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  в часах | | | Всего часов |
| 7  семестр | ----  семестр | ----  семестр |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Общая трудоемкость | 180 |  |  | 180 |
| Аудиторные занятия, в т.ч.: | 18 |  |  | 18 |
| лекционные (ЛК) | 8 |  |  | 8 |
| практические (семинарские) (ПЗ, СЗ) | 10 |  |  | 10 |
| лабораторные (ЛР) | - |  |  | - |
| Самостоятельная работа студентов (СРС) | 162 |  |  | 162 |
| Форма промежуточного контроля в семестре | Диф. зачет |  |  | Диф. зачет |
| 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.  ***Тепловые 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. 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.  ***Основы химической термодинамики:***  Тепловые эффекты химических реакций; закон Гесса и его следствия; уравнение Кирхгофа; химическое равновесие; принцип Ле Шателье. |
|  | ***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.  ***Теплообмен в горных выработках:***  Требование к тепловому режиму в подземных выработках; влияние теплового режима на процессы горных работ; нормативные требования к тепловому режиму; количественные и качественные особенности теплового режима горных выработок в зоне многолетней мерзлоты; коэффициенты теплообмена между стенками выработок и рудничным воздухом.  Источники тепла в подземных выработках; методы нормализации температурного режима рудничного воздуха; аналитические методы расчета температурного поля вмещающих пород вокруг выработки  ***Замораживание горных пород при проведении выработок***:  Сущность способа проходки выработок с предварительным замораживанием пород; режимы замораживания; виды хладоносителей; оборудование; схемы циркуляции хладоносителей в замораживающих колонках.  Технология проходки выработок; схемы замораживания при строительстве стволов, горизонтальных и наклонных выработок; технологические особенности и дополнительные мероприятия при создании ледопородных ограждений в сложных гидрогеологических условиях.  ***Проектирование способов замораживания горных пород при проведении выработок:***  Проектирование и расчет процесса рассольного замораживания горных пород.  Безрассольные способы замораживания горных пород (азотное и охлажденным воздухом): сущность, область применения, технологические особенности, особенности расчета и проектирования.  ***Подземная выплавка серы (ПВС):***  Свойства серы и серных руд; сущность и условия применения ПВС; тепловой баланс и параметры процесса ПВС; технология подготовки и оборудования серо-добычных скважин.  ***Подземная газификация твердого топлива:*** Подземная газификация углей (ПГУ);свойство углей как сырья для ПГУ; частичная и полная газификация; физико-химические основы полной газификации угля; технологические основы ПГУ; распределение температуры по длине канала газификации; технологические параметры канала; проходка каналов газификации; технико-экономические показатели ПГУ.  ***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 |

**Форма текущего контроля**

***Контрольная работа***

К решению контрольной работы следует приступать только после изучения соответствующего раздела курса. Решать задания, строго придерживаясь своего варианта. Номера вариантов заданий в контрольной работе 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.

**Контрольная работа оформляется согласно МИ -01-03-2023** [Общие требования к построению и оформлению учебной текстовой документации.](http://www.zabgu.ru/files/html_document/pdf_files/fixed/Normativny'e_dokumenty'/MI__01-02-2018_Obshhie_trebovaniya_k_postroeniyu_i_oformleniyu_uchebnoj_tekstovoj_dokumentacii.pdf)

***Раздел «Тепловые свойства горных пород и расчет термодинамических***

***параметров их состояния»***

***Задание № 1:***Построить графики зависимостей удельной теплоемкости, тепло- и температуропроводности горной породы заданного состава (табл. 1) 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. 2.

Таблица 1

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 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 2

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 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 – п орядковый 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.

***Задание № 2:*** Определить удельное тепловое сопротивление *ξ*гп ((м⋅К)/Вт) и удельную теплопроводность *λ*гп (Вт/(м⋅К)) горной породы ранее заданного состава (таблица 1) при Т = 20 °С с учетом ее пористости П и водонасыщенности порового пространства Кв (табл. 3).

Таблица 3

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 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 (задание № 1).

*Задание № 3:* Определить энтальпию I (Дж) и энтропию S (Дж/К) куска горной породы заданного состава и объема V (м3) при температуре Т (табл. 4). 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. 5.

Таблица 4

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 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 5

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 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 № 4:* Определить работу разрушения и изменение внутренней энергии негабаритного куска горной породы объема V (табл. 6) 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 6

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 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:

***Раздел «Расчет процессов тепло- и массообмена в горных выработках»***

*Задание № 5:* Определить коэффициент теплоотдачи горной выработки конвекцией α (Вт/(м2⋅К)) при исходных данных, приведенных в табл. 7, 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 7

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 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. 8, где – эквивалентный диаметр горной выработки, м);

– массовый расход воздуха, кг/с.

Таблица 8

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| d/Dэкв | 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 № 6:*** Определить основные термодинамические параметры состояния шахтного воздуха и параметры влагообмена по условиям предыдущей контрольной работы (вариант Б – выработка влажная). Относительная влажность воздуха ϕ = 0,96.

***Рекомендации к расчету***

Влагосодержание *d* (кг/кг) шахтного воздуха:

где *Р*нп – парциальное давление водяных паров, насыщающих воздух при данной температуре, Па (*Р*нп = 17,53 мм рт. ст. = 2337 Па при *T*в = 20°С).

Теплоемкость шахтного воздуха:

где *С*с – теплоемкость сухого воздуха, *С*с = 1005 Дж/(кг⋅К);

*С*п – теплоемкость водяных паров, *С*п = 1926 Дж/(кг⋅К).

Теплосодержание (удельная энтальпия) *I* (Дж/кг) воздуха:

Коэффициент массоотдачи в единицах массы *β*о (кг/(м2⋅с⋅Па))

Коэффициент массотеплопередачи *ε* (отн. ед.):

где *m* - коэффициент, зависящий от *Т*в (*m* = 0,88 мм рт. ст./°С = 117 Па/К при *Т*в = 20 °С).

Тепловой коэффициент влагообмена А:

где n – коэффициент удельного влагоприращения, определяеммый по выражению

где *В*о = 760 мм рт. ст. = 101300 Па.

***Задание № 7:*** Определить значение коэффициента нестационарного теплообмена kτ (Вт/(м2⋅К)) и температуру стенки выработки θс при расчетном времени охлаждения горных пород *τ1* и *τ*2. 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  *- τ*2, 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 = f1 (Fo, Bi) и *θ*с = f2 (Fo, Bi), где Ки = kτ Rо / *λ* – критерий Кирпичева (безразмерный коэффициент нестационарного теплообмена), *θ´*с = (*θ*с – *t*в) / (*t*п – *t*в) – безразмерная температура стенки выработки.

***Задание № 8:*** 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 № 9:***Определить амплитуду колебаний годовой температуры воздуха *ωL* (°С) в воздухоподающем стволе глубиной *L* и диаметром *D* (м) в свету и исходных данных, приведенных в табл. 14.

Приращение температуры движущегося по стволу воздуха от сжатия и влагообмена *θ′* = 0,0048 °С/м; плотность воздуха ρ = 1,2 кг/м3.

Таблица 14

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Наименование  показателя | № варианта | | | | | | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| *L*, м | 400 | 600 | 800 | 960 | 980 | 500 | 700 | 450 | 900 | 650 |
| *D*, м | 5,0 | 6,5 | 7,0 | 7,5 | 8,0 | 8,5 | 9,0 | 6,2 | 7,2 | 8,2 |
| Количество подаваемого воздуха *Q*, м3/с | 60 | 90 | 100 | 125 | 140 | 150 | 180 | 80 | 110 | 140 |
| Амплитуда колебаний температуры воздуха на поверхности *ω0*, °С | 42 | 46 | 38 | 37 | 48 | 52 | 60 | 44 | 55 | 66 |
| Удельная теплопроводность стенки ствола  *λ*, Вт/(м⋅К) | 1,44 | 4,12 | 2,08 | 3,76 | 1,85 | 2,43 | 3,90 | 4,34 | 3,56 | 3,38 |
| Коэффициент температуропроводности стенки ствола *α*⋅10-6 м2/с | 0,85 | 1,02 | 0,95 | 0,88 | 1,46 | 0,78 | 0,90 | 0,92 | 1,25 | 1,36 |

***Рекомендации к расчету***

Величина *ω*L определяется по выражениям:

где *α*о – коэффициент теплоотдачи стенки ствола, Вт/(м2⋅К);

*k*ω – коэффициент затухания амплитуды колебания годовой температуры воздуха в стволе;

– периметр поперечного сечения ствола, м;

*G* - массовый расход воздуха, кг/с;

*С*P - изобарная теплоемкость воздуха (*С*P = 1005 Дж/кг).

Величина определяется по табл. 12.

***Раздел «Тепловые расчеты процессов горного производства»***

***Задание № 10:***Определить толщину однослойной изоляции *δ*из (м) из пенополиуретана, не допускающую протаивания стенок выработки более чем на Rд = 2 м за срок ее эксплуатации *τ* = 105 ч (~ 10 лет) при отсутствии конвективного теплообмена при граничных условиях первого рода и исходных данных, приведенных в табл. 15. Коэффициент теплопроводности пенополиуретана λиз = 0,035 Вт/(м⋅К), начальная температура горных пород Т0 = -2 °С; температура плавления льда *T*пл, = 0 °С; удельная теплота плавления льда Lпл = 0,32⋅106 Дж/кг. Определить допускаемую глубину протаивания стенок выработки, при которой условие протаивания на глубину не больше допускаемой Rд′ (м) будет выполняться без изоляции.

Таблица 10

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Наименование  показателя | № варианта | | | | | | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Плотность породы *γ*, кг/м3 | 2200 | 2500 | 2150 | 2450 | 2230 | 2400 | 2250 | 2350 | 2100 | 2300 |
| Влажность породы  *W*, отн.ед. | 0,05 | 0,04 | 0,03 | 0,06 | 0,05 | 0,03 | 0,04 | 0,05 | 0,06 | 0,04 |
| Удельная теплопроводность талой породы  *λп*, Вт/(м⋅К) | 1,28 | 1,36 | 1,44 | 1,60 | 1,18 | 1,40 | 1,53 | 1,32 | 1,56 | 1,30 |
| Коэффициент температуропроводности мерзлой породы *α* ⋅106, м2/с | 0,695 | 0,766 | 0,630 | 0,565 | 0,745 | 0,662 | 0,724 | 0,587 | 0,612 | 0,684 |
| Температура воздуха в выработке *Тв*, °С | +2 | +3 | +2 | +3 | +4 | +3 | +2 | +4 | +3 | +2 |

***Рекомендации к расчету***

Расчет выполнить в соответствии с методикой приближенного расчета толщины изоляции:

где *β* – коэффициент, определяемый по табл. 16.

Таблица 16

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| *β* | 0 | 0,75 | 1,50 | 2,20 | 2,80 |

Условие протаивания не больше, чем на величину *R*´д за срок эксплуатации без изоляции, имеет вид

Подставив в данное выражение значения коэффициента *k* и критерия Фурье *F*о, определить величину *R*д´

***Задание № 11:***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. 17.

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 17

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 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. 18.

Таблица 18

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. 19);

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

Таблица 19

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

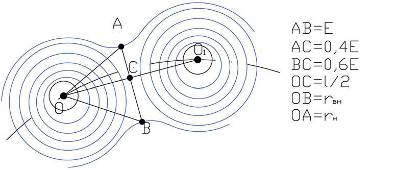
где Nскв – количество основных замораживающих скважин, шт.

*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 № 12:* Определить химический КПД η (%) подземной газификации углей (ПГУ) при исходных данных, приведенных в табл. 20.

Таблица 12

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Наименование  показателя | № варианта | | | | | | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Тип исходного угля | каменный | | | | | бурый | | | | |
| Содержание углерода в угле *С*, % | 73,3 | 73,5 | 73,7 | 73,9 | 74,1 | 40,0 | 40,2 | 40,5 | 39,6 | 39,2 |
| Удельная теплота сгорания угля *Qy*, кДж/кг | 28570 | 28590 | 29610 | 29630 | 29650 | 15020 | 15100 | 15200 | 15000 | 14950 |
| Концентрация кислорода в дутье, % | 21 | 55 | 95 | 21 | 95 | 21 | 45 | 95 | 45 | 21 |

Расчетный состав получаемого газа ПГУ (в объемных процентах) приведен в табл. 22.

Таблица 22

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Концентрация кислорода в дутье, % | Состав газа, % (объемных) | | | | | | |
| *CmHn* | СО2 | *H2* | *H2S* | СО | СН4 | n2 |
| Из бурого угля | | | | | | | |
| 21 | 0,2 | 18,9 | 17,2 | 0,4 | 5,5 | 2,5 | 54,5 |
| 45 | 0,2 | 22,3 | 26,3 | 0,2 | 12,5 | 3,0 | 35,5 |
| 95 | 0,2 | 28,0 | 40,8 | 0,6 | 24,3 | 4,1 | 2,0 |
| Из каменного угля | | | | | | | |
| 21 | 0,1 | 6,6 | 13,1 | - | 22,2 | 2,1 | 55,9 |
| 55 | 0,1 | 11,8 | 25,0 | - | 42,0 | 4,0 | 17,0 |
| 95 | 0,1 | 18,6 | 33,7 | - | 37,1 | 4,1 | 6,7 |

***Рекомендации к расчету***

Химический к.п.д. ПГУ *η* (%) рассчитывается по формуле

где *V*г - теоретический выход газа с 1 кг угля, м3/кг;

*Q*г – удельная теплота сгорания получаемого газа, кДж/кг.

Величины *V*г и *Q*г определяются по выражениям

где Σ*C*г – суммарное содержание углеродсодержащих компонентов в получаемом газе, %

***Задание № 13:***Определить основные технологические параметры процесса подземной выплавки серы (ПВС) при исходных данных, приведенных в табл. 22.

Таблица 22

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Наименование  показателя | № варианта | | | | | | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Пористость серного пласта *П*, отн. ед. | 0,12 | 0,20 | 0,19 | 0,13 | 0,18 | 0,14 | 0,15 | 0,17 | 0,11 | 0,10 |
| Объем серы в 1 м3 руды *υ*, м3/м3 ) | 0,15 | 0,22 | 0,21 | 0,15 | 0,20 | 0,16 | 0,16 | 0,18 | 0,13 | 0,12 |
| Начальная температура пород *Т0*, °С | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 17 | 15 | 13 | 11 | 20 |
| Плотность руды γ, кг/м3 | 2360 | | 2480 | | 2540 | | 2650 | | 2450 | |
| Удельная теплоемкость руды *СP*, Дж/кг | 854 | 820 | 812 | 864 | 947 | 843 | 835 | 795 | 928 | 776 |
| Мощность серного пласта *h*, м | 15 | 14 | 1210 | 16 | 18 | 20 | 13 | 11 | 17 |  |
| Объемный расход перегретой воды *qв*, м3/с | 0,005 | | 0,010 | | 0,006 | | 0,008 | | 0,007 | |
| Радиус зоны плавления серы *R*, м | 6 | 13 | 8 | 11 | 10 | 9 | 12 | 7 | 14 | 15 |

Плотность серы *γ*с = 2060 кг/м3; плотность перегретой воды *γ*в = 960 кг/м3; температура перегретой воды, подаваемой в серный пласт, *T*в = 160 °С (433 К); необходимая температура нагрева серного пласта *Т*п = 157 °С (430 К); температура плавления серы *Т*п = 119 °С (392 К); удельная теплоемкость серы *С*с = 1860 Дж/(кг⋅К); удельная теплоемкость перегретой воды *С*в = 4200 Дж/(кг⋅К); удельная теплота плавления серы *L*п = 49370 Дж/кг; коэффициенты извлечения серы при ПВС – технологический *εт* = 0,85, общий *ε* = 0,45.

*Рекомендации к расчету*

Удельный объемный расход теплоносителя (перегретой воды) на выплавку 1 кг серы *Vm* (м3/кг):

Количество тепла, необходимое для плавления серы в единице объема руды, *Q*пл (Дж/м3):

Количество серы, добываемое в единицу времени (производительность серодобычной скважины) *М*с (кг/с):

Скорость движения фронта плавления серы *V*пл (м/с):

Коэффициент использования тепла при ПВС *К*и (%):

**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. Термовлажностные параметры состояния шахтного воздуха.
34. Приближенные аналитические методы расчета температурного поля горных пород вокруг выработок.
35. Аналитические методы расчета процессов тепло- и массообмена в горных выработках.
36. Методы расчета основных параметров нагрева горных пород.
37. Расчет глубины промерзания связных пород при отсутствии теплоизолирующего покрытия.
38. Расчет глубины промерзания связных пород при использовании теплоизолирующего покрытия.
39. Проходка выработок с предварительным замораживанием горных пород. Сущность, область применения, технология, режимы.
40. Технологические схемы замораживания горных пород перед проходкой горизонтальных и наклонных выработок.
41. Дополнительные мероприятия при замораживании горных пород перед проведением горных выработок в сложных условиях.
42. Проектирование процесса замораживания горных пород перед проходкой выработок. Расчет процесса рассольного замораживания.
43. Азотное замораживание горных пород перед проходкой выработок. Сущность, область применения, технологические схемы. Особенности расчета.
44. Замораживание горных пород охлажденным воздухом. Сущность, область применения, технологические схемы. Особенности расчета.
45. Огневое бурение и расширение скважин. Сущность и расчетные схемы.
46. Термомеханическое бурение скальных пород. Сущность, методы, расчетные схемы.
47. Подземная газификация углей. Сущность. Методы. Расчет основных показателей.
48. Подземная выплавка серы. Сущность. Расчет основных технологических показателей.
49. Социальная значимость использования тепла земных недр. Социальная значимость безлюдной выемки серы. Социальная значимость подземной газификации угля в аспектах экономики, безопасности.

**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