - 0,43/ 2) .

. (1 + 0,06⋅ 10-3⋅ 11,57/ 0,356) = 9,87 Вт / (м ⋅ °С)

Тогда глубина оттаивания составит на конец апреля (с 20 по 30):



на конец мая:



на конец июня:



на конец июля:



на конец августа:



на конец сентября:



Фактическая глубина оттаивания мерзлых пород в апреле, мае, сентябре месяце будет меньше, а в июне, июле, августе больше, чем расчетная, так как в расчетах принята средняя температура воздуха за теплый период года.

**Задание для самостоятельной работы**

Определить глубину оттаивания мёрзлых пород при естественном способе и при использовании теплопрозрачных пленок. Тепловые свойства мёрзлых пород принять согласно соответствующему варианту задания №10 (льдистость, объёмная теплоёмкость, коэффициент теплопроводности).

Коэффициент теплопроводности талых пород назначать через соответствующий коэффициент теплопроводности мёрзлых пород из соотношения (*λт* = 0,8 . *λм*).

Характеристики теплопрозрачного покрытия принять согласно вышеизложенного примера. Метеопараметры приведены в табл. 24.

Таблица 2*4*

**Исходные данные к расчету глубины оттаивания**

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Россыпь, прииск | Метеопараметры района  разработки месторождения | | | | | Температура мерзлых пород (*tм*), оС |
| *Q*,  Вт/м2 | *tв*,  °С | *V*,  м/с | *е*,  н/м2 | *τ*,  сутки |
| 1. Прииск Дамбуки | 190 | 11,5 | 3,1 | 1100 | 153 | -2,1 |
| 2. Прииск Уркима | 196 | 11,0 | 3,0 | 1150 | 150 | -2,5 |
| 3. Ципикан | 175 | 10,1 | 1,7 | 1120 | 149 | -2,8 |
| 4. Прииск Дальняя Тайга | 175 | 10,2 | 1,6 | 1060 | 147 | -3,2 |
| 5. Енисейск,Красноярский край | 189 | 9,9 | 1,4 | 1030 | 151 | -1,5 |
| 6. Северо-Енисейск | 185 | 8,6 | 1,3 | 1020 | 150 | -2,0 |
| 7.Сусуман, Магаданская область | 198 | 8,5 | 2,7 | 1210 | 146 | -7,0 |
| 8. Прииск Софийск | 207 | 9,5 | 2,0 | 990 | 148 | -4,0 |
| 9. Усть-Карск | 210 | 13,7 | 2,7 | 1110 | 149 | -2,6 |
| 10. Прииск Средняя Борзя | 214 | 12,4 | 3,0 | 1205 | 153 | -1,1 |
| 11. Усть-Нера, Якутия | 208 | 10,4 | 1,9 | 1215 | 145 | -10,8 |

**ЗАДАНИЕ № 12**

Расчет фильтрационно-дренажного оттаивания (ФДО) с канавным питанием

***Рекомендации к расчету рассмотрены на примере:***

Определить режим водоснабжения ФДО участка россыпного месторождения, если известно, что дебит источника водоснабжения *ωи*= 200 м3 / ч, коэффициент фильтрации горных пород *Кф* = 3,8 м / ч, длина участка работ (длина фронта фильтрации) *l*  = 100 м, глубина воды в дренажной канаве *hв.д* = 0,35 м, в питающей канаве *hв.п* = 0,2 м,, глубина оттайки *hот*= 4,8 м, глубина питающей и оросительных канав соответственно *hпк* = *hок*= 0,5 м, поперечный уклон россыпи *i* = 0,01, температура воды *tв* = + 12,1 оС, температура мерзлых пород *tм* = – 3,5 оС, при льдистости *G* = 120 кг/м3, конечная температура пород *tт* = +3,0 оС.

Решение

1. По формуле определяем минимальную глубину дренажной канавы



где *hд* – минимальная глубина дренажной канавы, м;

*hот* – необходимая глубина оттаивания мерзлых пород, м.

*hд*= 2/3 . 4,8 = 3,2 м.

1. По табл. 25 определяем длину пути фильтрации (расстояние между питающей и дренажной канавами). Так как по условию *Кф*= 3,8 м/ч = 91,2 м/сут, то *lф* = 45 м.

Таблица 25

**Изменение длины фильтрационного пути при ФДО**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Коэффициент фильтрации, м/сут | Длина пути фильтрации, м | |
| допустимая | Рекомендуемая |
| 10-30 | 15-40 | 15-20 |
| 30-50 | 30-70 | 25-40 |
| 50-100 | 40-100 | 45-60 |
| 100-200 | 40-100 | 50-80 |
| 200-400 | 50-100 | 60-100 |
| более 400 | 60-120 | 70-120 |

1. По формуле глубина дренирования составит:



где *lф* – длина пути фильтрации, м;

*i* – поперечный уклон россыпи;

*hп* – глубина питающей канавы, м;

*hвд*, *hвп* – соответственно глубина воды в дренажной и питающей канавах, м.

*Zд*= 3,2 + 45 .  0,01 – 0,35 – (0,5 – 0,2) = 3,0 м.

1. По формуле определяем объем оттаиваемых горных пород:



где *hот* – необходимая глубина оттайки, м;

*lф* – длина пути фильтрации, м;

*l* – длина участка оттайки (длина фронта фильтрации), м.

*Vот*= 4,8 . 45 . 100 = 21600 м3.

1. Необходимое количество воды для оттайки определяем по формуле:



где ωуд – удельный расход воды, зависящий от ее начальной температуры и от льдистости горных пород – чем выше температура воды, тем меньшее значение удельного расхода принимают при расчетах и наоборот, чем выше льдистость горных пород, тем большее значение (ωуд) следует принимать для расчетов оттаивания. При температуре воды *t* = +5 оС и льдистости горных пород *G* = 250 кг/м3 удельный расход, необходимый для оттайки 1 м3 мерзлых пород, составляет 5…15 м3/м3;

*Vот* – объем оттаиваемых мерзлых пород, м3

*ω* = 10 . 21600 = 216000 м3.

1. По табл. 26 определяем удельную теплоту оттаивания. *Qуд* = 55000 кДж / м3.

Таблица 26

**Удельные затраты теплоты на оттаивание 1 м3 мерзлой породы [4]**

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Льдис-тость, кг/м3 | Началь-  ная температура пород, оС | При конечной температуре пород, оС | | | | | |
| МДж/м3 | | | кВт . ч/м3 | | |
| 0 | +5 | +10 | 0 | +5 | +10 |
| 10 | -5 | 12,92 | 22,55 | 32,26 | 3,59 | 6,25 | 8,94 |
| 50 | -5 | 26,27 | 36,38 | 46,52 | 7,29 | 10,08 | 12,90 |
| 100 | -5 | 42,96 | 53,59 | 64,22 | 11,92 | 14,86 | 17,81 |
| 150 | -5 | 59,74 | 70,90 | 82,00 | 16,56 | 19,65 | 22,73 |
| 200 | -5 | 76,44 | 88,11 | 99,74 | 21,19 | 24,43 | 27,66 |
| 250 | -5 | 93,17 | 105,35 | 117,57 | 25,83 | 29,21 | 32,60 |
| 300 | -5 | 110,60 | 123,63 | 133,26 | 30,67 | 34,28 | 36,95 |
| 400 | -5 | 143,34 | 157,11 | 173,05 | 39,74 | 43,56 | 47,38 |
| 10 | -10 | 22,46 | 32,13 | 41,76 | 6,23 | 8,91 | 11,58 |
| 50 | -10 | 35,85 | 45,94 | 56,02 | 9,94 | 12,74 | 15,53 |
| 100 | -10 | 52,55 | 63,18 | 73,64 | 14,57 | 17,51 | 20,41 |
| 150 | -10 | 67,73 | 80,66 | 91,59 | 18,78 | 22,30 | 25,39 |
| 200 | -10 | 86,02 | 97,65 | 109,37 | 23,85 | 27,08 | 30,32 |
| 250 | -10 | 102,75 | 114,93 | 127,15 | 28,49 | 31,87 | 35,25 |
| 300 | -10 | 119,45 | 132,17 | 144,89 | 33,12 | 36,65 | 40,17 |
| 400 | -10 | 152,90 | 166,69 | 180,49 | 42,40 | 46,22 | 50,04 |

Тогда необходимое время для оттаивания всего массива мерзлых горных пород на участке можно определить приближенно по формуле:



где *К* = 209,2, если теплота в кДж и *К* = 58, если теплота в кВт . ч;

*Zд* = *Z* – напор воды, м;

*τ* = 4,8 . 55000 . 45 / (209,2 . 12,1  = 1372 ч = 57 сут.

1. Необходимый среднесуточный расход воды определяем по формуле



где *τ* – продолжительность сезона оттайки, сут.

*ωсут* = 10 . 21600 / 57 = 3789 м3 / сут.

1. По формуле определяем необходимый часовой расход воды, приходящийся на 1 пог.м питающей канавы



где 24 – перевод время суток в часы.

*ωн*= 3789/ (24 .  100) = 1,58 м3 / (м . ч).

1. Величина возможного питания ФДО определяется по формуле



где ωи – дебит источника водоснабжения, м3/ч.

*ωф*= 200 / 100 = 2,0 м3 / (м . ч).

1. Необходимый приток воды с 1 погонного метра дренажной канавы определяется по формуле



где *Кф*– коэффициент фильтрации, м/ч;

*Нот*, *Нд* – мощности водонасыщенного слоя соответственно около оросителя и дренажной канавы, м;

*Нот* = *hот*, *Нд* =0, если *hот*≤ *Z* и *Нд* = *hот* – *Z*, если *hот* >*Z*.

*ωд*= 3,8 [4,82 – (4,8 –3,0)2 ] / (2 . 45) = 0,836 м3 / (м . ч).

11. Если *ωф*>*ωн*>*ωд*, то режим питания избыточный. Однако по мере увеличения глубины талых пород расход воды возрастает, поэтому оттайка при избыточном снабжении может перейти в режим ограниченного питания. Глубина, начиная с которой режим питания изменится, может быть определена по формулам:

 если *Z* > *hот* (1)

 если *Z* < *hот* (2)

Т.к. *ωф*>*ωн*> *ωд*= 2,0 > 1,58 > 0,836, то режим питания ФДО избыточный. Учитывая, что по условию *Z* < *hот*, можно по формуле (2) определить глубину оттайки, при которой режим питания изменится.

*h* = 45 . 2,0 / (3,8 . 3,0) + 3,0 / 2 = 9,39 м.

Оттаивание мерзлых горных пород будет происходить при постоянном избытке воды, т.к. заданная глубина оттаивания значительно меньше глубины оттайки при достижении которой режим питания измениться.

**Задание для самостоятельной работы**

1. Выполнить расчет фильтрационно-дренажного оттаивания мерзлых горных пород с канавным питанием.

2. Определить режим водоснабжения (условия в табл. 27).

3. Выполнить анализ полученных результатов и сделать соответствующие выводы.

Таблица 27

**Исходные данные для расчета фильтрационно-дренажного**

**оттаивания с избыточным канавным питанием**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| №  ва-  ри-ан-та | Длина  фронта  фильт-  рации,  м | Дебит  источ-  ника,  м3/ч | Длина  пути  фильт-  рации,  м | Коэффи-  циент  фильт-  рации,  м/ч | Время  оттаи-  вания  пород,  сут | Глуби-  на от-  таива-  ния,  м | Темпе-  ратура  воды,  оС | Содержа-  ние льда  в горной  породе,  кг/м3 |
| 1 | 110 | 130 | 20 | 1,50 | 50 | 4,0 | 5 | 400 |
| 2 | 120 | 140 | 25 | 1,84 | 60 | 4,0 | 6 | 350 |
| 3 | 90 | 110 | 30 | 1,26 | 70 | 4,2 | 7 | 300 |
| 4 | 80 | 100 | 35 | 1.68 | 80 | 4,4 | 8 | 250 |
| 5 | 100 | 125 | 40 | 2,10 | 90 | 4,6 | 9 | 200 |
| 6 | 85 | 100 | 45 | 2,52 | 100 | 4,8 | 10 | 150 |
| 7 | 125 | 140 | 50 | 2,94 | 110 | 4,8 | 11 | 180 |
| 8 | 95 | 105 | 55 | 3,36 | 120 | 4,6 | 11 | 200 |
| 9 | 110 | 130 | 60 | 3,78 | 130 | 4,6 | 12 | 220 |
| 10 | 125 | 150 | 20 | 1,40 | 140 | 4,4 | 8 | 250 |
| 11 | 115 | 130 | 30 | 1,55 | 150 | 4,4 | 9 | 300 |
| 12 | 105 | 115 | 35 | 2,00 | 160 | 4,2 | 10 | 350 |

**ЗАДАНИЕ № 13**

Расчет основных параметров барабанных сушилок

Согласно индивидуальному заданию (табл. 28) выполнить расчёт основных параметров барабанных сушилок.

Таблица 28

**Исходные данные для расчета основных параметров барабанных сушилок**

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| №  вар. | Материал, подвергаемый сушке | Влажность материала, % | | Температура газа, 0С | | Производительность по высушенному  продукту Q, т/ч | Напряжение  объема сушилки ω, кг/(м3∙ч) |
| Исходный  W1 | Высушенный  W2 | Поступающий в сушилку  t1 | Выходящий из сушилки  t2 |
|  | Концентрат: | | | | | | |
| 1 | Медный | 13 | 5 | 800 | 110 | 33 | 48 |
| 2 | Цинковый | 45 | 17 | 1050 | 275 | 3 | 69,4 |
| 3 | Свинцовый | 40 | 14 | 650 | 175 | 1,5 | 29,4 |
| 4 | Флотационный фосфорный | 18 | 1 | 800 | 135 | 20 | 31 |
| 5 | Флотационный фосфорный | 17 | 2 | 860 | 170 | 14-17 | 39,5 |
| 6 | Флотационный калийный | 10 | 1,5 | 800 | 130 | 60 | 29 |
| 7 | Флотационный калийный | 7 | 1,5 | 800 | 120 | 20 | 21,3 |
| 8 | Флотационный апатитовый | 13 | 1 | 1000 | 110 | 130 | 62,3 |
| 9 | Фосфоритный | 15,5 | 1,5 | 660 | 130 | 15 | 45 |
| 10 | Железная руда | 14 | 2,5 | 650 | 85 | 128 | 57,5 |

***Рекомендации к расчету:***

1) Суммарный объем сушилки определяется по формуле:

, м3

где , – показатели разбавления (разжижения).

Показатели разбавления находятся по формуле:

,

где , % - содержание твердого в исходном материале;

, % - содержание твердого в высушенном материале.

2) Полезный расход тепла на 1 кг твердого в сушимом материале рассчитывается по формуле:

)(, кДж

3) Масса газа на входе в сушилку определяется по формуле:

, кг/кг твердого

4) Объем газа на входе в сушилку находят по формуле:

, м3/кг твердого

5) Плотность газа на входе в сушилку рассчитывается по формуле:

, кг/м3

6) Плотность газа на выходе из сушилки рассчитывается по формуле:

, кг/м3,

где А – масса испарившейся воды на 1 кг твердого; определяется следующим образом: находим W=W1-W2 (%), далее составляем пропорцию W – на 100 кг, тогда на 1 кг А=(1\*W)/100. Например, W=13-5=8%; 8% - на 100 кг, тогда на 1 кг А=(1\*8)/100=0,08 кг/кг твердого.

7) Объем газа на выходе из сушилки находят по формуле:

, м3/кг твердого

8) Расход топлива определяется по формуле:

, кг/кг твердого,

где =1,349 кДж/(кг∙К) – средняя теплоемкость дымового газа;

=20000 кДж/кг – рабочая теплота сгорания топлива (бурого угля);

=0,85...0,95 – к.п.д. топки.

9) Расход топлива на испарение 1 кг воды рассчитывается по формуле:

, кДж/кг

10) Теоретический расход топлива на испарение воды находят по формуле:

, кДж/кг,

где =15 0С – температура продукта, поступающего в сушилку, и воздуха, поступающего в топку, принимается равной температуре помещений фабрики.

11) Расход топлива определяется по формуле:

, кг/ч

**Форма промежуточного контроля**

***Зачет***

**Вопросы на зачет по дисциплине «Термодинамика»**

1. Термодинамика горных пород. Цели и задачи.
2. Термодинамические системы и их параметры. Термодинамические процессы. Уравнения состояния.
3. Первый закон термодинамики. Внутренняя энергия и внешняя работа.
4. Энтальпия и энтропия. Второй и объединенный законы термодинамики.
5. Термодинамический КПД. Термодинамическая вероятность.
6. Химическая термодинамика. Цели и задачи. Тепловые эффекты химических реакций. Закон Гесса и его следствия.
7. Химическое равновесие. Уравнение Кирхгофа.
8. Фазовые переходы в горных породах. Правило фаз Гиббса. Полиморфные превращения.
9. Уравнение Клапейрона-Клаузиуса. Уравнения термодинамики основных фазовых переходов.
10. Уравнение Пойнтинга. Давление в сосуществующих фазах при искривленной поверхности их раздела.
11. Уравнение первого закона термодинамики для потоков жидких и газообразных теплоносителей.
12. Основные уравнения процессов течения жидкости и газа. Уравнение Бернулли.
13. Сопло Лаваля. Температура адиабатного торможения потока.
14. Теплоемкость минералов и горных пород и ее зависимость от температуры. Уравнение Майера.
15. Тепло- и температуропроводность минералов и горных пород. Их зависимость от температуры.
16. Тепловое расширение минералов и горных пород. Остаточные температурные деформации.
17. Зависимость упругих и прочностных свойств минералов и горных пород от температуры.
18. Зависимость электрических и магнитных свойств минералов и горных пород от температуры.
19. Комплексы физических свойств горных пород и их зависимость от температуры.
20. Мерзлые породы как термодинамические системы. Теплофизические свойства мерзлых и многофазных пород.
21. Основной закон и дифференциальные уравнения теплопроводности. Уравнение Лапласа.
22. Тепловые режимы. Краевые условия. Условия однозначности.
23. Граничные условия. Сущность, виды, область применения.
24. Виды теплоносителей и теплообмена. Пограничный слой и механизм конвективного теплообмена. Методы определения теплофизических свойств теплоносителей.
25. Требования к тепловому режиму в подземных выработках. Источники тепловыделения и методы нормализации температурного режима.
26. Процессы теплопереноса в недрах Земли. Источники и термодинамические параметры.
27. Количественные и качественные особенности теплового режима горных выработок в зоне многолетней мерзлоты.
28. Расчет процессов массообмена в горных выработках. Показатели процесса массообмена.
29. Расчет процессов теплообмена в горных выработках. Показатели процесса теплообмена.
30. Критерии подобия в термодинамике. Физический смысл и пределы их изменений.
31. Безразмерные величины, имеющие смысл критериев подобия в термодинамике. Физический смысл и пределы их изменений.
32. Критерии подобия Фурье, Био, Кирпичева. Физический смысл. Область применения.
33. Проходка выработок с предварительным замораживанием горных пород. Сущность, область применения, технология, режимы.
34. Технологические схемы замораживания горных пород перед проходкой горизонтальных и наклонных выработок.
35. Дополнительные мероприятия при замораживании горных пород перед проведением горных выработок в сложных условиях.
36. Азотное замораживание горных пород перед проходкой выработок. Сущность, область применения.
37. Замораживание горных пород охлажденным воздухом. Сущность, область применения.
38. Огневое бурение и расширение скважин; физическая сущность и термодинамические модели процессов.
39. Электротермический способ разрушения горных пород; физическая сущность и термодинамическая модель процесса.
40. Глубина промерзания поверх­ностного слоя горных пород; влияние состава по­род, их влажности и теплофизических характеристик на процесс промерзания горных пород.
41. Способы оттаивания мерзлых пород; условия при­менения различных способов оттайки.
42. Назначение и классификация процессов окускования; агломерация, окомковывание, брикетирование полезных ископаемых.

**Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины**

**Основная литература** (**печатные издания)**

1. Гончаров, С.А. Термодинамика : учебник / Гончаров Степан Алексеевич. - 2-е изд., стер. - Москва : МГГУ, 2002. - 440 с

2. Кириллин, В.А. Техническая термодинамика : учебник / Кириллин Владимир Алексеевич, Сычев Вячеслав Владимирович, Шейндлин Александр Ефимович. - 5-е изд., перераб. и доп. - Москва : МЭИ, 2008. - 496 с.

3. Теплотехника : учебник / под ред. В.Н. Луканина. - 5-е изд., стер... - Москва : Высш.шк., 2006. - 671с.

4. Ляшков, В.И. Теоретические основы теплотехники : учеб. пособие / Ляшков Василий Игнатьевич. - Москва : Высшая школа, 2008. - 317 с.

**Основная литература (издания из ЭБС)**

1. Дмитриев, А.П. Разрушение горных пород / А. П. Дмитриев; Дмитриев А.П. - Moscow : Горная книга, 2006. - . - Разрушение горных пород [Электронный ресурс] / Дмитриев А.П. - М: Издательство Московского государственного горного университета, 2006.

**Дополнительная литература (печатные издания)**

1. Щербань, А.Н. Руководство по регулированию теплового режима шахт / А. Н. Щербань, О. А. Кремнев, В. Я. Журавленко. - 3-е изд., перераб. и доп. - Москва : Недра, 1977. - 359с.

2. Термодинамика : контрольные задания и метод. указ. / сост. Р.Б. Закиев. - Чита : ЧитГУ, 2005. - 35с.

**Дополнительная литература (издания из ЭБС)**

1. Кудинов, В.А. Техническая термодинамика и теплопередача : Учебник / Кудинов Василий Александрович; Кудинов В.А., Карташов Э.М., Стефанюк Е.В. - 3-е изд. - М. : Издательство Юрайт, 2017. - 442.

2. Арене, В.Ж. Физико-химическая геотехнология [Электронный ресурс] / Арене В.Ж. - М. : Горная книга, 2001.

**Базы данных, информационно-справочные и поисковые системы**

Каждый обучающийся обеспечен индивидуальным неограниченным доступом к электронно-библиотечным системам:

1. <https://www.e.lanbook.com/> Электронно-библиотечная система «Издательство «Лань».
2. <https://www.biblio-online.ru/> Электронно-библиотечная система «Юрайт»
3. <http://www.studentlibrary.ru/> Электронно-библиотечная система «Консультант студента»
4. <http://www.trmost.com/> Электронно-библиотечная система «Троицкий мост»
5. <http://www.diss.rsl.ru/> Электронная библиотека диссертаций Российской государственной библиотеки.
6. <https://www.elibrary.ru/> Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU
7. <http://www.edu.ru/> Федеральный портал «Российское образование»
8. [http://www.law.edu.ru/](http://law.edu.ru/) Федеральный правовой портал «Юридическая Россия»
9. <http://www.window.edu.ru>/ Информационная система «Единое окно доступа к образовательным ресурсам» предоставляет свободный доступ к каталогу образовательных Интернет-ресурсов и полнотекстовой электронной учебно-методической библиотеке для общего и профессионального образования.
10. <http://www.megabook.ru/> Энциклопедии Кирилла и Мефодия
11. <http://www.krugosvet.ru/> Универсальная научно-популярная онлайн-энциклопедия «Кругосвет»
12. <http://www.glossary.ru/> Тематические толковые словари
13. <https://www.dic.academic.ru/> Словари и энциклопедии
14. <http://www.nlr.ru/> Российская национальная библиотека
15. <https://www.prlib.ru/> Президентская библиотека им. Б.Н. Ельцина
16. <http://www.gpntb.ru/> Государственная публичная научно-техническая библиотека России
17. <http://www.rasl.ru/> Библиотека Российской Академии наук
18. <http://www.studentam.net/> Электронная библиотека учебников
19. <http://www.techlib.org/> Библиотека технической литературы
20. <http://www.rvb.ru/> Русская виртуальная библиотека

Ведущий преподаватель \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ М.В. Лизункин

Заведующий кафедрой ПРМПИ \_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_ В.В. Медведев