Институт
технической
теплофизики
АН УССР

Ленинградский
горный институт
им. Г.В. Плеханова
Минвуза РСФСР

Справочное пособие к СНиП

Серия основана в 1989 году

Теплофизические расчеты объектов народного хозяйства, размещаемых в горных выработках

Москва Стройиздат 1989

gost.e-ecolog.ru

ББК 38.113
Т 34
УДК 697.1.536.2 (035.5)

Рекомендовано к изданию Ученым советом Института технической теплофизики АН УССР.

Редактор М.А. Жарикова

Теплофизические расчеты объектов народного хозяйства,
Т 34 размещаемых в горных выработках / Ин-т техн. теплофизики АН УССР Ленингр. горный ин-т им. Г.В. Плеханова. — М.: Стройиздат, 1989. — 80 с.: ил. — (Справ. пособие к СНиП).
ISBN 5-274-01424-0

Разработано к СНиП 2.01.55—85 "Объекты народного хозяйства в подземных горных выработках ". Содержит рекомендации по выбору исходных данных для расчета теплового режима подземных сооружений производственно-складского назначения, справочный материал по теплофизическим и влагофизическим свойствам горных пород, а также методики определения параметров систем регулирования теплового режима.

Для инженерно-технических работников проектных, научно-исследовательских и строительных организаций.

3302000000 — 245
П ———————— Инструкт.-нормат. 11 вып.—36—89 ББК 38.113
047 (01) — 89

ISBN 5-274-01424-0

© Институт технической теплофизики АН УССР, Ленинградский горный институт им. Г.В. Плеханова, 1989

ВВЕДЕНИЕ

Подземные сооружения обладают рядом технических преимуществ перед традиционными наземными постройками, в том числе такими, как значительное сокращение расходов строительных и изоляционных материалов, снижение энергетических затрат, увеличение продолжительности эксплуатации, повышение защищенности от внешних воздействий и др.

Наиболее рациональным считается размещение в подземном пространстве сооружений складского назначения, а также некоторых производственных, энергетических и инженерно-транспортных объектов и лечебных учреждений.

Для нормального функционирования подземных сооружений в них должны обеспечиваться и сохраняться в течение всего времени эксплуатации определенные температура и влажность воздуха. Эти параметры состояния воздуха, а также его химический состав, кратность обмена, скорость движения, степень запыленности в основном соответствуют требованиям, предъявляемым к аналогичным наземным объектам. Однако в связи с особенностями физических процессов тепло- и массопереноса здесь требуется особый подход как к выбору исходных величин, так и к методам расчета и способам регулирования термовлажностных условий, определяющих микроклимат. Основным отличием подземного сооружения от его наземного аналога является характер тепло- и массообмена с окружающей средой. В наземных объектах такой средой является воздух с температурой, изменяющейся по закону, близкому к гармоническому. По тому же закону изменяются поля температур и влагосодержаний в наружных ограждениях. При расчете производительности оборудования исходят из наиболее неблагоприятных условий его работы, принимая их стационарными. Из-за сравнительно небольшого объема стен и перекрытий на создание требуемых термовлажностных условий даже в помещениях с низкими температурами требуется в реальных условиях две-три недели.

В подземных сооружениях окружающей средой является массив горных пород с постоянной естественной температурой. В связи с этим формирование в них заданных термовлажностных условий требует значительно большего времени, чем у аналогичных наземных объектов. Изменение температуры воздуха в подземной выработке и температуры горных пород носит выраженный нестационарный характер. При этом если период формирования заданного термовлажностного режима (предэксплуатационный период) характеризуется четко выраженным неустановившимся режимом теплообмена, то большая часть эксплуатационного периода удовлетворительно описывается закономерностями, характерными для квазистационарного режима.

Процессы тепло- и массопереноса в системе горный массив — воздушная среда помимо климатических факторов, характеризующихся изменением температуры и влажности наружного воздуха, определяются геолого-геотермическими и горно-техническими факторами.

К первым относятся свойства горных пород, окружающих подземные сооружения (ПС), гидрогеологические условия и температура пород на глубине строительства.

Под горно-техническими факторами понимаются конструктивные параметры выработки подземных сооружений, их геометрическая форма, расположение выработок относительно друг друга и поверхности Земли, а также протекающие в них технологические процессы, связанные с нагревом (охлаждением) и осушением (увлажнением) подаваемого воздуха.

Для расчета микроклимата подземных сооружений нельзя безоговорочно использовать методы, применяемые для прогноза теплового режима шахт, так как особенности формирования в них термовлажностных условий определенным образом отличаются от подземных выработок горнодобывающих предприятий. Эти отличия, прежде всего, обусловлены небольшой глубиной расположения ПС (до 200—300 м), сравнительно низкой естественной температурой пород (до 15—20°С), а также необходимостью обеспечения постоянных значений температуры и влажности воздуха при незначительных их колебаниях. В зависимости *от назначения подземного сооружения для обеспечения заданного микроклимата* может потребоваться комплексное использование всех видов тепловой обработки воздуха, в то время, как в шахтах и рудниках применяются главным образом или его нагрев, или охлаждение. Выраженный нестационарный характер процессов теплового взаимодействия воздушной среды ПС с горными породами при постоянстве протяженности и объема подземных выработок приводит к изменяющимся во времени условиям теплообмена и определяет необходимость осуществления непрерывного управления параметрами и системами регулирования *теплового режима.*

Таким образом, комплекс задач по обеспечению заданного микроклимата в ПС следует рассматривать как самостоятельное направление в горной и строительной теплофизике, а данное Пособие — систематизированным руководством по расчету теплового режима подземных сооружений и определению параметров систем его регулирования.

Разработано Институтом технической теплофизики АН УССР: (д-р техн. наук В.П. Черняк, кандидаты техн. наук Э.Н. Малашенко, В.А. Киреев, инж. А.С. Полубинский); ЛГИ: (канд. техн. наук С.Г. Гендлер, д-р техн. наук Ю.Д. Дядькин, канд. техн. наук Ю.В. Шувалов); ВСЕГИНГЕО (канд. техн. наук А.Я. Зильбельборд); МолдНИИСТРОМПРОЕКТ (кандидаты техн. наук И.Л. Ладыженский, Ф.П. Спиваков).

Условные обозначения

a — коэффициент температуропроводности, $м^2/с$;

a_m — коэффициент потенциалопроводности (диффузии), $м^2/с$;

B — барометрическое давление, МПа;

c — удельная теплоемкость, Дж/(кг ^oC);

d — диаметр, м;

F — площадь поверхности, $м^2$;

f — сечение, $м^2$;

g — ускорение свободного падения, $м/с^2$;

G — расход воздуха, кг/с;

H — глубина, м;

h — высота, м;

i — энтальпия, кДж/кг;

j — удельные влаговыделения, кг/($м^2$· с);

J — влаговыделения, кг/с;

k — коэффициент теплопередачи, Вт/($м^2$·^oC);

l — длина, м;

L — удельная теплота замерзания воды, Дж/кг (L = 335 кДж/кг);

N — мощность, Вт, кВт;

P — парциальное давление, МПа;

q — удельные тепловыделения, $Вт/м^2$;

Q — количество теплоты, Вт, кВт;

S — удельная теплота испарения (конденсации) воды, кДж/кг;

R_0 — универсальная газовая постоянная, Дж/(кмоль·К) (R_0 = 8,314 кДж/(кмоль·К);

R_t — радиус теплового влияния, м;

r — пространственная координата, перпендикулярная оси выработки, м;

T — температура пород, ^oC, K;

t — температура воздуха, ^oC, K;

U — периметр, м;

v — скорость, м/с;

w — влагосодержание пород, %; доли единиц;

x — влагосодержание, кг/кг, г/кг;

y — пространственная координата, направленная вдоль оси выработки м;

α — коэффициент теплоотдачи, Вт/($м^2$·^oC);

β — коэффициент массоотдачи, кг/($м^2$· с·МПа);

δ — безразмерный радиус теплового влияния;

$\epsilon_ш$ — коэффициент шероховатости поверхности;

η — коэффициент полезного действия;

λ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м·^oC);

λ_m — коэффициент массопроводности, кг/(м·с·МПа);

ν — кинематическая вязкость, $м^2/с$;

ξ — безразмерный радиус (глубина) промерзания;

ρ — плотность, $кг/м^3$;

σ — геотермический градиент, $^oC/м$;

τ — время, с, ч;

φ — влажность воздуха, %, доли единиц;

ψ — угол наклона выработки, град.;

ω — длительность годового периода, с, ч;

k_τ — коэффициент нестационарного теплообмена, Вт/($м^2$·^oC);

$k_{агр}$ — коэффициент интенсификации теплообмена при агрегатных переходах влаги;

β_τ — коэффициент нестационарного массообмена, кг($м^2$· с·МПа),

Числа подобия

Тепловые:

Nu – Нуссельта ($Nu = \alpha d_{эк}/\lambda_в$); Re – Рейнольдса ($Re = vd_{эк}/\nu_в$);

Pr – Прантдля ($Pr = \frac{\nu_в}{a_в}$); Bi – Био ($Bi = \frac{\alpha d_{эк}}{2\lambda_n}$); F_0 – Фурье

($F_0 = \frac{4a_n\tau}{d^2_{эк}}$); Pd – Предводителева ($Pd = \pi d^2_{эк}/(2\omega a_n)$);

Ki_τ – Кирпичева ($Ki = k_\tau d_{эк}/(2\lambda_n)$); K_0 – Коссовича

($K_0 = wL\rho_{пт}/[C_{пм}\rho_{пм}[T_ф - t]]$);

Массообменные:

Nu_m – Нуссельта ($Nu_m = \beta d_{эк}/\lambda_{m_в}$); Pr_m – Прантдля ($Pr_m = \nu_в/a_{m_в}$);

Bi_m – Био ($Bi_m = \beta d_{эк}/(2\lambda_{m_в})$); Gu – Гухмана ($Gu = (t_{сух} - t_{мок}/(t_{сух} + 273)$); Fo_m Фурье ($Fo_m = \frac{4a_{mn}\tau}{d^2_{эк}}$).

1. ОСНОВНЫЕ ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

1.1. Подземное сооружение (ПС) — полость в земной коре, образуемая в результате осуществления подземных горных работ, и предназначенная для выполнения производственных процессов различного вида, хранения материалов, изделий, оборудования, перемещения людей, грузов и т.д.

1.2. Тепловой режим ПС — совокупность термовлажностных параметров воздушной среды (температура воздуха t, влажность воздуха φ, влагосодержание воздуха x, теплосодержание воздуха i) и окружающего выработки массива горных пород (температура пород T, их влагосодержание w).

1.3. ПС с положительной температурой — подземные сооружения, в которых температура воздушной среды поддерживается выше естественной температуры горных пород или ниже ее, но выше 0° С.

1.4. ПС с отрицательной температурой — подземные сооружения, в которых температура воздушной среды поддерживается ниже 0° С. Среди ПС с отрицательной температурой выделяются объекты небольшого (до -2, -3°С), среднего (до -20, -30° С) и глубокого охлаждения (ниже -30° С).

1.5. Предэксплуатационный период — длительность повышения или понижения температуры воздуха и горных пород в ПС от естественной или какой-либо иной начальной температуры до температуры, заданной технологическими или гигиеническими условиями данного сооружения.

1.6. Эксплуатационный период — длительность функционирования подземного объекта в режиме, характеризующемся постоянно поддерживаемой температурой и влажностью воздуха, а также температурой поверхности горного массива, окружающего подземные выработки.

1.7. Радиус теплового влияния выработки ПС — расстояние от оси выработки до геометрического места точек в горном массиве с температурой, равной естественной температуре пород.

1.8 Коэффициент нестационарного теплообмена k_{τ} — количество тепла, поступающее от горного массива (воздуха) к воздуху (горному массиву) с единицы поверхности выработки при перепаде температур между естественной температурой пород и температурой воздуха в 1° С.

1.9. Коэффициент нестационарного массообмена β_{τ} — количество влаги, поступающее от горного массива (воздуха) к воздуху (горному массиву) с единицы поверхности выработки в единицу времени при разнице между парциальными давлениями пара в 1 МПа.

2. ВЫБОР ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ТЕПЛОВЫХ РАСЧЕТОВ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ

2.1. Температуру, влажность и скорость движения воздуха в выработках ПС следует принимать при наличии специальных технологических требований или условий хранения продукции — по нормам технологического проектирования, а для отдельных складских и автотранспортных объектов — по прил. 1; при отсутствии специальных требований — согласно ГОСТ 12.1.005—76.

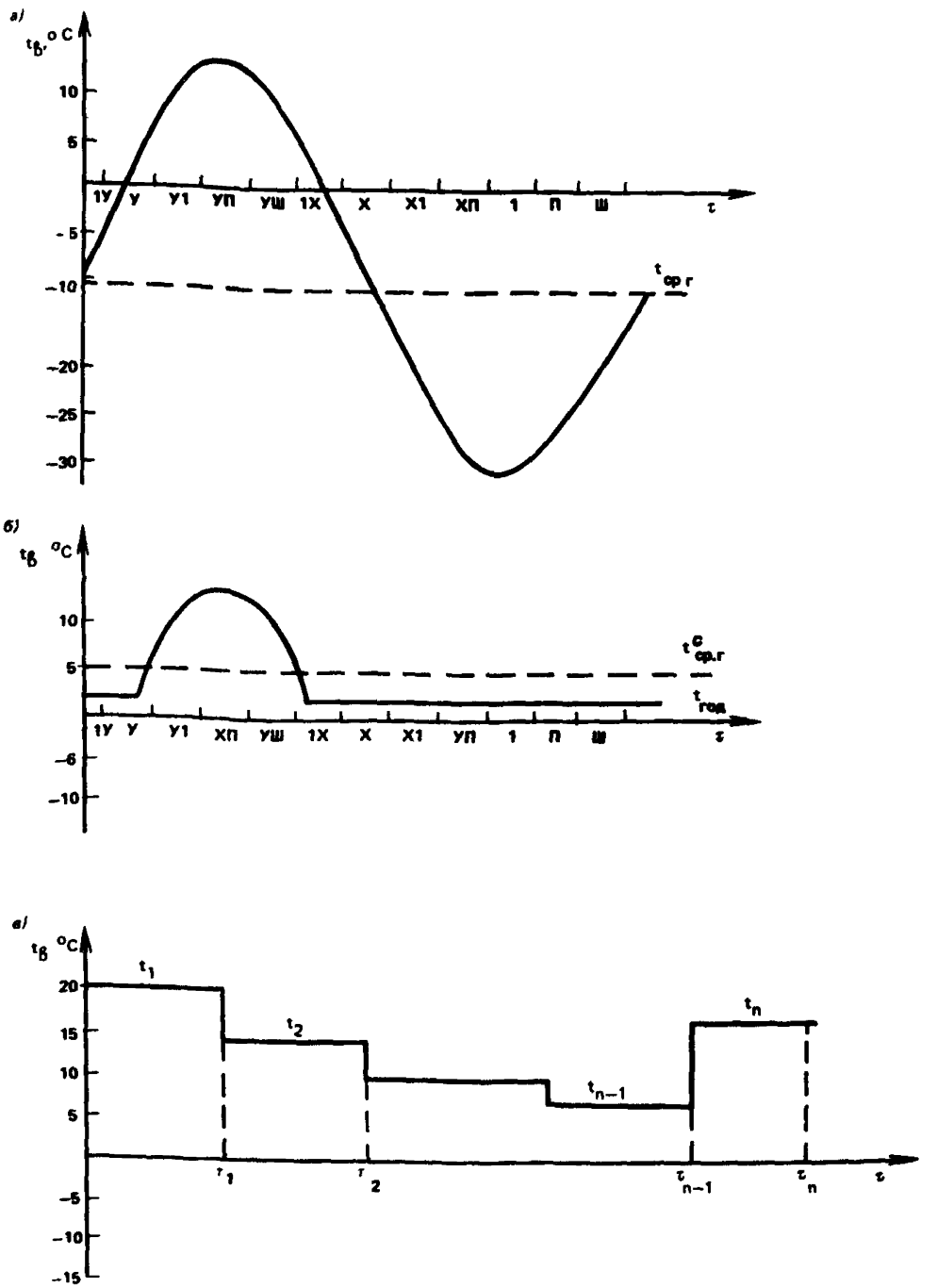


Рис 1. Характер изменения температуры воздуха, поступающего в ПС
а — гармонический закон (изменение температуры атмосферного воздуха); *б* — изменение температуры воздуха при его подогреве до положительной температуры в зимнее время, *в* — ступенчатый закон изменения температуры воздуха

2.2. Расчетные параметры наружного воздуха устанавливаются по климатологическим справочникам и СНиП 2.01.01 –82.

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

2.4. Температура пород, окружающих выработки ПС, определяется по формуле

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

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

2.5. Теплофизические и влагофизические свойства горных пород теплопроводность $\lambda_п$, теплоемкость $c_п$, температуропроводность $a_п$, плотность $\rho_п$, коэффициент диффузии $a_{m_п}$ зависят от их происхождения, условий формирования, литологической характеристики, влажности, температуры, особенностей залегания в земной коре и изменяются в широких пределах: $\lambda_п$ изменяется от 0,2 до 8,2 Вт/(м·°С); $c_п$ – от 0,5 до 1,2 кДж/(кг·°С); $a_п$ – от 10^{-7} до $22{,}5 \cdot 10^{-7}$ м^2/с; $\rho_п$ – от 1100 до 5100 кг/м^3; $a_{m_п}$ – от 10^{-8} до $20 \cdot 10^{-8}$ м^2/с.

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

2.6. Термодинамические свойства воздуха: плотность $\rho_в$, теплоемкость $c_в$, теплопроводность $\lambda_в$, температуропроводность $a_в$, кинематическая вязкость $\nu_в$, парциальные давления насыщенного $P_{нас}$ и ненасыщенного пара $P_{пар}$, концентрация водяного пара насыщенного воздуха $K_{нас}$, концентрация водяного пара ненасыщенного воздуха K, влагосодержание x, удельная теплота парообразования S, энтальпия i устанавливаются в зависимости от температуры t и относительной влажности φ воздуха по данным прил. 3 (табл. 1) и формулам:

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

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

$$K = \varphi K_{нас}; \quad (4)$$

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

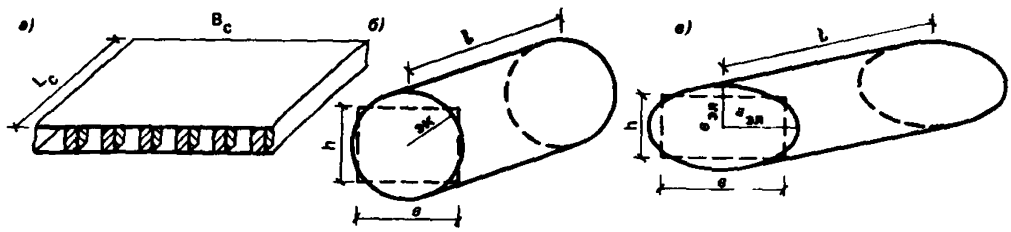


Рис. 2. Геометрические модели формы выработок ПС
а — щелеобразная; *б* — цилиндрическая с сечением круговой формы; *в* — цилиндрическая с сечением эллиптической формы

$$S = 2500 - 2{,}38t\ ; \tag{6}$$

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

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

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

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

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

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

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

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

в случае $\tau \leqslant 0{,}5 r_{эк}^2 / a_п$ — щелеобразной с размерами поперечного сечения, равными ширине и высоте выработки;

в случае $\tau > 0{,}5 r_{эк}^2 / a_п$ и $b/h \leqslant 2$ — цилиндрической с круговой формой поперечного сечения (рис. 2, *б*);

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

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

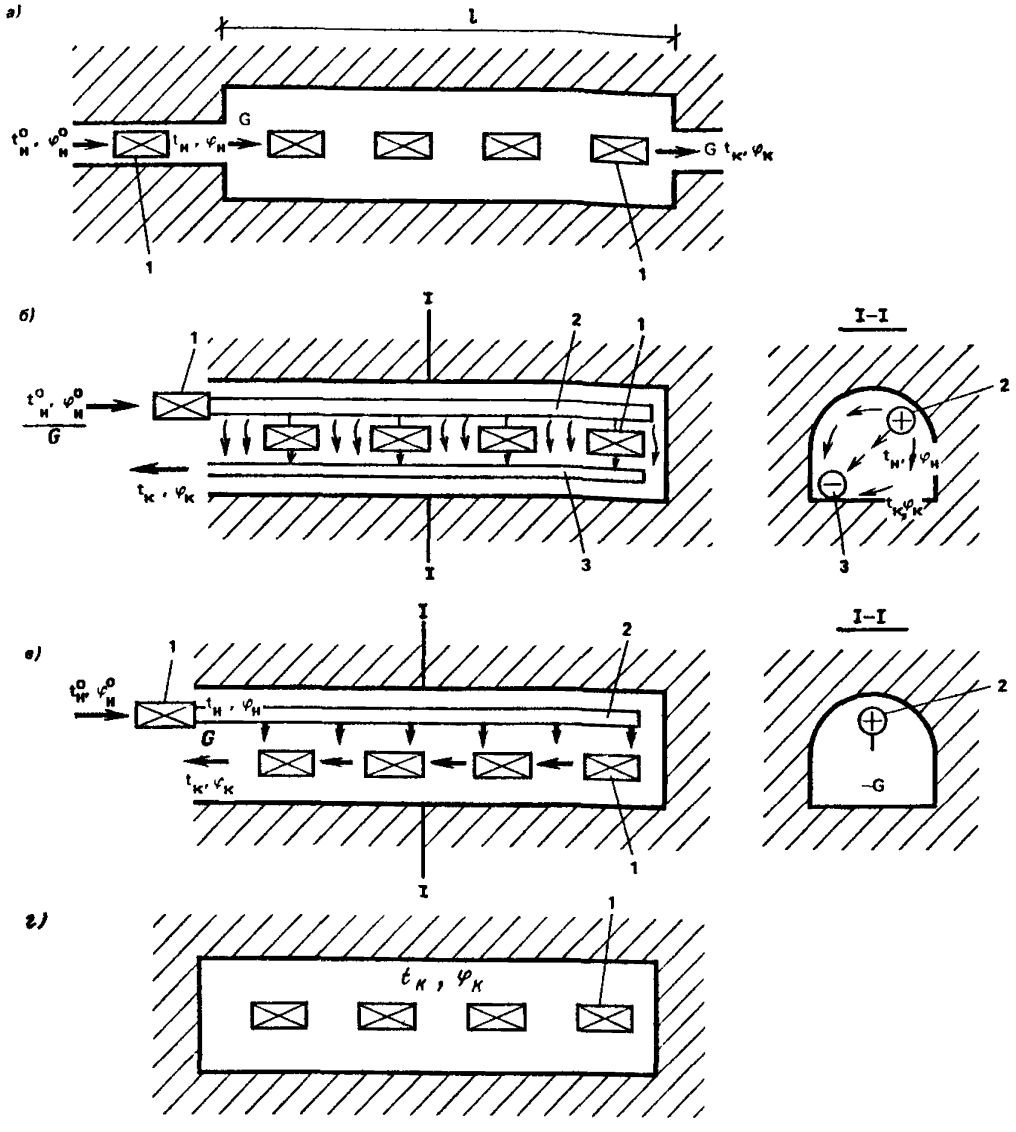


Рис. 3. Расчетные схемы для определения параметров систем регулирования теплового режима ПС

а — продольная схема проветривания; *б* — поперечная схема проветривания; *в* — продольно-поперечная схема проветривания; *г* — отсутствие специально организованной схемы проветривания; *1* — теплотехническое оборудование; *2* — воздуховод для подачи воздуха; *3* — воздуховод для удаления воздуха

2.8. Выбор расчетной схемы при определении продолжительности предэксплуатационного периода и необходимой мощности теплотехнического оборудования осуществляется в зависимости от принятой схемы проветривания и места установки оборудования:

при продольной схеме проветривания и размещении оборудования у устья выработок или равномерно по их длине (рис, 3, *а*);

при поперечной и продольно-поперечной схемах проветривания, использующих систему воздуховодов, установленных в выработках, и размещении оборудования у устья выработок или равномерно по их длине (рис. 3, *б, в*);

при отсутствии специально организованного проветривания и размещении оборудования в выработках ПС (рис. 3, *г*).

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛО- И ВЛАГОВЫДЕЛЕНИЙ ОТ СТАЦИОНАРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

3.1. Тепловыделения от стационарных источников тепла определяются потребляемой $N_{потр}$ или установленной $N_{уст}$ мощностью и зависят от коэффициента полезного действия двигателя η и коэффициента, характеризующего степень их загрузки $k_{загр}$. Величина $k_{загр}$ принимается равной 0,5—0,7.

Тепловыделения при работе электрооборудования рассчитываются по формуле

$$Q_{эл} = m_{эл} N_{пот} \tag{10}$$

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

Тепловыделения при работе насосов составляют:

$$Q_{нас} = (1 - \eta)\, k_{загр} N_{уст} \tag{11}$$

Тепловыделения при работе транспорта на электрической тяге вычисляются по формуле

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

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

Тепловыделение при погрузочно-разгрузочных работах устанавливается:

при погрузочных работах (складирование груза)

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

при разгрузочных работах

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

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

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

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

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

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

Тепловыделения от одновременно работающих в ПС людей составляют:

$$Q_{л} = q_{л} n_{л}\,, \qquad (16)$$

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

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

Решение.

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

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

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

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

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

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

Общее количество теплоты ΣQ будет равно

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

3.2. Влаговыделения от людей, оборудования, хранимых грузов и т.п. в ПС определяются по методикам, используемым для условий аналогичных наземных сооружений (см. СНиП 2.04.05-86), а также ведомственные нормы технологического проектирования).

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТЕПЛО- И МАССООТДАЧИ

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

$$\alpha = 0{,}029\,\epsilon_{ш}\,\lambda_{в} / d_{эк}\,\mathrm{Re}^{0{,}8}, \qquad (17)$$

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

При скорости движения воздуха менее 0,5 м/с коэффициент теплоотдачи следует принимать равным 4–8 Вт/(м$^2 \cdot {}^{o}$C).

4.2. Коэффициент массоотдачи от поверхности горного массива к воздуху вычисляется по формуле

$$\beta_{п} = \bar{\mu}\,\beta_{вод} \qquad (18)$$

где $\bar{\mu}$ – безразмерный параметр, величина которого зависит от типа пород и температуры и приведена в прил. 4 (табл. 2); $\beta_{вод}$ – коэффициент массоотдачи с поверхности чистой воды, рассчитываемый по критериальной зависимости,

$$\mathrm{Nu}_{m_{вод}} = A'\mathrm{Re}^{n'}\mathrm{Pr}_{m_{в}}^{0{,}43}\,\mathrm{Gu}^{0{,}135}\left(\frac{t_{сух}+273}{t_{мок}+273}\right)^{2}, \qquad (19)$$

где значения коэффициентов A' и n' приведены в табл. 1, а величина температуры воздуха по мокрому термометру $t_{мок}$ определяется в зависимости от $t_{сух}$ и относительной влажности воздуха φ по психрометрической диаграмме, приведенной в прил. 4 (рис. 1).

Таблица 1

Пределы изменения критерия Re	A'	n'
$0{,}315 \cdot 10^4$	0,83	0,55
$0{,}315 \cdot 10^4 - 2{,}2 \cdot 10^4$	0,49	0,61
$2{,}2\ 10^4 - 31{,}5 \cdot 10^4$	0,0248	0,90

Для ориентировочной оценки коэффициента массоотдачи от пород, данные о значении параметра $\bar{\mu}$ которых отсутствуют в табл. 2 прил. 4, может быть использована формула

$$\beta_{п} = a \frac{\lambda_{m_в}}{\lambda_в} \qquad (20)$$

4.3. Коэффициенты массоотдачи с поверхности мороженых продуктов $\beta_{прод}$ и льда $\beta_{л}$ следует определять в соответствии с данными табл. 1 прил. 4.

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

5.1. Величину коэффициента нестационарного теплообмена для ПС щелеобразной формы следует вычислять по формуле

$$k_{\tau_{щ}} = a\,[1 - f(z)\,], \qquad (21)$$

где $z = a / \lambda_{п} \sqrt{a_{п} \tau}$, а значения функции f (z) приведены в табл. 2.

Таблица 2

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

При значениях коэффициента теплоотдачи a, превосходящих 30 Вт/(м$^2 \cdot$ °С), для определения $k_{\tau_{щ}}$ рекомендуется использовать формулу

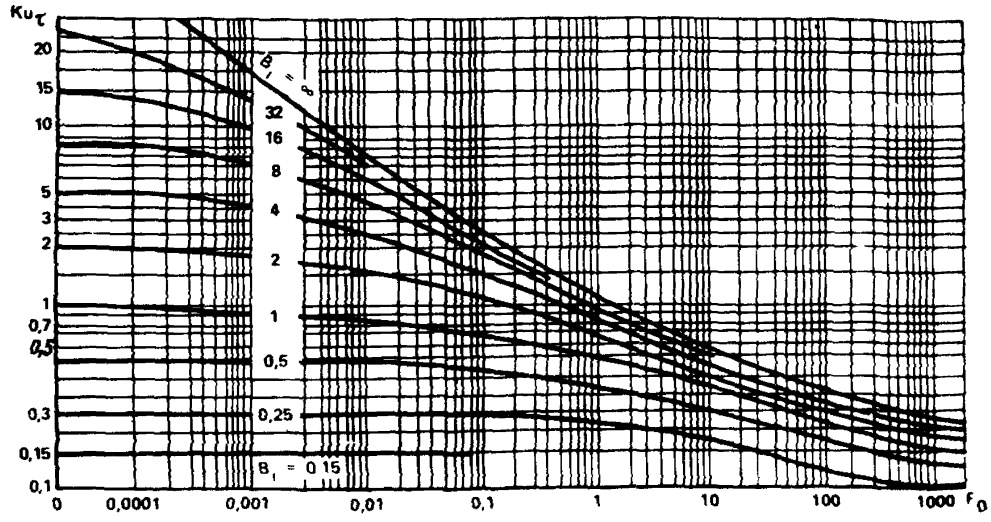


Рис. 4. Номограмма для определения коэффициента нестационарного теплообмена

$$k_{\tau_{щ}} = \lambda_{п} / \sqrt{\pi a_{п} \tau}. \qquad (22)$$

5.2. Для цилиндрической выработки ПС с круговой формой поперечного сечения величину $k_{\tau_{ц}}$ *следует определять по номограмме, приведенной на рис. 4,* или рассчитывать по формулам:

при $\tau \leqslant r^2_{эк} / a_{п}$

$$k_{\tau_{ц}} = a\,[1 - Bi / Bi'\, f(z)]\,; \qquad (23)$$

при $\tau > r^2_{эк} / a_{п}$

$$k_{\tau_{ц}} = \frac{a}{1 + Bi \ln (1 + \sqrt{\tilde{\gamma} F_0}} \qquad (24)$$

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

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

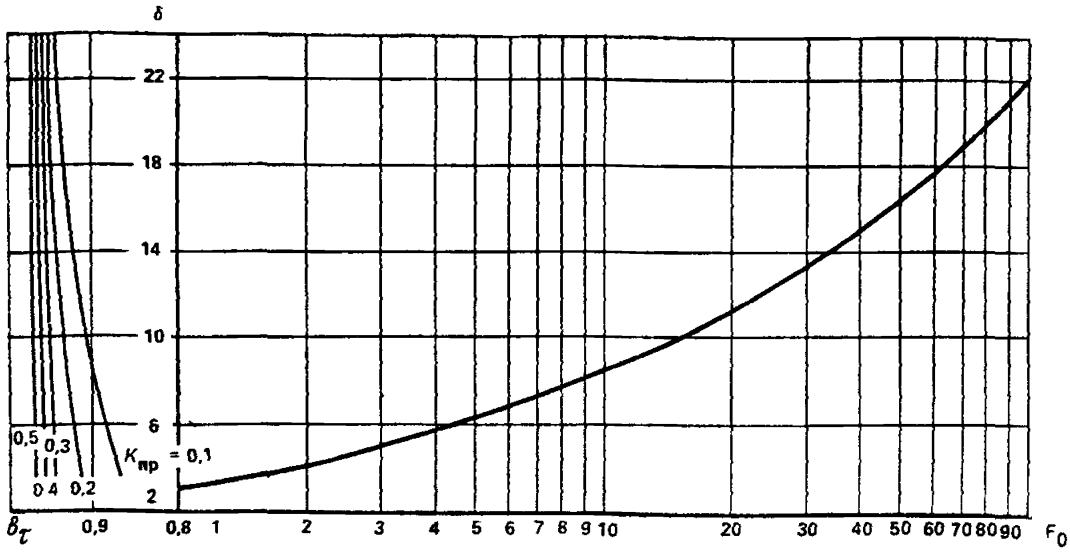


Рис 5. Номограмма для определения поправки к коэффициенту нестационарного теплообмена b_τ, учитывающей отклонение геометрической формы поперечного сечения от круговой

При $\alpha > 30$ Вт/(м$^2 \cdot$ °С) расчет $k_{\tau_ц}$ можно выполнять с использованием зависимости

$$k_{\tau_ц} = \frac{\lambda_п}{r_{эк}} (0{,}375 + 1/\sqrt{\pi F_0}). \qquad (25)$$

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

$$k_{\tau_{эл}} = b_\tau k_{\tau_ц} \qquad (26)$$

где b_τ поправка к коэффициенту нестационарного теплообмена, учитывающая отклонение геометрической формы поперечного сечения от круга с радиусом $r_{эк}$ и определяемая по номограмме на рис. 5 или по формуле

$$b_\tau = \frac{\ln \delta}{\ln\left\{\sqrt{M[1 + 0{,}25N_\delta^2 + 1]} + \sqrt{M[1 + 0{,}25N_\delta^2 - 1]}\right\}}, \qquad (27)$$

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

$k_{пр} = \frac{h}{b}$

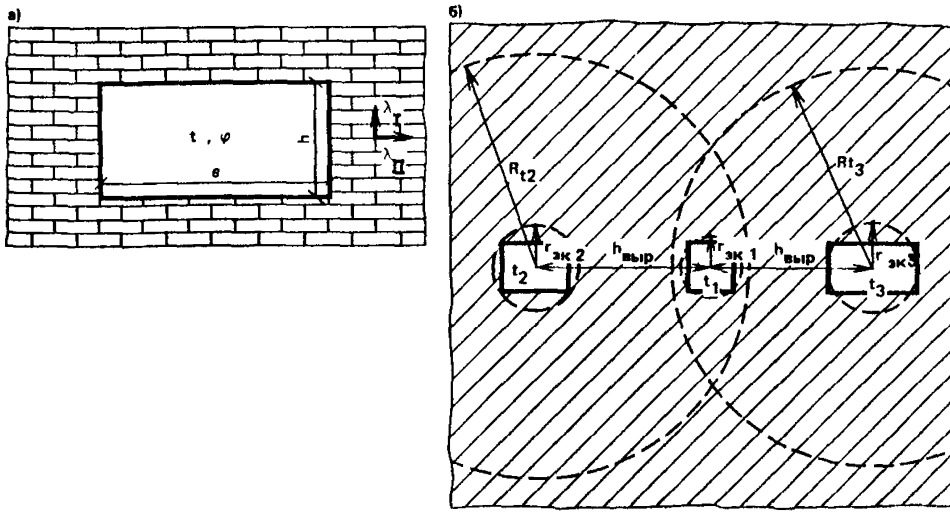


Рис. 6. Расчетные схемы к определению k_τ

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

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

$$\delta = 0{,}837 \ln^{2{,}64} [2{,}72 (1 - \sqrt{\tilde{\gamma} F_0})] \quad \text{при } 1 \leqslant F_0 \leqslant 50; \tag{28}$$

$$\delta = 2{,}72 (1 + \sqrt{\tilde{\gamma} F_0}) \quad \text{при } F_0 > 50. \tag{28а}$$

5.4. Коэффициент нестационарного теплообмена k_τ для выработок ПС, пройденных в породах, имеющих различные значения коэффициентов теплопроводности вдоль напластования λ_{II} и перпендикулярно ему $\lambda_{\perp}$ (рис. 6, *а*) вычисляется по формулам (24) — (26) при

$$r_{эк} = \frac{b}{\pi} \sqrt{\frac{\lambda_{\perp}}{\lambda_{II}}} \left(1 + \frac{h}{b} \sqrt{\frac{\lambda_{II}}{\lambda_{\perp}}}\right); \tag{29}$$

$$k_{пр} = \frac{h}{b} \sqrt{\frac{\lambda_{II}}{\lambda_{\perp}}}, \tag{30}$$

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

5.5. Коэффициент нестационарного теплообмена для каждой выработки ПС, окруженной другими выработками и отстоящей от них на расстояние $h_{выр}$ не боль-

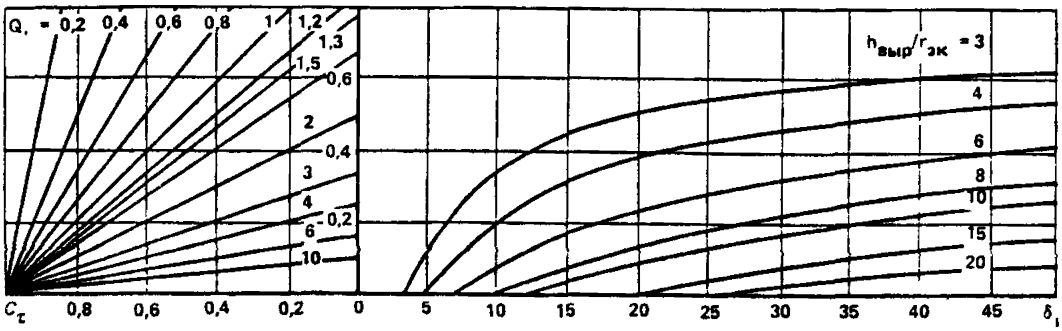


Рис. 7. Номограмма для определения поправки c_τ к коэффициенту нестационарного теплообмена, учитывающему тепловое взаимодействие выработок

ше, чем их радиусы теплового влияния R_{t_i} (рис. 6, *б, г*), т.е. $h_{выр} \leqslant R_{t_i}$, вычисляется по формуле

$$k_{\tau_1} = k'_{\tau_1} c_{\tau_2} c_{\tau_3}, \ldots, c_{\tau_i} = k_{\tau_1} \prod_{i=2}^{n_{выр}} c_{\tau_i}, \qquad (31)$$

где $n_{выр}$ — число взаимодействующих выработок; k'_{τ_1} — рассчитывается по формулам (24) — (30), а величина поправки c_{τ_i}, учитывающей тепловое взаимодействие выработки с температурой t_1 и эквивалентным радиусом $r_{эк\ 1}$ и выработки с температурой t_i и эквивалентным радиусом $r_{эк_i}$, в зоне температурного влияния которой $R_{t_i} = \delta_i / r_{эк_i}$ находится первая выработка, устанавливается при $r_{эк_1} = r_{эк_i}$ с помощью номограммы на рис. 7 или по формуле

$$c_{\tau_i} = 1 - \theta_i \left[1 - \frac{\delta_i \ln \frac{h_{выр}}{r_{эк_i}} - 0{,}637 \left(\frac{h_{выр}}{r_{эк_i}} + \frac{r_{эк_1}}{r_{эк_i}} \right) E(k_1) + 1}{\delta_i \ln \delta_i + 1 - \delta_i} \right], \qquad (32)$$

где $\theta_i = \frac{t_i - T_e}{t_1 - T_e}$, а $E(k_1)$ — полный эллиптический интеграл II рода, определяемый по прил. 5 при $k_1 = 2\sqrt{h_{выр} / r_{эк\ 1}} / \left(\frac{h_{выр}}{r_{эк_1}} + 1 \right)$.

5.6. Уточненный расчет коэффициента нестационарного теплообмена с учетом: наличия в горном массиве нескольких незакрепленных выработок; их реальной геометрической формы; наличия в горном массиве естественного температурного поля, зависящего линейно от геотермического градиента; различия теплопроводности массива вдоль и поперек плоскостей напластования пород (анизотропии массива), зависимости коэффициента теплоотдачи от координат расчетного участ-

ка поверхности выработки может осуществляться с помощью специальной программы (см. Фонд алгоритмов и программ АН УССР, программа инв. № АП-0079 от 24.12.85).

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

$$k_{\tau} = k_{\Sigma\tau} \frac{T_e - t_{ср.г}}{T_e - t} + \Delta k_{\tau} \frac{t_{ср.г} - t}{T_e - t}, \qquad (33)$$

где $k_{\Sigma\tau}$ — вычисляется при полном времени существования ПС по формулам (23) — (32), а Δk_{τ} определяется в зависимости от характера изменения температуры воздуха:

для гармонического закона (рис.1, *а*)

$$\Delta k_{\tau} = \left[0{,}75\,Bi / Bi + 1{,}26\,(Pd)^{0,5}\,(Bi/Bi')^{2}\right] \lambda_{п}/r_{эк} \qquad (34)$$

при подогреве воздуха в зимний период до положительных температур (рис. 1, *б*) $\Delta k_{\tau_{лет}}$ рассчитывается по формуле (23) при значении ω, входящем в число Pd, равным

$$\omega = 8760\,(1 - 0{,}63 \arcsin \frac{t'_{ср.г} - t_{ср.г}}{t_{лет} - t_{ср.г}}), \qquad (35)$$

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

$$t'_{ср.г} = \frac{t_{под}\,\tau_{под} + 0{,}67\,(t_{лет} - t_{под})\,(8760 - \tau_{под})}{8760}. \qquad (36)$$

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

$$\Delta k_{\tau_{зим}} = a \left[1 - \frac{Bi}{Bi} f(z_{зим})\right], \qquad (37)$$

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

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

$$k_\tau = k'_\tau \frac{T_e - t_1}{T_e - t_n} + k''_\tau \frac{t_1 - t_2}{T_e - t_n} + \ldots + k^{(n)}_\tau \frac{t_{n-1} - t_n}{T_e - t_n}, \qquad (38)$$

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

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

Решение.

1. Находим числа подобия Bi, Bi′ и Pd

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

По формуле (34) вычисляем величину Δk_τ

$$\Delta k_\tau = \left[0{,}75 \frac{7{,}92}{8{,}3} + 1{,}26\,(0{,}857)^{0{,}5} \left(\frac{7{,}92}{8{,}3}\right)^2\right] \frac{2{,}02}{2} =$$

$$= 1{,}72 \text{ Вт/(м}^2 \cdot {}^\circ\text{С)}.$$

Используя формулу (33) получим значения k_τ для летнего и зимнего периодов:

$$k_{\tau_{лет}} = 0{,}3 \frac{12 - 3{,}6}{12 - 17{,}6} + 1{,}78 \frac{3{,}6 - 17{,}6}{12 - 17{,}6} = 4 \text{ Вт/(м}^2 \cdot {}^\circ\text{С)};$$

$$k_{\tau_{зим}} = 0{,}3 \frac{12 - 3{,}6}{12 + 10{,}4} + 1{,}78 \frac{3{,}6 + 10{,}4}{12 + 10{,}4} = 1{,}23 \text{ Вт/(м}^2 \cdot {}^\circ\text{С)}.$$

2. При подогреве воздуха в зимнее время в течение 5 месяцев (3600 ч) до $+2^\circ$С для определения $\Delta k_{\tau_{лет}}$, вычисляем по формулам (36), (35) $t'_{ср.г}$ и ω

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

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

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

Используя формулу (34) получим:

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

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

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

и $\varphi(11{,}2) = 0{,}95$ (см. табл. 2).

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

Значения $k_{\tau_{лет}}$ и $k_{\tau_{зим}}$ вычислим по формуле (33):

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

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

5.8. Коэффициент нестационарного теплообмена в ПС с отрицательной температурой воздуха (начальная температура пород положительна) следует определять путем умножения коэффициента нестационарного теплообмена, вычисленного по формулам (21) – (34), на коэффициент интенсификации теплообмена при агрегатных переходах влаги $k_{агр}$.

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

$$k_{агр\,щ} = \frac{1}{(1 + k_{т})\,\mathrm{erf}\,k_{\beta}}, \qquad (39)$$

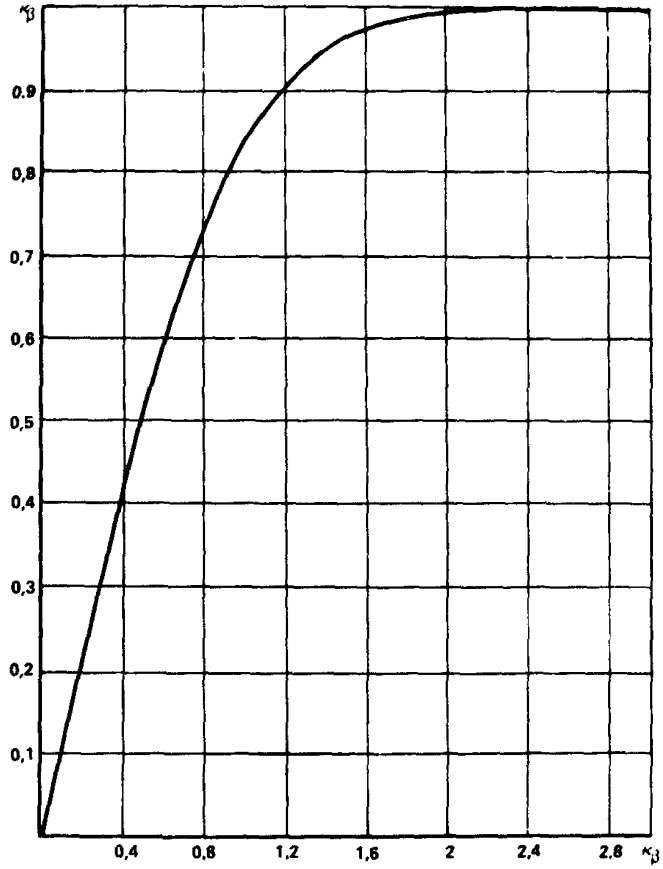


Рис. 8. График зависимости интеграла вероятности, erf, от параметра k_β

где

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

$$k_\beta = \beta_{пр}/2\sqrt{a_{пм}};\quad k_\epsilon = \sqrt{\frac{\lambda_{пт} c_{пт} \rho_{пт}}{\lambda_{пм} c_{пм} \rho_{пм}}};\quad k_т = \frac{T_е - T_ф}{T_ф - t_{ср}};$$

$$k_a = \frac{a_{пт}}{a_{пм}};$$

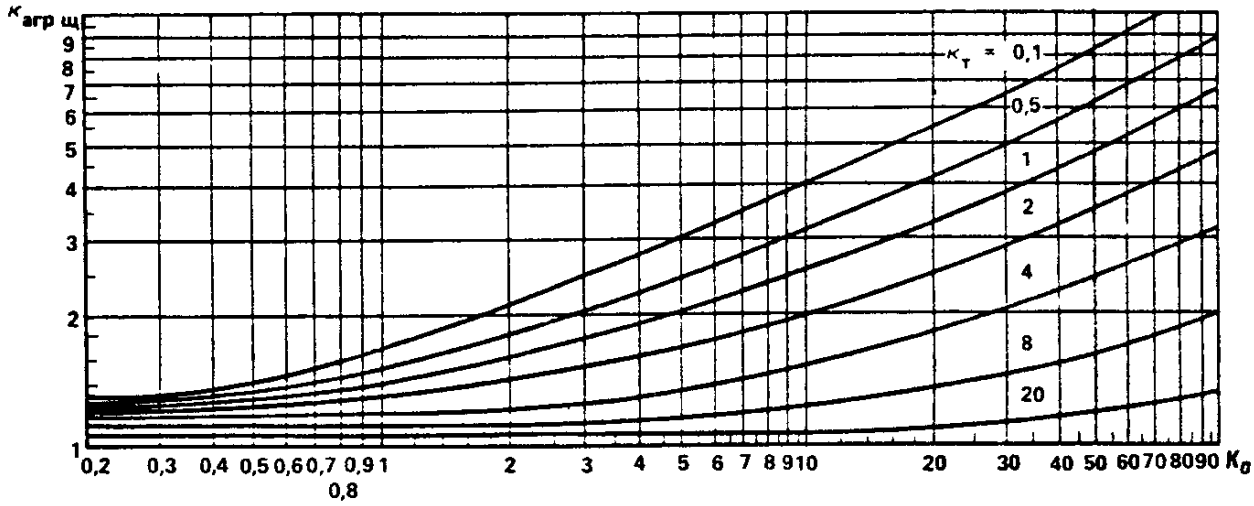


Рис. 9. Номограмма для определения коэффициента $k_{агр\ щ}$

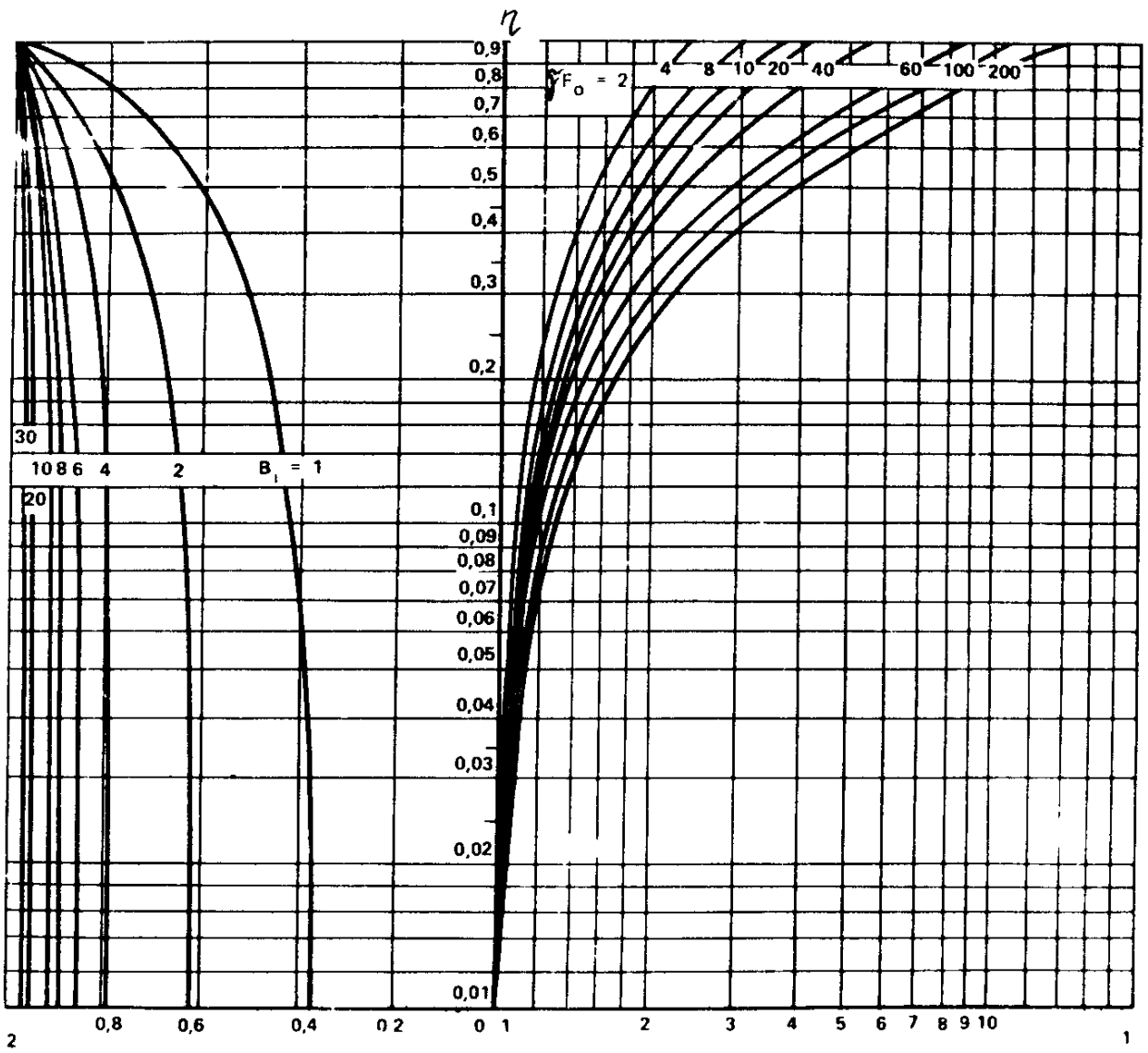


Рис. 10. Номограмма для вычисления параметров ζ_1 и ζ_2

$\beta_{пр}$ — коэффициент пропорциональности, характеризующий скорость движения зоны промерзания, м/$\sqrt{с}$; $t_{ср}$ — средняя за расчетный период температура воздуха в выработках ПС; erf k_{β} — интеграл вероятности, значения которого приведены на рис. 8.

При $k_а = k_{\epsilon} = 1$ значения $k_{агр.щ}$ определяются по номограмме,представленной на рис. 9.

Глубина промерзания $R_{пр}$ при этом составляет

$$R_{пр} = \beta_{пр}\sqrt{\tau}. \qquad (40)$$

Для условий цилиндрической выработки с круговой формой поперечного сечения $k_{агр.ц}$ следует рассчитывать по формуле

$$k_{агр\ ц} = 1 + \frac{k_{агр\ щ} - 1}{1 + 0{,}5\sqrt{F_0}}. \qquad (41)$$

Глубина промерзания пород вокруг выработки устанавливается по зависимости

$$\xi = \frac{R_{пр}}{r_{эк}} = \zeta_1 \zeta_2, \qquad (42)$$

где величины $\zeta_1 = (1 + \sqrt{\widetilde{\gamma} F_0})\ \eta_т$; $\zeta_2 = \exp\left[-\frac{1}{Bi}(1 - \eta_т)\right]$

определяются по номограмме, приведенной на рис. 10, при $\eta_т = \frac{1}{(1 + k_т)\, k_{агр\ ц}}$

Величина безразмерного радиуса теплового влияния выработки рассчитывается по формуле

$$\delta = R_t / r_{эк} = \xi F\left(-\lambda_{пм}/\lambda_{пт}\ T_e/t_{ср}\right), \qquad (43)$$

где значения функции F определяются в зависимости от параметра $(-\lambda_{пм}/\lambda_{пт} \times T_e/t_{ср})$ по графику на рис. 11.

Коэффициент нестационарного теплообмена для выработок с поперечным сечением эллиптической формы вычисляется как произведение величин k_{τ}, $k_{агр\ ц}$ и b_{τ}, рассчитанных по формулам (24), (41) и (27). Причем значение радиуса теплового влияния в формуле (27) находится из соотношения (43).

Коэффициент нестационарного теплообмена для выработок, пройденных в породах с отличающимися коэффициентами теплопроводности вдоль напластования $\lambda_{\parallel}$ и перпендикулярно ему $\lambda_{\perp}$, следует определять как произведение k_{τ} и $k_{агр\ ц}$, вычисленных по формулам (24) и (41) с учетом зависимостей (29), (30) и

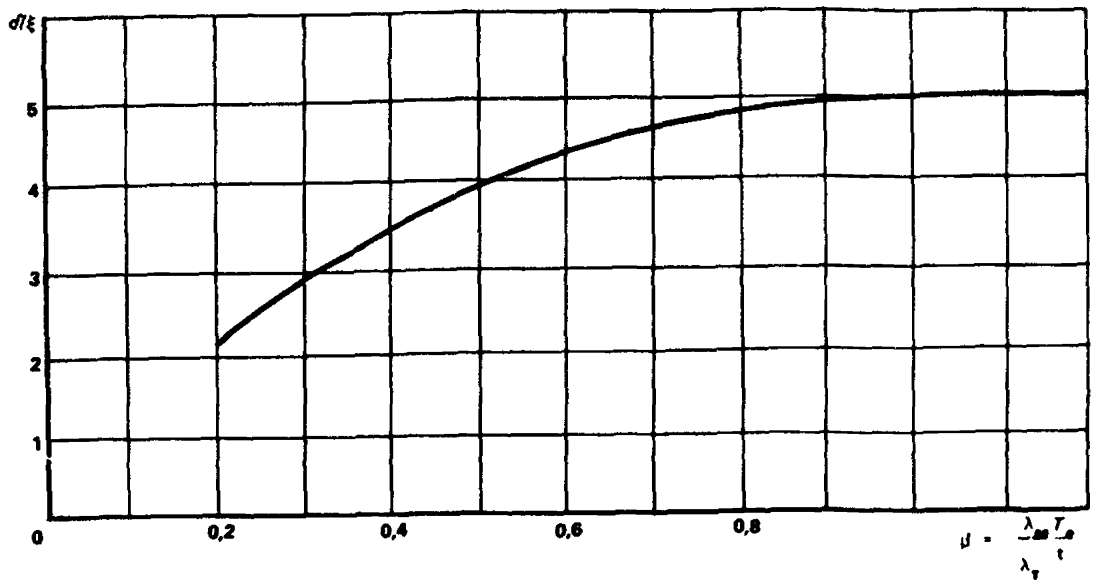


Рис. 11. График для определения отношения δ / ξ в зависимости от параметра $(-\lambda_{пм} / \lambda_{пт} T_e / t_{ср})$

величины b_τ, рассчитанной по формуле (27) при значении радиуса теплового влияния δ, установленного с использованием зависимости (43).

Коэффициент нестационарного теплообмена для выработки в случае ее теплового взаимодействия с другими выработками, находящимися от нее на расстоянии $h_{выр} \leqslant R_{t_i}$ определяется аналогично п. 5.5 при значении δ_i, вычисленном по соотношению (43).

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

Решение.

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

Вычислим числа подобия Bi, F_0 при $r_{эк} = 3{,}5$ м

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

Находим по формуле (24) коэффициент нестационарного теплообмена $k_{\tau_ц}$ для цилиндрической выработки кругового сечения ($\tilde{\gamma} = 2{,}9$)

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

Вычислим для каждой выработки значения чисел подобия K_0 и k_τ

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

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

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

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

По номограмме на рис. 9 определим для каждой выработки величины $k_{arp_ш}$:

$$k_{arp_{ш_1}} = 1{,}4; \quad k_{arp_{ш_2}} = 1{,}2; \quad k_{arp_{ш_3}} = 1{,}4; \quad k_{arp_{ш_4}} = 1{,}3.$$

По формуле (41) вычислим $k_{arp_ц}$:

$$k_{arp_{ц_1}} = 1 + \frac{1{,}4 - 1}{1 + 0{,}5\sqrt{27{,}3}} = 1{,}1; \quad k_{arp_{ц_2}} = 1{,}05;$$

$$k_{arp_{ц_3}} = 1{,}1; \quad k_{arp_{ц_4}} = 1{,}07.$$

Используя номограмму рис. 10 и формулу (42), получим величины глубин промерзания пород вокруг каждой выработки ξ:

$$\eta_{T_1} = \frac{1}{(1+0{,}67)\ 1{,}1} = 0{,}54\ ;\quad \zeta_1 = 2{,}8\ ;\quad \zeta_2 = 0{,}95\ ;\quad \xi_1 = 2{,}66$$

$$\eta_{T_2} = \frac{1}{(1+10)\ 1{,}05} = 0{,}087\ ;\quad \zeta_1 = 1{,}15;\quad \zeta_2 = 0{,}91;\quad \xi_2 = 1{,}04;$$

$$\eta_{T_3} = \frac{1}{(1+2)\ 1{,}1} = 0{,}303;\quad \zeta_1 = 1{,}78;\quad \zeta_2 = 0{,}93;\quad \xi_3 = 1{,}66\ ;$$

$$\eta_{T_4} = \frac{1}{(1+0{,}4)\ 1{,}07} = 0{,}67;\quad \zeta_1 = 3{,}6;\quad \zeta_2 = 0{,}97;\quad \xi_4 = 3{,}5\ .$$

По графику рис. 11 определим величину соотношения $\frac{\delta}{\xi}$ по формуле (43) вычислим радиус теплового влияния каждой выработки:

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

По номограмме рис. 5 при $k_{пр} = \frac{3}{10} = 0{,}3$ и $\delta_1 = 12$ определим поправку b_τ к коэффициенту нестационарного теплообмена. Получим $b_\tau = 0{,}96$.

По номограмме на рис. 7 вычислим поправки c_τ, учитывающие тепловое взаимодействие выработок:

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

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

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

Окончательно для k_τ получим:

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

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

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

5.10. Коэффициент нестационарного массообмена β_{τ} при известных температуре поверхности пород $T_{пов}$, их начальном влагосодержании $w_п$, а также температуре t и относительной влажности φ воздуха определяется по зависимости

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

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

Коэффициент массобмена β'_{τ} для выработок ПС с щелеобразной, круговой и эллиптической формой поперечного сечения, а также в условиях взаимного влияния выработок друг на друга ориентировочно определяется по формулам (21), (23), (26), (31), (32) при замене в них коэффициентов теплопроводности $\lambda_п$ и температуропроводности $a_п$ на коэффициент диффузии $a_{m_п}$ и коэффициента теплоотдачи α на коэффициент массоотдачи $\beta'_п$ равный

$$\beta'_п = 0{,}126\beta_п, \qquad (46)$$

где $\beta_п$ — рассчитывается по формулам (18), (19) или (20).

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

Решение.

На основании данных расчетов, выполненных в примере раздела 4.1, величина коэффициента массоотдачи от пород к воздуху равна $\beta_п$ = 0,023 кг/(м^2·с·МПа). По данным прил. 2 (табл. 2 и рисунок) плотный известняк имеет следующие значения теплофизических и влагофизических свойств: плотность 2500 кг/м^3; теплоемкость 0,92·10^3 Дж/(кг·°С); теплопроводность 2,7 Вт/(м·°С); температуропроводность 11,7·10^{-7} м^2/с; коэффициент диффузии 0,1·10^{-8} м^2/с.

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

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

Тогда по формуле (24) при $\widetilde{\gamma} = 2{,}6$

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

Температуру поверхности пород вычислим по формуле (44)

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

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

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

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

По формуле (25) вычислим β'_τ

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

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

Окончательно по формуле (45) получим

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

При нанесении на поверхность выработок ПС пароизоляционных покрытий величина β_τ не будет превосходить значений, приведенных в табл. 3.

5.11. Коэффициенты теплопередачи через целики и перемычки, отделяющие рабочие пространства ПС (пространство, в котором поддерживаются заданные термовлажностные параметры воздуха) от смежных и подсобных помещений, следует вычислять с использованием формул:

Таблица 3

Покрытие	Толщина покрытия, м	Значение $\beta_\tau \cdot 10^3$ кг/(м^2·с·МПа)
ЛПС-145-3	0,0008	0,3
Торкретбетон с пиритными огарками	0,01	1,5
	0,02	0,4
Цементно-карбонатное	0,02	0,0008
ЛПС-901	2	0,17

$$k_{цел} = \frac{\xi_{цел}}{2/\alpha + b_{цел}/\lambda_п}; \quad (47)$$

$$k_{пер} = \frac{1}{2/\alpha + b_{пер}/\lambda_{пер} + \delta_{из}/\lambda_{из}}, \quad (48)$$

где $b_{цел}$, $b_{пер}$ — соответственно ширина целиков и толщина перемычек, м; $\lambda_{пер}$ $\lambda_{из}$ — теплопроводность материала, из которого изготовлены перемычки, и нанесенного на них теплоизоляционного материала, Вт/(м^2·°С); $\xi_{цел}$ — поправочный коэффициент, величина которого зависит от отношения ширины целика $b_{цел}$ и высоты выработки h и при значениях $b_{цел}/h$, равных 1; 2; 4, соответственно составляет 1,3; 1,5; 1,8.

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

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

где коэффициенты теплоотдачи от воздуха внутри вентиляционного трубопровода к его стенке α_1 и от стенки к воздуху в выработке определяются по формуле (17); $\epsilon_ш$ для стальных трубопроводов составляет 1, а для прорезиненных в зависимости от диаметра $d_{в.тр}$ находится по соотношению $\epsilon_ш = 2{,}4 - 0{,}8\,d_{в.тр}$. При проветривании выработок ПС охлажденным воздухом величину α_2 следует умножить на коэффициент $\zeta_{кон}$, учитывающий интенсификацию теплообмена при конденсации влаги на наружной поверхности вентиляционного трубопровода и определяемый по соотношению $\zeta_{кон} = 1 + I^{-0,15}$.

6. ТЕПЛОВЫЕ РАСЧЕТЫ ВЫРАБОТОК ПС ПРИ ПРОДОЛЬНОЙ СХЕМЕ ПРОВЕТРИВАНИЯ

Продолжительность предэксплуатационного периода

6.1. Для ПС с положительной температурой устанавливается по формуле

$$\tau_{п.эк} = \frac{3{,}7\cdot 10^{-6}\,\lambda_п^2 U_{выр}^2 l^2}{a_п G_в^2 c_{эф}^2 \ln^2 [(t_н - T_е)/(t_к - T_е)]}\ c\ ; \qquad (50)$$

$c_{эф}$ — эффективная теплоемкость воздуха, рассчитываемая по формуле

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

где $n'_{апр}$ — коэффициент, значения которого в зависимости от ожидаемого интервала изменения температуры воздуха в выработке устанавливаются по данным прил. 6 (табл. 1).

Средняя влажность воздуха в выработке ПС определяется по формуле

$$\varphi_{ср} = \frac{0{,}5\varphi_н + 0{,}8 x_н \dfrac{B}{P_{нас}(t_к)} + 0{,}8\beta_п B U_{выр} l \dfrac{P_{нас}(T_{пов.ср})}{G_в P_{нас}(t_к)}}{1 + 0{,}8\beta_п B U_{выр} l \dfrac{P_{нас}(t_{ср})}{G_в P_{нас}(t_к)}}\ ; \qquad (52)$$

$$\varphi_к = 2\varphi_{ср} - \varphi_н\ , \qquad (53)$$

где $P_{нас}(t_к)$ $P_{нас}(t_{ср})$ и $P_{нас}(T_{пов.ср})$ вычисляются при значениях температур $t_к$, $t_{ср}$, $T_{пов.ср}$ а $t_{ср} = 0{,}5(t_н + t_к)$, $T_{пов.ср} = 0{,}5(T_{пов.н} + T_{пов.к})$.

Определение величины $\tau_{п.эк}$ следует осуществлять в следующей последовательности: по формулам (52), (53) при заданном $G_в$ находятся средняя влажность воздуха $\varphi_{ср}$ в выработке и влажность, которую имеет воздух на выходе из выработки $\varphi_к$, при этом принимается, что амплитуда изменения влажности не должна превышать $\Delta\varphi$, т.е. $|\varphi_к - \varphi_н| \leqslant \Delta\varphi$; по соотношению (51) устанавливается значение эффективной теплоемкости воздуха $c_{эф}$; по зависимости (50) вычисляется $\tau_{п.эк}$, при этом принимается, что разница между температурами $t_к$ и $t_н$ в ПС не должна быть больше некоторого заданного значения Δt, т.е. $|t_к - t_н| \leqslant \Delta t$.

Продолжительность предэксплуатационного периода для ПС с отрицательной температурой устанавливается в результате умножения величины $\tau_{п.эк}$, вычисленной по формуле (50), на квадрат коэффициента интенсификации теплообмена $k_{агр\ щ}$, определенного с использованием зависимости (39).

6.2. При установке теплотехнического оборудования у устья выработок ПС его производительность $Q_{об}$ следует определять по формуле

$$Q_{об} = G_в (i^o_н - i_н) , \qquad (54)$$

где $i^o_н$ и $i_н$ — устанавливаются при формуле (7), при температуре и влажности подаваемого воздуха перед оборудованием и требуемых температуре и влажности воздуха в выработке $t_н$ и $\varphi_н$ (см. рис.3, *а*).

$$t_н = t_к \exp\left(\frac{k_т U_{выр} l}{c_{эф} G_в}\right) + \left(T_е + \frac{Q_{абс}}{k_т U_{выр} l}\right) \left[1 - \exp\left(\frac{k_т U_{выр} l}{c_{эф} G_в}\right)\right] ; \qquad (55)$$

$$\varphi_к = 2\varphi_{ср} - \varphi_н ; \qquad (56)$$

$$\varphi_{ср} = \frac{0{,}5\varphi_н + 0{,}8 x_н \dfrac{B}{P_{нас}(t_к)} + 0{,}8\beta_т B U_{выр} l \dfrac{P_{нас}(T_{пов.ср})}{G_в P_{нас}(t_к)} + 0{,}8B\dfrac{\Sigma j}{G_в P_{нас}(t_к)}}{1 + 0{,}8\beta_т B U_{выр} l \dfrac{P_{нас}/(t_{ср})}{G_в P_{нас}(t_к)}} , \qquad (57)$$

где Σj — суммарные влаговыделения от работающих людей $j_д$, оборудования $j_{об}$ и грузов $j_{гр}$, размещаемых в выработках ПС; $Q_{абс}$ — количество теплоты, выделяемое машинами, стационарными источниками тепловыделений и работающими механизмами $Q_{мех}$; выделяемое (теряемое) в ходе технологических процессов $Q_{техн}$; теряемое через целики $Q_{цел}$ и перемычки $Q_{пер}$.

$$Q_{абс} = Q_{мех} + Q_{техн} + Q_{цел} + Q_{пер} , \qquad (58)$$

где величины $Q_{цел}$ и $Q_{пер}$ рассчитываются по формулам:

$$Q_{цел} = k_{цел} F_{цел} (t_{окр} - t) ; \qquad (59)$$

$$Q_{пер} = k_{пер} F_{пер} (t_{окр} - t) , \qquad (60)$$

где $k_{цел}$ и $k_{пер}$ — коэффициенты теплопередачи от воздуха с температурой t в выработках ПС, используемых для хранения продуктов и осуществления производственных процессов, к воздуху в подсобных и смежных помещениях с температурой $t_{окр}$, определяемые по формулам (47) — (48); $F_{цел}$ и $F_{пер}$ — поверхности целиков и перемычек по границам контакта воздуха с температурами t и $t_{окр}$.

Расчет величины $Q_{об}$ следует осуществлять в следующей последовательности: при заданных $\varphi_н$ и $t_к$ и амплитудах изменения относительной влажности $\Delta\varphi$ и температуры Δt по длине выработки по формулам (57), (56), (55) устанавливаются значения $\varphi_к$ и $t_н$ находится расход воздуха $G_в$, при котором выполняются соотношения $|\varphi_к - \varphi_н| \leqslant \Delta\varphi$; $|t_к - t_н| \leqslant \Delta t$; при влажности $\varphi_н$ и температуре $t_н$ рассчитывается $I_н$; по формуле (54) определяется $Q_{об}$

Коэффициент нестационарного теплообмена k_τ в зависимости (55) для ПС с положительной температурой вычисляется по формулам (21) – (32), а для ПС с отрицательной температурой – по формулам (39) – (43).

6.3. При установке теплотехнического оборудования непосредственно в выработках ПС его производительность следует рассчитывать по формуле

$$Q_{об} = Q_{абс} - k_\tau U_{выр} l \left[T_e - \frac{t_к - t_н \exp\left(\frac{k_\tau U_{выр} l}{G_в c_{эф}}\right)}{1 - \exp\left(\frac{k_\tau U_{выр} l}{G_в c_{эф}}\right)} \right], \qquad (61)$$

где $c_{эф}$ вычисляется по формуле (51), а $\varphi_{ср}$ – по формуле (57). Последовательность определения $Q_{об}$ при этом аналогична п.6.2, т.е. вначале рассчитывается значение $G_в$, обеспечивающее заданный уровень относительной влажности в выработке, а затем находится величина $Q_{об}$. Коэффициент нестационарного теплообмена k_τ устанавливается в зависимости от знака температуры воздуха в ПС по формулам (21) – (43).

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

$$l_{ак} = \frac{1}{A_{ак}} \ln \frac{t_н - 0{,}5(T_e - 2 + t_{ср.г}) - B_{ак}/A_{ак}}{t_{к.тр} - 0{,}5(T_e - 2 - t_{ср.г}) - B_{ак}/A_{ак}}, \qquad (62)$$

где $t_{к.тр}$ – требуемая температура воздуха в конце теплоаккумулирующей выработки, °С

$$A_{ак} = \frac{k_{агр_ц} \Delta k_\tau U_{выр}}{c_{эф} G_в}; \qquad (63)$$

$$B_{ак} = \frac{0{,}5 k_{\Sigma\tau} U_{выр} (T_e + 2 - t_{ср.г})}{G_в c_{эф}}. \qquad (64)$$

Уточненный расчет длины теплоаккумулирующих выработок следует осуществлять с использованием формулы

$$t_к = t_н \exp\left(-\frac{k_\tau U_{выр} l}{c_{эф} G_в}\right) + \left(T_е + \frac{Q_{абс}}{k_\tau U_{выр} l}\right)\left[1 - \exp\left(-\frac{k_\tau U_{выр} l}{c_{эф} G_в}\right)\right]. \quad (65)$$

Вычисления по формуле (65) выполняются в два этапа: на первом устанавливается некоторое условное среднегодовое распределение температуры воздуха по длине вентиляционного пути; на втором – по найденным среднегодовым температурам с использованием формул (33) – (34) определяются сезонные значения коэффициентов нестационарного теплообмена, а затем рассчитываются распределения температур по длине выработки. С целью повышения точности расчеты следует производить последовательно для участков длиной 200–500 м. Необходимая длина теплоаккумулирующей выработки устанавливается по расстоянию, на котором значение температуры будет равно заданному $t_{к.тр}$. Если в качестве теплоаккумулирующей выработки служат стволы (или другие наклонные выработки), то определение их длины осуществляется аналогично вышесказанному с использованием зависимости

$$t_к = N + \sqrt{N^2 + D\left[t_н - A(T_{ср} - 0{,}5t_н) \pm \frac{9{,}8\cdot 10^{-3} l \sin\psi}{c_в} - \frac{Q_{абс}}{G_в c_в}\right] - \frac{m'_{апр}}{l'_{апр}} + \frac{10^{-3} x_{нас.н}}{l'_{апр}} \frac{\varphi_н}{\varphi_к}}, \quad (66)$$

где параметры A, N и D рассчитываются по формулам:

$$A = \frac{k_\tau U_{выр} l}{G_в c_в}; \quad (67)$$

$$D = \frac{c_в}{S l'_{апр}}; \quad (68)$$

$$N = -0{,}5D\left[1 + \frac{S k'_{апр}}{c_в}\varphi_н + 0{,}5A\right] \quad (69)$$

а средняя температура пород $T_{ср}$ устанавливается по соотношению $T_{ср} = T_{н.с} + 0{,}5\sigma(H - H_{н.с})$. Знак "+" перед слагаемым $9{,}8\cdot 10^{-3} l \sin\psi / c_в$ в формуле (66) относится к случаю нисходящего движения вентиляционной струи, знак "–" – к восходящему движению. Коэффициенты $k'_{апр}$, $m'_{апр}$, $l'_{апр}$ устанавливаются по данным табл. 2 прил. 6.

Влажность $\varphi_к$ определяется по формулам (56), (57).

7. ТЕПЛОВЫЕ РАСЧЕТЫ ВЫРАБОТОК ПС ПРИ ПОПЕРЕЧНОЙ И ПРОДОЛЬНО-ПОПЕРЕЧНОЙ СХЕМАХ ПРОВЕТРИВАНИЯ

7.1. Вычисление продолжительности предэксплуатационного периода осуществляется:

при поперечной схеме проветривания по формуле

$$\tau_{п.эк} = \frac{9{,}25 \cdot 10^{-7} \lambda_п^2 U_{выр}^2 l^2}{a_п G_в^2 c_{эф}} \Lambda^2, \text{ сут}; \qquad (70)$$

где $\Lambda = \frac{T_e - t_н}{t_к - t_н} + \frac{T_e - t_к}{t_к - t_н}$, а величины $c_{эф}$, $\varphi_{ср}$, $\varphi_к$ определяются аналогично п. 6.1;

при продольно-поперечной схеме проветривания с использованием зависимости (50) при расходе воздуха составляющем $0{,}5G_в$. При вычислении $\tau_{п.эк}$ величины $c_{эф}$, $\varphi_{ср}$, $\varphi_к$ определяются также аналогично п. 6.1 при расходе воздуха, составляющем $0{,}5G_в$.

7.2. Производительность теплотехнического оборудования, располагаемого у устья выработок ПС, устанавливается по формуле (54), в которой энтальпия $i_н$ определяется при влажности $\varphi_н$ и температуре $t_н$, рассчитываемой:

при поперечной схеме проветривания по формуле

$$t_н = \frac{1 + 0{,}5M}{1 - 0{,}5M} t_к - \frac{M T_e + \frac{Q_{абс}}{G_в c_{эф}}}{1 - 0{,}5M}, \qquad (71)$$

где параметр $M = \frac{k_т U_{выр} l}{G_в c_{эф}}$, $c_{эф}$ находится по формуле (51), а $\varphi_{ср}$ – по формуле (57); при продольно-поперечной схеме проветривания в соответствии с зависимостью

$$t_н = T_e + \frac{Q_{абс}}{k_т U_{выр} l} + \frac{(t_к - T_e - \frac{Q_{абс}}{k_т U_{выр} l})(R_1 - R_2)}{\left(1 + 0{,}5 \frac{G_в c_в}{k_{в.тр} U_{в.тр}} r_2\right) R_1 - \left(1 + 0{,}5 \frac{G_в c_в}{k_{в.тр} U_{в.тр}}\right) R_2} \qquad (72)$$

где $R_1 = r_1 \exp(r_1 l)$; $R_2 = r_2 \exp(r_2 l)$, а r_1, r_2 равны:

$$r_1 = 0{,}5П + \sqrt{0{,}25П^2 + E}; \quad r_2 = 0{,}5П - \sqrt{0{,}25П^2 + E} \qquad (73)$$

Параметры П и Е рассчитываются по формулам:

$$П = \frac{2}{G_в}\left(\frac{k_т U_{выр} l + k_{в.тр} U_{в.тр} l + G_в c_в}{c_{эф} l} - \frac{k_{в.тр} U_{в.тр}}{c_в}\right); \quad (74)$$

$$E = \frac{k_т U_{выр} k_{в.тр} U_{в.тр}}{0{,}25\, G_в^2 c_{эф} c_в}, \quad (75)$$

где $c_{эф}$ находится по формуле (51), $\varphi_{ср}$ – по формуле (57) при расходе воздуха, составляющем $0{,}5G_в$. Последовательность расчета $t_н$ производится по формулам (71), (72), методика определения уровня относительной влажности воздуха в выработках и расчета коэффициента нестационарного теплообмена аналогичны п. 6.2.

7.3. *Производительность теплотехнического оборудования при его установке* непосредственно в выработках ПС определяется:

при поперечной схеме проветривания по формуле

$$Q_{об} = Q_{абс} + G_в c_{эф} (t_к - t_н)(1 - 0{,}5M\Lambda), \quad (76)$$

где параметры M и Λ рассчитываются аналогично п. 7.2, величина $c_{эф}$ вычисляется по формуле (51) при $\varphi_{ср}$, *определяемой в соответствии с зависимостью* (57);

при продольно-поперечной схеме проветривания по формуле

$$Q_{об} = Q_{абс} + 2k_т U_{выр} l \times$$

$$\times \frac{t_н - t_к (R_1 - R_2) - 0{,}5\, T_e \dfrac{G_в c_в}{k_{в.тр} U_{в.тр}} (r_2 R_1 - r_1 R_2)}{\dfrac{G_в c_в}{k_{в.тр} U_{в.тр}} (r_2 R_1 - r_1 R_2)} \quad (77)$$

где параметры R_1, R_2, r_1, r_2 вычисляются аналогично п. 7.2, величина $c_{эф}$ рассчитывается по формуле (51) при $\varphi_{ср}$, определяемом в соответствии с зависимостью (57) при количестве воздуха, равном $0{,}5G_в$, а $k_т$ устанавливается по рекомендациям п. 6.3.

Пример. Определить производительность холодильной машины, установленной перед выработкой, длиной 100 м и периметром 14 м, проветриваемой по продольно-поперечной схеме с помощью воздуховода с отверстиями, заданным образом распределенными по его длине. Длина воздуховода соответствует длине выработке, а его диаметр равен 0,8 м. Температура и влажность подходящей к выработке вентиляционной струи 14°С и 80%. Естественная температура пород равна 15°С. Количество воздуха, которое необходимо подавать в выработку, и температура воздуха в ней ($t_к$), *установленные в соответствии с технологическими нормами*, составляют 10 м³/с и 10°С. Потребляемая мощность машин и механизмов, работающих в выработке, а также освещения равна 20 кВт. При расчете принять среднюю влажность воздуха в выработке $\varphi_{ср} = 0{,}8$; коэффициент нестационарного тепло-

обмена $k_т = 0{,}3$ (Вт/м^2·$^\circ$С); коэффициент теплопередачи от воздуха в воздухопроводе к воздуху в выработке $k_{в.тр} = 5$ Вт/(м^2·$^\circ$С); барометрическое давление $B = 0{,}101$ МПа; плотность воздуха $\rho_в = 1{,}25$ кг/м^3; допустимая амплитуда колебания температуры воздуха в ПС $\Delta t = \pm 1^\circ$С

Решение.

В диапазоне температур 10 – 15°С величина коэффициента $n'_{апр}$ по данным табл. 1, прил 6, составляет 0,56. По формуле (51) вычислим величину $c_{эф}$

$$c_{эф} = 1006 + 2470\ 0{,}56\ 0{,}8\ \frac{0{,}101}{0{,}101} = 2113 \text{ Дж/(кг·}^\circ\text{С)}.$$

По формулам (74), (75) установим параметры П и Е

$$П = \frac{2}{1{,}25\cdot 10}\left(\frac{0{,}3\cdot 14\cdot 100 + 5\cdot 2{,}5\cdot 100 + 1{,}25\cdot 10\ 1006}{2113\cdot 100} - \frac{5\cdot 2{,}5}{1006}\right) =$$

$$= 8{,}8\cdot 10^{-3};$$

$$E = \frac{0{,}3\ 14\cdot 5\cdot 2{,}5}{0{,}25\,(1{,}25\cdot 10)^2\ 2113\cdot 1006} = 6{,}32\cdot 10^{-7}.$$

Используя соотношения (73) установим значения величин r_1, r_2 и R_1, R_2

$$r_1 = 0{,}5\ 8{,}8\ 10^{-3} + \sqrt{0{,}25\,(8{,}8\cdot 10^{-3})^2 + 6{,}32\cdot 10^{-7}} = 8{,}87\cdot 10^{-3};$$

$$r_2 = 0{,}5\cdot 8{,}8\ 10^{-3} - \sqrt{0{,}25\,(8{,}8\cdot 10^{-3}) + 6{,}32\cdot 10^{-7}} = -7{,}12\cdot 10^{-5};$$

$$R_1 = 8{,}87\cdot 10^{-3}\exp(8{,}87\cdot 10^{-3}\cdot 100) = 2{,}15\ 10^{-2};$$

$$R_2 = -7{,}12\cdot 10^{-5}\exp(-7{,}12\ 10^{-5}\cdot 100) = -7{,}07\cdot 10^{-5}.$$

По формуле (72) определим температуру, с которой воздух необходимо подавать в воздухопровод, для обеспечения температуры воздуха в выработке $t_к = 10^\circ$С.

$$t_н = 15 + \frac{20\cdot 10^3}{0{,}3\cdot 14\cdot 100} + \frac{(10 - 15 - \frac{20\cdot 10^3}{0{,}3\cdot 14\ 100})(2{,}15\cdot 10^{-2} + 7{,}07\cdot 10^{-5})}{\left[1 + 0{,}5\ \frac{1{,}25\cdot 10\ 1006}{5\ 2{,}5}(-7{,}12\cdot 10^{-5})\right] 2{,}15\cdot 10^{-2}} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{}{-\left[1 + 0{,}5\ \frac{1{,}25\cdot 10\cdot 1006}{5\cdot 2{,}5}(8{,}87\cdot 10^{-3})\right](-7{,}07\cdot 10^{-5})} = 9^\circ\text{С}.$$

Холодопроизводительность оборудования, установленного перед выработкой, определим по зависимости (54), предварительно по формуле (7) вычислив энтальпии воздуха при $\varphi = 0{,}8$, $t = 14^{\circ}C$ и при $\varphi = 0{,}8$, $t = 9^{\circ}C$ ($i_н^{\circ} = 34{,}3 \cdot 10^3$ Дж/кг) ($i_н = 23{,}8 \cdot 10^3$ Дж/кг).

$$Q_{об} = 1{,}25 \cdot 10\,(34{,}3 - 23{,}8)\,10^3 = 132500 \text{ Вт} = 132{,}5 \text{ кВт}.$$

8. ТЕПЛОВЫЕ РАСЧЕТЫ ПС ПРИ ОТСУТСТВИИ СПЕЦИАЛЬНО ОРГАНИЗОВАННОГО ПРОВЕТРИВАНИЯ И РАЗМЕЩЕНИИ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ НЕПОСРЕДСТВЕННО В ВЫРАБОТКАХ

8.1. Продолжительность предэксплуатационного периода зависит от мощности устанавливаемого в выработках теплотехнического оборудования и определяется:

для ПС с положительной температурой

$$\tau_{п.эк} = \left[\frac{(t_к - T_е)\,\lambda_п}{2\,(q_{уд} - q_{исп})}\right]^2 \frac{\pi}{a_п}, \qquad (78)$$

где $q_{уд}$ — удельный тепловой поток на единицу поверхности выработки от установленного в ней теплотехнического оборудования $q_{уд} = Q_{об}/U_{выр}$; $q_{исп}$ — теплота, расходуемая на испарение влаги с поверхности стен выработки ПС

$$q_{исп} = S\beta_п P_{нас}(1 - \varphi_к), \qquad (79)$$

где $P_{нас}$ — находится при температуре $0{,}5\,(T_е + t_к)$, а $t_к$ и $\varphi_к$ определяются в соответствии с технологическими нормами микроклимата;

для ПС с отрицательной температурой

$$\tau_{п.эк} = \frac{0{,}75\lambda_{пт}^2 T_е^2 - \lambda_{пм} a_{пм} \rho_{пт} (2c_{пт} T_е + Lw_п)\, t_к}{a_{пм} q_{уд}^2}\, k_g, \qquad (80)$$

где k_g — коэффициент, учитывающий наличие опорных целиков и зависящий от отношения выработки пролета к ширине целика $b_{цел}$ и температуры воздуха $t_к$, поддерживаемой в ней; определяется по данным табл. 4 или формуле (81)

Таблица 4

Отношение пролета камеры к ширине целика	$t_к$, °C					
	−5	−10	−15	−20	−25	−30
1	1	1,1	1,17	1,24	1,3	1,4
0,8	1	1,08	1,14	1,19	1,24	1,31
0,6	1	1,06	1,1	1,14	1,18	1,24
0,4	1	1,035	1,064	1,1	1,12	1,16
0,2	1	1,2	1,035	1,05	1,06	1,08

$$k_g = (0{,}98 - 0{,}12\,t_к)\,\frac{b.}{b_{цел}} \qquad (81)$$

Плотность теплового потока $q_{уд}$ связана с тепловой производительностью холодильного оборудования $Q_{об}$ соотношением

$$q_{уд} = \frac{Q_{об}\exp[m_x(T_e - \Delta t_к)]}{m_x U_{выр} l (T_e - t_к)}\left\{1 - \exp[-m_x(T_e - t_к)]\right\}, \qquad (82)$$

где m_x — коэффициент, характеризующий тип хладоагента: для аммиака m_x = = 0,0551; для фреона-12 m_x = 0,038; для фреона-22 m_x = 0,045; $\Delta t_к$ — разность температур между температурой воздуха в охлаждаемом помещении и температурой кипения хладоагента: для систем с непосредственным охлаждением $\Delta t_к$ = = 10°С; для систем с рассольным охлаждением $\Delta t_к$ = 15°С.

8.2. Производительность теплотехнического оборудования в период эксплуатации выработок ПС определяется по формуле

$$Q_{об} = Q_{абс} + Q_п\,, \qquad (83)$$

где величина $Q_{абс}$ вычисляется по формулам (58) — (60), а величина $Q_п$ находится:

для ПС с положительной температурой

$$Q_п = 0{,}5\,(k'_\tau + k''_\tau)\,(T_e - t_к)\,U_{выр} l\,, \qquad (84)$$

где коэффициенты нестационарного теплообмена k'_τ и k''_τ вычисляются соответственно при временах $\tau_{эк}$ и $\tau_{эк} - \tau_{п.эк}$ по формулам (21) — (32);

для ПС с отрицательной температурой

$$Q_п = k_{агр}\,k_\tau\,(T_e - t_к)\,U_{выр} l\,, \qquad (85)$$

где k_τ — вычисляется с учетом термического сопротивления слоя пород $R_{пр}$, промороженных в предэксплуатационный период, по формулам (24) — (32) при замене коэффициента теплоотдачи α на коэффициент теплопередачи $k_{пр}$, равный

$$k_{пр} = \frac{1}{1/\alpha + R_{пр}/\lambda_{пм}} \qquad (86)$$

где $R_{пр}$ определяется по формуле (40) при значении температуры воздуха, составляющей $0{,}5\,t_к$, а $k_{агр}$ рассчитывается по формуле (41).

9. РАСЧЕТ ПОЛЕЙ ТЕМПЕРАТУР И ВЛАГОСОДЕРЖАНИЙ В ПОРОДНОМ МАССИВЕ, ОКРУЖАЮЩЕМ ВЫРАБОТКИ ПС

9.1. Температурные поля для условий предэксплуатационного периода следует рассчитывать по формулам:

при принудительной подаче воздуха в выработки ПС:

для ПС с положительной температурой

$$\upsilon = \operatorname{erfc} Z, \tag{87}$$

где $Z = \dfrac{r}{2\sqrt{a_п \tau}}$, $\operatorname{erfc} Z = 1 - \operatorname{erf} Z$, а значения функции erf Z устанавливаются по графику на рис. 12 при $Z = k_\beta$;

для ПС с отрицательной температурой

$$\upsilon_м = \frac{T_м - t}{T_ф - t} = \operatorname{erfc} Z_м / \operatorname{erf} k_\beta ; \tag{88}$$

$$\upsilon_т = \frac{T_т - T_e}{T_ф - T_e} = \operatorname{erfc} Z_т / \operatorname{erfc} (k_\beta k_a^{-0,5}), \tag{89}$$

где $Z_м = \dfrac{r}{2\sqrt{a_{пм} \tau}}$; $Z_т = \dfrac{r}{2\sqrt{a_{пт} \tau}}$, а величина параметра k_β определяется или по формуле (39) или из соотношения $\operatorname{erf} k_\beta = \dfrac{k_{агр\,щ}}{1 + k_т}$ с использованием номограммы рис. 9 и графика рис. 8. Глубина зоны промерзания рассчитывается по формуле (40).

При отсутствии специально организованного проветривания выработок:

для ПС с положительной температурой:

$$\upsilon = \frac{T(r, \tau) - T_e}{T_e} = \frac{2 (q_{уд} - q_{исп})}{\lambda_п T_e} \sqrt{a_п \tau}\ \operatorname{ierfc} Z, \tag{90}$$

где $q_{уд}$ определяют в зависимости от мощности установленного в выработках оборудования ($q_{уд} = Q_{об} / F_{выр}$), а $q_{исп}$ рассчитывают по формуле (79); $Z = \dfrac{r}{2\sqrt{a_п \tau}}$, а значения функции ierfc Z приведены в табл. 5.

Таблица 5

Z	ierfc Z	Z	ierfc Z	Z	ierfc Z	Z	ierfc Z
0	0,5642	0,22	0,3713	0,44	0,2300	0,82	0,0861
0,01	0,5542	0,23	0,3638	0,45	0,2247	0,84	0,0813
0,02	0,5544	0,24	0,3564	0,46	0,2195	0,86	0,0767
0,03	0,5350	0,25	0,3491	0,47	0,2144	0,88	0,0724
0,04	0,5251	0,26	0,3419	0,48	0,2094	0,9	0,0782
0,05	0,5156	0,27	0,3348	0,49	0,2045	0,92	0,0642
0,06	0,5052	0,28	0,3278	0,50	0,1996	0,94	0,0605
0,07	0,4969	0,29	0,3210	0,52	0,1902	0,96	0,0569
0,08	0,4878	0,30	0,3142	0,54	0,1811	0,98	0,0535
0,09	0,4787	0,31	0,3075	0,56	0,1724	1	0,0503
0,10	0,4698	0,32	0,3010	0,58	0,1640	1,1	0,0365
0,11	0,4610	0,33	0,1945	0,6	0,1559	1,2	0,0260
0,12	0,4523	0,34	0,2882	0,62	0,1482	1,3	0,0183
0,13	0,4437	0,35	0,2819	0,64	0,1407	1,4	0,0127
0,14	0,4352	0,36	0,2758	0,66	0,1335	1,5	0,0086
0,15	0,4268	0,37	0,2722	0,68	0,1267	1,6	0,0058
0,16	0,4186	0,38	0,2637	0,7	0,1201	1,7	0,0038
0,17	0,4104	0,39	0,2579	0,72	0,1138	1,8	0,0025
0,18	0,4024	0,40	0,2521	0,74	0,1077	1,9	0,0016
0,19	0,3944	0,41	0,2465	0,76	0,1020	2	0,001
0,20	0,3866	0,42	0,2409	0,78	0,0965		
0,21	0,9789	0,43	0,2354	0,8	0,0912		

для ПС с отрицательной температурой:

$$\upsilon_м = \frac{T_м - T_ф}{T_e - T_ф} = q_{уд} / \lambda_{пм} (R_{пр} - y) ; \qquad (91)$$

$$\upsilon_т = \frac{T_e - T_т}{T_e - T_ф} = (R_t - y)^2 / (R_t - R_{пр})^2 . \qquad (92)$$

Границы промерзания $R_{пр}$ и радиус теплового влияния R_t устанавливаются зависимостями:

$$R_{пр} = \frac{q_{уд} (\tau - \tau^*)}{\rho_п (2c_{пт} T_e + Lw_п)} ; \qquad (93)$$

$$R_t = R_{пр} + \frac{2\lambda_{пт} T_e}{q_{уд}} + \frac{a_{пт} \rho_{пт} Lw_п}{q_{уд}} , \qquad (94)$$

где τ^* определяется соотношением $\tau^* = 0{,}75 \frac{\lambda_{пт}}{a_{пт}} \frac{T_e^2}{q_{уд}}$.

Пример. Определить величину температуры пород в кровле выработки на расстоянии 1 м от поверхности их контакта с воздухом через 10 сут после начала предэксплуатационного периода. Породы представлены песчаником, имеющим температуру, влагосодержание и теплофизические свойства совпадающие с принятыми в примере п. 5.8. Расчет провести для средних температур воздуха в ПС $+2^{\circ}$С и -15°С, получаемых с помощью средств вентиляции и при установке теплотехнического оборудования, обеспечивающего значение $q_{уд} = 50$ Вт/м^2. При этом принять величину $q_{исп} = 10$ Вт/м^2.

Решение.

1. По формуле (87) при $Z = \dfrac{1}{2\sqrt{12{,}2\cdot10^{-7}\cdot10\cdot24\cdot3600}} = 0{,}49$;

$$\upsilon = 0{,}488 \quad T_п = T_e - \upsilon(T_e - t) = 10 - 0{,}488(10 - 2) = 6{,}1^{\circ}\text{C}.$$

2. По формуле (90) при $Z = 0{,}49$ и $\operatorname{ierfc} Z = 0{,}204$ (см. табл. 5) получим:

$$\upsilon = \frac{2(50 - 10)}{2{,}6\cdot10}\sqrt{12{,}2\cdot10^{-7}\cdot10\cdot24\cdot3600}\cdot0{,}204 = 0{,}644;$$

$$T_п = T_e(1 - \upsilon) = 10(1 - 0{,}644) = 3{,}5^{\circ}\text{C}.$$

3. По номограмме на рис. 9 при значениях $k_т = 0{,}67$ и $K_0 = 0{,}8$, $k_{агр.щ} = 1{,}4$. Тогда $\operatorname{erf} k_\beta = \dfrac{1{,}4}{1{,}67} = 0{,}84$, а k_β по графику на рис. 12 составляет $k_\beta = 1$. По формуле (40) получим $R_{пр} = 2\sqrt{12{,}2\cdot10^{-7}\cdot10\cdot24\cdot3600} = 2{,}05$ м, так как $y < R_{пр}$, то по формуле (88) при $Z_м = 0{,}49$ и $\upsilon_м = \dfrac{0{,}488}{0{,}84} = 0{,}58$, имеем:

$$T_м = t + (T_ф - t)\upsilon_м = -15 + 15\cdot0{,}58 = -6{,}3^{\circ}\text{C}$$

4. По формулам (93), (94) при $\tau^* = 0{,}75\dfrac{2{,}6}{12{,}2\cdot10^{-7}} - \dfrac{10^2}{(50)^2} = 6{,}4\cdot10^4$ с имеем:

$$R_{пр} = \frac{50(86{,}4 - 6{,}4)\ 10^4}{2500(2\cdot0{,}84\cdot10^3\cdot10 + 335\cdot10^3\cdot0{,}03)} = 0{,}6\text{ м};$$

$$R_t = 0{,}6 + \frac{2\cdot2{,}6\cdot10}{50} + \frac{12{,}2\cdot10^{-7}\cdot2500\cdot335\cdot10^3\cdot0{,}03}{50} = 2{,}25\text{ м}$$

так как $y > R_{пр}$, то по формуле (92) получим:

$$\upsilon_т = \frac{(2{,}25 - 1)^2}{(2{,}25 - 0{,}6)^2} = 0{,}574;$$

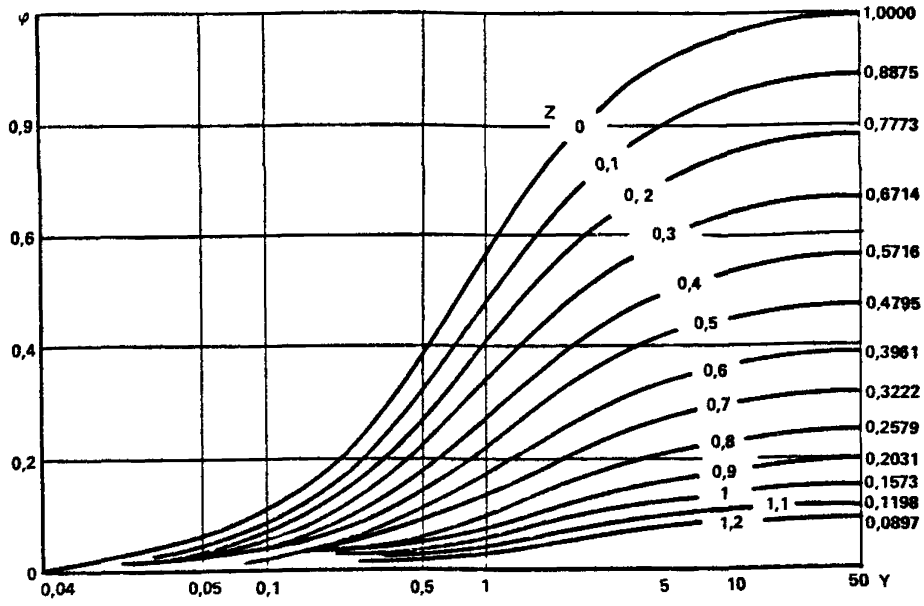


Рис. 12. График для определения значения функции $\varphi(Z, Y)$.

$$T_т = T_e - \upsilon_т T_e = 10(1 - 0{,}574) = 4{,}3^{\circ}C.$$

9.2. Температурные поля в породах в период эксплуатации ПС определяются следующими формулами:

для ПС с положительной температурой:

при щелеобразной форме выработок и цилиндрической форме с круговым поперечным сечением для $0{,}5\dfrac{r_{эк}^2}{a_п} \leqslant \tau \leqslant \dfrac{r_{эк}^2}{a_п}$,

$$\upsilon = \frac{T(y, \tau) - T_e}{t - T_e} = \varphi(Z, Y), \qquad (95)$$

где значения функции $\varphi(Z, Y)$ находятся по графику на рис. 12 при параметрах Z и Y, определяемых для щелеобразной и круговой формам поперечного сечения по соотношениям: $Z_{щ} = \dfrac{r}{2\sqrt{a_п \tau}}$; $Y_{щ} = \dfrac{a}{\lambda_п}\sqrt{a_п \tau}$ и $Z_ц = \dfrac{r - r_{эк}}{2\sqrt{a_п \tau}}$; $Y_ц = \left(\dfrac{a}{\lambda_п} + \dfrac{0{,}375}{r_{эк}}\right)\sqrt{a_п \tau}$;

при цилиндрической форме выработок с круговым поперечным сечением для $\tau > \dfrac{r_{эк}^2}{a_п}$:

$$\upsilon_{ц} = \frac{T_e - T(r,\tau)}{T_e - t} = \frac{Bi\,(\delta \ln \delta / R + R - \delta)}{\delta - 1 + Bi\,(\delta \ln \delta + 1 - \delta)}, \qquad (96)$$

где величина δ устанавливается по формуле (28) или номограмме рис. 5:

при цилиндрической форме выработок с эллиптическим поперечным сечением

$$\upsilon_{эл} = \frac{T(r, y, \tau) - t}{T_e - t} = b_{\tau} \frac{\ln \dfrac{A_r + B_r}{a_{эл} + b_{эл}}}{\ln \delta}, \qquad (97)$$

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

$$a_{эл} = \frac{2b\,(1 + k_{пр})}{\pi\,[1{,}5\,(1 + k_{пр}) - \sqrt{k_{пр}}]}; \qquad (98)$$

$$b_{эл} = \frac{2b\,k_{пр}\,(1 + k_{пр})}{\pi\,[1{,}5\,(1 + k_{пр}) - \sqrt{k_{пр}}]}, \qquad (99)$$

Радиус теплового влияния δ и поправка к коэффициенту нестационарного теплообмена b_{τ} определяются по формулам (27), (28) или номограмме (рис. 5). Координаты A_r и B_r связаны с декартовой системой координат соотношениями:

$$A_r = \sqrt{B^2 + a_{эл}^2 - b_{эл}^2}; \qquad (100)$$

$$B_r = 0{,}707 \sqrt{-a_{эл}^2 + b_{эл}^2 + y^2 + r^2 + \sqrt{(-a_{эл}^2 + b_{эл}^2 + y^2 + r^2) + 4r^2 (a_{эл}^2 - b_{эл}^2)}} \qquad (101)$$

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

$$A_{\delta} = a_{эл} \sqrt{\frac{1 - k_{пр}^2}{2} \left[\sqrt{1 + 0{,}25 N_{\delta}^2} - 1\right]}; \qquad (102)$$

$$B_{\delta} = a_{эл} \sqrt{\frac{1 - k_{пр}^2}{2} \left[\sqrt{1 + 0{,}25 N_{\delta}^2} - 1\right]}, \qquad (103)$$

где параметр N_{δ} определяется по формуле (27) при известном значении радиуса теплового влияния δ.

Пример. Рассчитать температуру пород, окружающих выработки ПС, в точке, расположенной на расстоянии 10 м от оси выработок. Ширина и высота первой выработки соответственно равны 8 и 4 м, а второй 10 и 2,5 м. Температура воздуха, поддерживаемая в выработках составляет $+2\,^{o}C$, а коэффициент теплоотдачи равен 8 Вт/(м^2·^{o}C). Теплофизические свойства принять аналогично примеру п. 5.8.

Решение.

Для первой выработки при $b/h = 8/4 = 2$ при расчете используем формулу (96). При $r_{эк} = \frac{8+4}{3{,}14} = 3{,}82$ м; $Bi = \frac{8 \cdot 3{,}82}{2{,}6} = 12$; $F_0 = \frac{12{,}2 \cdot 10^{-7} 5 \cdot 8760 \times}{(3{,}82)^2} \rightarrow$

$\xleftarrow{\times 3600} = 13{,}2$ находим по табл. 4 $\tilde{\gamma} = 2{,}95$, а по формуле (28) $\delta = 15$.

По формуле (96) при $R = \frac{10}{3{,}82} = 2{,}61$ получим

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

$$T_п = 10 - 0{,}509(10 - 2) = 6^{\circ}C.$$

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

По формулам (98) — имеем

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

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

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

$$= 10 \text{ м};$$

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

При $r_{эк} = 3{,}98$ м; $Bi = 12{,}2$; $F_0 = 12{,}2$; $\tilde{\gamma} F_0 = 35{,}9$; $\delta = 14{,}5$ и $b_\tau = 0{,}955$ (см. рис. 9) по формуле (97) получим:

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

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

При цилиндрической форме выработок с круговым или эллиптическим поперечными сечениями, пройденными в породах с различными коэффициентами теплопроводности вдоль напластования λ_{II} и перпендикулярно к нему $\lambda_{\perp}$, — по формуле (97) с учетом соотношений (29) — (30) при $a'_{эл} = a_{эл}\sqrt{\frac{0{,}5(\lambda_{II}+\lambda_{\perp})}{\lambda_{II}}}$ и $b'_{эл} = b_{эл}\sqrt{\frac{0{,}5(\lambda_{II}+\lambda_{\perp})}{\lambda_{II}}}$

Для ПС с отрицательной температурой:

при щелеобразной форме выработок — по формулам (88) — (89);

при цилиндрической форме выработок с круговым поперечным сечением, в случае $0{,}5\frac{r^2_{эк}}{a_п} \leqslant \tau \leqslant \frac{r^2_{эк}}{a_п}$

$$\upsilon_{ц.м} = \frac{T_{пм} - T_ф}{T_ф - t} = \frac{1}{\sqrt{R}}\operatorname{erfc} Z_м / \operatorname{erf} k_\beta ; \qquad (104)$$

$$\upsilon_{ц.т} = \frac{T_{пт} - T_e}{T_ф - T_e} = \frac{1}{\sqrt{R}}\operatorname{erfc} Z_т / \operatorname{erfc}(k_\beta k_a^{-0,5}), \qquad (105)$$

где $Z_м = \frac{R-1}{2\sqrt{F0_м}}$; $Z_т = \frac{R-1}{2\sqrt{k_a F0_м}}$, а величина k_β вычисляется аналогично п. 9.1:

в случае $\tau > \frac{r^2_{эк}}{a_п}$

$$\upsilon_{ц.м} = \frac{T_{пм} - T_ф}{t - T_ф} = \frac{\ln\xi / R}{\ln\xi + 1/Bi} ; \qquad (106)$$

$$\upsilon_{ц.т} = \frac{T_{пт} - T_e}{T_ф - T_e} = \frac{\ln R/\delta - R/\delta + 1}{\ln\xi/\delta - \xi/\delta + 1} , \qquad (107)$$

где величины ξ и δ рассчитываются по формулам (42), (43);

при цилиндрической форме выработок с эллиптическим поперечным сечением:

$$\upsilon_{эл.м} = \frac{T_{пм} - t}{T_ф - t} = b''_\tau \frac{\ln\frac{A_r + B_r}{a_{эл} + b_{эл}}}{\ln\xi} ; \qquad (108)$$

$$\upsilon_{эл.т} = \frac{T - T_ф}{T_e - T_ф} = \frac{b''_\tau \ln \frac{A_r + B_r}{\quad} - \ln \xi}{\frac{a_{эл} + b_{эл}}{\quad}} , \qquad (109)$$

где величины b'_τ и b''_τ определяются по формуле (27) или по номограмме рис.5 при известных значениях δ и ξ, которые, в свою очередь, рассчитываются по формулам (42), (43). Координаты A_r и B_r в формуле (108) изменяются от границ контура эллиптической выработки до контура, соответствующего границе промерзания A_ξ и B_ξ, а в формуле (109) от контура, соответствующего границе промерзания A_ξ и B_ξ до контура, совпадающего с зоной теплового влияния выработки A_δ и B_δ. Значения A_ξ и B_ξ, A_δ и B_δ устанавливаются по формулам (102), (103). Связь координат A_r и B_r с декартовой системой координат (y, r) осуществляется по формулам (100), (101).

Пример. Рассчитать температуру пород, окружающих выработки ПС, для условий предыдущего примера, приняв температуру воздуха, равной -15^oC.

Решение.

Для первой выработки при $r_{эк} = 3{,}82$ м; $Bi = 12$; $F_0 = 13{,}2$; $K_0 = 0{,}8$; $k_т = 0{,}67$, используя номограмму на рис. 13 и формулу (41) получим: $k_{агр\ щ} = 1{,}4$; $k_{агр\ ц} = 1{,}14$. По номограмме рис. 10 и формуле (42) найдем виличину $\xi = 2{,}55$. Используя график рис. 11 и формулу (43) получим $\delta = 11{,}5$. Так как $R = \frac{r}{r_{эк}} = 2{,}61 > \xi$, то для вычислений температуры пород необходимо применять формулу (107)

$$\upsilon_{цт} = \frac{\ln \frac{(2{,}61)}{(11{,}5)} - \frac{2{,}61}{11{,}5} + 1}{\ln \frac{(2{,}55)}{(11{,}5)} - \frac{2{,}55}{11{,}5} + 1} = 0{,}975,$$

откуда

$$T_{пт} = T_e + \upsilon_{цт}(T_ф - T_e) = 10 + (0 - 10)\,0{,}975 = 0{,}25^oC$$

Для второй выработки при $r_{эк} = 3{,}98$ м; $Bi = 12{,}2$; $F_0 = 12{,}2$; $K_0 = 0{,}8$; $k_т = 0{,}67$ аналогично расчетам для первой выработки получим: $k_{агр\ щ} = 1{,}4$; $k_{агр\ щ} = 1{,}15$; $\xi = 2{,}45$; $\delta = 11$. По формулам (101), (102) с учетом соотношения (27) определенного при $\xi = 2{,}45$, установим большую A_ξ и малую B_ξ полуоси эллиптической границы промерзания:

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

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

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

Так как расчетная точка расположена за пределами зоны промерзания, то для определения температуры пород используем формулу (109). По номограмме рис. 5 при $\delta = 11$ и $\xi = 2{,}45$ соответственно получим $b'_\tau = 0{,}95$ и $b''_\tau = 0{,}85$. Тогда

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

откуда

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

9.3. Температурное поле в породах при наличии системы взаимовлияющих в тепловом отношении выработок рассчитывается в следующей последовательности: определяются расстояния от точки, в которой определяется температура пород до центра каждой выработки r_i, и по одной из формул (95) — (109) устанавливаются *безразмерные температуры* $\upsilon_i = \frac{T_e - T_i}{T_e - t_i}$; *вычисляется температура, сформировавшаяся в искомой точке от любых двух выработок*

$$\bar{\upsilon}_2 = \upsilon_1 + \upsilon_2 - \upsilon_1\upsilon_2 \qquad (110)$$

тепловое влияние третьей выработки υ_3 (при известной величине $\bar{\upsilon}_2$) учитывается аналогичным образом

$$\bar{\upsilon}_3 = \bar{\upsilon}_2 + \upsilon_3 - \upsilon_2\upsilon_3. \qquad (111)$$

Суммарная температура пород в искомой точке устанавливается в результате последовательного учета в соответствии с формулами (110) — (111) теплового влияния каждой выработки

$$T_п = T_e - \bar{\upsilon}_п (T_e - t_п). \qquad (112)$$

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

Решение.

Найдем безразмерные температуры υ_i

$$\upsilon_1 = \frac{15-8}{15-1} = 0{,}5; \quad \upsilon_2 = \frac{15-5}{15-1} = 0{,}714; \quad \upsilon_3 = \frac{15-12}{15-1} = 0{,}214;$$

$$\upsilon_4 = \frac{15-2}{15-1} = 0{,}93$$

По формулам (110), (111) найдем

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

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

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

По формуле (112) имеем

$$T_п = 15 - 0{,}992\,(15-1) = 1{,}1^{o}C$$

9.4. Температурные поля, формирующиеся в горных породах при изменении температуры воздуха в выработках в соответствии с одним из законов, представленных на рис. 1, рассчитываются следующим образом зависимость изменения температуры воздуха от времени разбивается на временные интервалы, в течение которых температура воздуха считается постоянной $t_п$; по одной из формул (95) (96), (97) при временах $(\tau - \tau_п)$, отсчитываемых от начала интервала с температурой $t_п$, вычисляются безразмерные температуры пород $\upsilon = \frac{T_п - t_п}{T_e - t_п}$; температура пород $T_п$ на момент времени τ определяется по формуле

$$T_п = t_m + \upsilon(\tau)\,(T_e - t_0) = \sum_{n-1}^{m} (t_n - t_{n-1})\,\upsilon(\tau - \tau_n) \qquad (113)$$

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

9.5. Уточненный расчет температурных полей в массиве горных пород при наличии нескольких назакрепленных выработок и их реальной геометрической формы, а также учет естественного геотермического градиента, анизотропии теплофизических свойств пород, зависимости коэффициента теплоотдачи от координат и времени, может осуществляться по специальной программе (см Фонд алгоритмов и программ АН УССР, программа инвентарный № АП-0079 от 24.12.85)

9.6. Поля влагосодержаний в породах, окружающих выработки ПС, $w_п$ рассчитываются по формуле

$$w_n = w_e + \upsilon_m (w_e \rho_n + \kappa_в), \qquad (114)$$

где υ_m определяется аналогично полям температур по зависимостям (87), (95) — (97) при замене в них коэффициентов теплопроводности λ_n и температуропроводности a_n на коэффициент диффузии a_{m_n} и коэффициента теплоотдачи на коэффициент массоотдачи β_n', определяемый соотношением (46).

10. ПРИМЕРЫ ТЕПЛОВЫХ РАСЧЕТОВ ВЫРАБОТОК ПС

Тепловой расчет ПС, используемого для размещения птицефабрики производительностью 1 млн бройлеров в год

Исходные данные для теплового расчета

1. Нормативные параметры микроклимата производственных помещений для выращивания цыплят-бройлеров выбираются в соответствии с данными табл. 6.

Таблица 6

Возраст, недель	Температура в холодный период года, °С		Относительная влажность φ воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с	
	в помещении	под брудерами (нагревательные приборы), м		холодный период не более	теплый период, не более
1	28–26	35–30	65–75	0,15	0,2
2–3	22±1	29–26	65–75	0,2	0,4
4–6	20±1	–	65–75	0,5	0,6
7–9	19±1	–	60–75	–	–

2. Климатическая характеристика района (р-н г. Одессы) принимается согласно данным СНиП 2.01.01–82. Среднегодовая температура — плюс 7,8° С.

Среднемесячная температура наиболее холодного месяца — января равна минус 4,8°С, а наиболее теплого — июля плюс 19,5°С.

Барометрическое давление равно 0,1 МПа.

3. Геолого-геотермические условия: тип пород — детритовый известняк. Плотность 1700 кг/м^3, удельная теплоемкость 1,3 кДж/(кг·°С); теплопроводность вдоль напластования и перпендикулярно к нему равна 1,3 и 0,8 Вт/(м·°С), влажность пород 15%. Естественная температура пород на глубине расположения выработок ПС $H = 200$ м составляет плюс 12°С.

4. Горно-технические и эксплуатационные условия: подземная птицефабрика состоит из двух обособленных участков, в каждом из которых находится по 17 рабочих камер. Длина камеры 72 м, ширина 7,5 м, высота 2,5 м, геометрическая форма сечения — прямоугольная. Расстояние между центрами камер 12 м. Каждая камера отделена от воздухоподающей выработки перемычкой, характеризующейся коэффициентом теплопередачи $k_{пер} = 1{,}4$ Вт/(м^2 · °С). В каждой камере находится 8640 голов птицы, массой — 1,4 кг каждая. Удельные влаговыде-

ления на 1 кг живой массы $0{,}54 \cdot 10^{-6}$ кг/с. Тепловыделения от осветительных приборов равны 0,5 кВт. Принятый по условиям эксплуатации расход воздуха на каждую камеру равен 3 $м^3$/с. Для уменьшения влаговыделений от пород в период эксплуатации на них наносится пароизоляционное покрытие типа ЛСП-901.

Задачами тепловых расчетов являются:

1. Вычисление длительности предэксплуатационного периода, т.е. периода повышения температуры воздуха в рабочем помещении от 12 до 18°С (допустимый уровень колебания температуры в камере ограничен 1°С).

2. Определение необходимой теплопроизводительности брудеров для поддержания в эксплуатационный период в рабочих помещениях нормативных параметров микроклимата.

3. Установление необходимой длины теплоаккумулирующих выработок, обеспечивающей в зимний период подогрев наружного воздуха до температуры 6°С.

Вычисление длительности предэксплуатационного периода

1. Расчет коэффициента массоотдачи:

Вычисляем эквивалентный диаметр выработок ПС

$$d_{эк} = \frac{4f_{выр}}{U} = \frac{4 \cdot 7{,}5 \cdot 2{,}5}{2(7{,}5 + 2{,}5)} = 3{,}75 .$$

Определяем барометрическое давление на глубине 200 м

$B = 0{,}1 + 0{,}001 = 0{,}101$ МПа.

По формуле (8) и (9) при $t_{ср} = 0{,}5(17 + 18) = 17{,}5°С$ $\nu_в = 14{,}7 \cdot 10^{-6}$ $м^2$/с, $\rho_в = 1{,}2$ кг/$м^3$ (см. прил 3) вычисляем коэффициент диффузии a_{m_b} и коэффициент массопроводности λ_{m_b}

$$a_{m_b} = 5{,}27 \cdot 10^{-11} \frac{(17{,}5 + 273)^{1{,}89}}{0{,}101} = 2{,}36 \cdot 10^{-5} \text{ } м^2/с;$$

$$\lambda_{m_b} = 4{,}16 \cdot 10^{-10} \frac{(17{,}5 + 273)^{1{,}89}}{0{,}101} = 1{,}86 \cdot 10^{-4} \text{ кг/(м·с·МПа)}$$

Вычисляем числа подобия Pr_{m_b}, Re, Gu. Предварительно находим скорость воздуха в камере v и температуру воздуха по мокрому термометру $t_{мок}$

$$v = \frac{3}{7{,}5 \cdot 2{,}5} = 0{,}16 \text{ м/с},$$

$t_{мок}$ при $t_{сух} = 17{,}5°С$ и $\varphi = 70\%$ составляет 13,7 °С.

$$Pr_{m_b} = \frac{14{,}7\cdot10^{-6}}{2{,}36\cdot10^{-5}} = 0{,}62\,;\quad Re = \frac{0{,}16\cdot3{,}75}{14{,}7\cdot10^{-6}} = 40816\,;$$

$$Gu = \frac{17{,}5 - 13{,}7}{(17{,}5 + 273)} = 0{,}013\,.$$

При Re = 40816 в соответствии с данными табл. 1

$A' = 0{,}0248$, и $n' = 0{,}9$.

По формуле (19) рассчитываем коэффициент массоотдачи чистой воды $\beta_{вод}$

$$N\mu_{m_{вод}} = 0{,}0248\,(0{,}62)^{0{,}33}(40816)^{0{,}9}(0{,}013)^{0{,}135}\left(\frac{17{,}5 + 273}{13{,}7 + 273}\right)^2 = 163\,;$$

$$\beta_{вод} = 163\frac{1{,}86\cdot10^{-4}}{3{,}75} = 8{,}1\cdot10^{-3}\ кг/(м^2\cdot с\cdot МПа)\,.$$

По данным табл. 2, прил. 4 для детритового известняка $\bar{\mu} = 0{,}48$. Отсюда по формуле (18)

$$\beta_п = 0{,}48\cdot8{,}1\cdot10^{-3} = 3{,}89\cdot10^{-3}\ кг/(м^2\cdot с\cdot МПа)\,.$$

2. Расчет относительной влажности воздуха в камере в конце предэксплуатационного периода.

По формуле (2) определяются парциальные давления насыщенного пара при средней температуре воздуха плюс 17,5°С, средней температуре поверхности стен, равной средней температуре воздуха 17,5°С, и температурах воздуха в начале и конце камеры 18 и 17°С.

$$P_{нас}\,(17{,}5^oC) = 1{,}33\cdot10^{-4}\exp\left(\frac{360 + 18{,}7\cdot17{,}5}{236 + 17{,}5}\right) = 2\cdot10^{-3}\ МПа;$$

$$P_{нас}\,(17^oC) = 1{,}33\cdot10^{-4}\exp\left(\frac{360 + 18{,}7\cdot17}{236 + 17}\right) = 1{,}94\cdot10^{-3}\ МПа;$$

$$P_{нас}\,(18^oC) = 1{,}33\cdot10^{-4}\exp\left(\frac{360 + 18{,}7\cdot18}{236 + 18}\right) = 2{,}06\cdot10^{-3}\ МПа.$$

По формуле (5) вычисляем влагосодержание воздуха при $t_н = 18^oC$, $\varphi_н = 0{,}65$

$$x_н = 0{,}622\ \frac{0{,}65\cdot 2{,}06\cdot 10^{-3}}{0{,}101 - 0{,}65\cdot 2{,}06\cdot 10^{-3}} = 8{,}25\cdot 10^{-3}\ \text{кг/кг}.$$

По зависимости (52) определяем

$$\varphi_{ср} = \frac{0{,}5\cdot 0{,}65 + 0{,}8\cdot 8{,}25\cdot 10^{-3}\cdot 0{,}101/(1{,}94\cdot 10^{-3}) + 0{,}8\cdot 3{,}89\cdot 10^{-3}\text{x}}{1 + 0{,}8\cdot 3{,}89\cdot 10^{-3}\cdot 0{,}101\cdot 722\,(7{,}5 + 2{,}5)\ 2\ \text{x}} \ldots \rightarrow$$

$$\ldots \leftarrow \frac{\text{x}0{,}101\cdot 72\cdot 2\,(7{,}5 + 2{,}5)\ 2\cdot 10^{-3}/(1{,}2\cdot 3\cdot 1{,}94\cdot 10^{-3})}{\text{x}\ \ 10^{-3}/(1{,}2\cdot 3\cdot 1{,}94\cdot 10^{-3})} = 0{,}7.$$

3. Расчет длительности предэксплуатационного периода.

По формуле (51) определяем величину $c_{эф}$, принимая $n'_{апр}$ в интервале температур 17 – 18°С по данным табл. 1, прил. 6 равным 0,83

$$c_{эф} = 1006 + 2470\cdot 0{,}83\cdot 0{,}7\,\frac{0{,}101}{0{,}101} = 2441\ \text{Дж}/(\text{кг}\cdot{}^{\circ}\text{С}).$$

По зависимости (50) вычисляем продолжительность предэксплуатационного периода, принимая $\lambda_п = 0{,}5\,(0{,}8 + 1{,}3) = 1{,}05$ Вт/(м·°С)

$$\tau_{п.эк} = \frac{3{,}7\cdot 10^{-6}\,(1{,}05)^2\,(72\cdot 20)^2}{4{,}75\cdot 10^{-7}\,(1{,}2\cdot 3)^2\,(2441)^2 \ln^2\left(\frac{18-12}{17-12}\right)} = 6{,}8\ \text{сут}.$$

Определение необходимой теплопроизводительности брудеров (нагревательных приборов) и калориферов для поддержания в эксплуатационный период (в расчете на 5 год эксплуатации) в рабочих помещениях нормативных параметров микроклимата

1. Вычисляем величины коэффициентов нестационарного теплообмена.

В соответствии с данными табл. 6 средняя температура воздуха в камере за период эксплуатации составляет

$$t_{ср} = \frac{28\cdot 168 + 22\cdot 504 + 20\cdot 1008 + 19\cdot 1512}{3192} = 20{,}2^{\circ}\text{С}.$$

Величину коэффициента теплоотдачи α при малой скорости движения воздуха $v < 0{,}2$ м/с выбираем в соответствии с рекомендациями СНиП II-3-79** и принимаем равной 8 Вт/(м²·°С).

По формулам (29) и (30) устанавливаем для анизотропного горного массива величины $r_{эк}$ и $k_{пр}$:

$$r_{эк} = \frac{7,5}{3,14}\sqrt{\frac{1,05}{1,3}}\left(1 + \frac{2,5}{7,5}\sqrt{\frac{1,3}{0,8}}\right) = 3,1 \text{ м};$$

$$k_{пр} = \frac{2,5}{7,5}\sqrt{\frac{1,3}{0,8}} = 0,4 .$$

Определяем величины чисел подобия Bi и Fo.

$$Bi = \frac{8 \cdot 3,1}{1,05} = 23,3; \quad Fo = \frac{4,75 \cdot 10^{-7} \cdot 4380 \cdot 3600}{(3,1)^2} = 7,97 .$$

Коэффициент нестационарного теплообмена на 5-й год эксплуатации ПС для выработки кругового сечения рассчитываем по формуле (24)

$$k_{\tau_ц} = \frac{8}{1 + 23,3 \ln\left(1 + \sqrt{3,14 \cdot 7,97}\right)} = 0,187 \text{ Вт/(м}^2 \cdot {}^{o}\text{C)}.$$

2. Вычисляем поправку к коэффициенту нестационарного теплообмена, учитывающую отклонение реальной геометрической формы ПС от круговой.

По формуле (28)

$$\delta = 0,837 \cdot \ln 2,64\left[2,72\left(1 + \sqrt{3,14\ 7,97}\right)\right] = 12,2 .$$

Величину b_τ рассчитываем по формуле (27) при M и N_δ, равных

$$M = \frac{1 - 0,4}{2(1 + 0,4)} = 0,2;$$

$$N_\delta = (12,2^2 - 1)\left[1,5\sqrt{\frac{1 + 0,4}{1 - 0,4}} - \sqrt{\frac{0,4}{1 - 0,4^2}}\right]^2 + \frac{4 \cdot 0,4}{1 - 0,4^2} = 398;$$

$$b_\tau = \frac{\ln 12,2}{\sqrt{0,20\left[\sqrt{1 + 0,25(398)^2} + 1\right]} + \sqrt{0,2\left[\sqrt{1 + 0,25(398)^2} - 1\right]}} =$$

$$= 0,97$$

Определяем поправку к коэффициенту нестационарного теплообмена на тепловое взаимодействие выработок ПС c_{τ}. Расчет произведем для условий камеры, расположенной в конце участка, состоящего из 17 выработок.

Радиус теплового влияния выработки составляет

$$R_t = r_{эк}\,\delta = 3{,}1 \cdot 12{,}2 = 37{,}4 \text{ м}.$$

Таким образом на рассматриваемую выработку оказывают влияние две соседние камеры, отстоящие соответственно на $h_{выр}$ 12 и 24 м.

По формуле (32) при $t_1 = t_i$ и $r_{эк_1} = r_{эк_i}$ имеем :

$$c_{\tau_1} = \frac{\delta \ln h_{выр}/r_{эк} - 0{,}637\,(h_{выр}/r_{эк} + 1)\,E(k) + 1}{\delta \ln \delta + 1 - \delta};$$

$$c_{\tau_1} = \frac{12{,}2 \ln 12/3{,}1 - 0{,}637\,(12/3{,}1 + 1)\,1{,}27 + 1}{12{,}2 \cdot \ln 12{,}2 + 1 - 12{,}2} = 0{,}76;$$

$$E\left[2\sqrt{\frac{12}{3{,}1}} \Big/ \left(1 + \frac{12}{3{,}1}\right)\right] = E(0{,}8) = 1{,}27 \text{ (см. рис., прил. 5)};$$

$$c_{\tau_2} = \frac{12{,}2 \ln \frac{24}{3{,}1} - 0{,}637\left(\frac{24}{3{,}1} + 1\right)1{,}4 + 1}{12{,}2 \cdot \ln 12{,}2 + 1 - 12{,}2} = 0{,}997;$$

$$E\left[2\sqrt{\frac{24}{3{,}1}} \Big/ \left(1 + \frac{24}{3{,}1}\right)\right] = E(0{,}63) = 1{,}4.$$

3. Результирующее значение коэффициента нестационарного теплообмена определяем как

$$k_{\Sigma\tau} = 0{,}187 \cdot 0{,}97 \cdot 0{,}76 \cdot 0{,}997 = 0{,}137 \text{ Вт/(м}^2 \cdot {}^{\circ}\text{C)}.$$

4. Расчет коэффициентов нестационарного теплообмена в периоды выращивания цыплят-бройлеров осуществляем по формуле (38).

Для первого периода длительностью $\tau_1 = 168$ ч.

$$k'_{\tau} = k_{\Sigma\tau}\,\frac{T_e - t_{ср}}{T_e - t_1} + k_{\tau_1}\,\frac{t_{ср} - t_1}{T_e - t_1},$$

где k_{τ_1} рассчитывается по формуле (23) при Bi = 23,3

Bi = 23,675 .

F_o = 0,031 ; z = 4,17 ; f (4,17) = 0,869 (по данным табл. 3)

$$k_{\tau_1} = 8\left[1 - \frac{23,3}{23,675} f(23,675 - \sqrt{0,031})\right] = 8\left[1 - \frac{23,3}{23,675} 0,869\right] =$$

= 1,16 ,

тогда

$$k_\tau^I = 0,137 \frac{12 - 20,2}{12 - 28} + 1,16 \frac{2,02 - 28}{12 - 28} = 0,635 \text{ Вт/(м}^2 \cdot {}^\circ\text{C)}.$$

Температура поверхности горных пород при этом будет равна (формула (44)).

$$T_{пов} = t_1 + \frac{a}{k'_\tau}(T_e - t_1) = 28 + \frac{0,635}{8}(12 - 28) = 26,7\,^\circ\text{C}.$$

Для второго периода, длительностью τ_2 = 504 ч

$$k_\tau^{II} = k_{\Sigma\tau} \frac{T_e - t_{ср}}{T_e - t_2} + k_{\tau_1 + \tau_2} \frac{t_{ср} - t_1}{T_e - t_2} + k_{\tau_2} \frac{t_1 - t_2}{T_e - t_2},$$

$k_{\tau_1 + \tau_2}$ и k_{τ_2} вычисленные по формуле (23), составляют 0,68 и 0,76 Вт/(м^2·$^\circ$C).

$$k_\tau^{II} = 0,137 \frac{12 - 20,2}{12 - 22} + 0,68 \frac{20,2 - 28}{12 - 22} + 0,76 \frac{28 - 22}{12 - 22} = 0,186 \text{ Вт/(м}^2 \cdot {}^\circ\text{C)};$$

$$T_{пов} = 22 + \frac{0,186}{8}(12 - 22) = 21,8\,^\circ\text{C}.$$

Для третьего периода, длительностью τ_3 = 1008 ч.

$$k_\tau^{III} = k_{\Sigma\tau} \frac{T_e - t_{ср}}{T_e - t_3} + k_{\tau_1 + \tau_2 + \tau_3} \frac{t_{ср} - t_1}{T_e - t_3} + k_{\tau_2 + \tau_3} \frac{t_1 - t_2}{T_e - t_3} + k_{\tau_3} \frac{t_2 - t_3}{T_e - t_3}.$$

Величины $k_{\tau_1 + \tau_2 + \tau_3}$, $k_{\tau_2 + \tau_3}$ и k_{τ_3} соответственно равны 0,47; 0,49; 0,58 Вт/(м^2·$^\circ$C).

$$k_\tau^{III} = 0,137 \frac{12 - 20,2}{12 - 20} + 0,47 \frac{20,2 - 28}{12 - 20} + 0,49 \frac{28 - 22}{12 - 20} +$$

$$0{,}58\ \frac{22-20}{12-20} = 0{,}085\ \text{Вт/(м}^2\cdot{}^{\circ}\text{C)};$$

$$T_{пов} = 20 + \frac{0{,}085}{8}(12-20) = 19{,}9^{\circ}\text{C}.$$

Для четвертого периода длительностью $\tau_4 = 1512$ ч

$$k_{\tau}^{IV} = k_{\Sigma\tau}\ \frac{T_e - t_{ср}}{T_e - t_4} + k_{\tau_1+\tau_2+\tau_3+\tau_4}\ \frac{t_{ср}-t_1}{T_e-t_4} + k_{\tau_2+\tau_3+\tau_4}\ \frac{t_1-t_2}{T_e-t_4} +$$

$$k_{\tau_3+\tau_4}\ \frac{t_2-t_3}{T_e-t_4} + k_{\tau_4}\ \frac{t_3-t_4}{T_e-t_4}.$$

Величины $k_{\tau_1+\tau_2+\tau_3+\tau_4}$; $k_{\tau_2+\tau_3+\tau_4}$; $k_{\tau_3+\tau_4}$; k_{τ_4} соответственно равны 0,37; 0,39; 0,41; 0,49 Вт/(м$^2\cdot{}^{\circ}$C).

$$k_{\tau}^{IV} = 0{,}137\ \frac{12-20{,}2}{12-19} + 0{,}37\ \frac{20{,}2-28}{12-19} + 0{,}38\ \frac{28-22}{12-19} + 0{,}41\ \frac{22-20}{12-19} +$$

$$+ 0{,}49\ \frac{20-19}{12-19} = 0{,}059\ \text{Вт/(м}^2\cdot{}^{\circ}\text{C)};$$

$$T_{пов} = 19 + \frac{0{,}059}{8}(12-19) = 18{,}9^{\circ}\text{C}.$$

5. Определяем величины влажностеи воздуха в рабочих помещениях в периоды выращивания цыплят-бройлеров.

Величину коэффициента массоотдачи с поверхности пород с пароизоляционным покрытием ЛСП-901 в соответствии с п.5.2 выбираем равным $\beta_{\tau} = 0{,}17 \times 10^{-3}$ кг/(м$^2\cdot$ с$\cdot$МПа).

Парциальные давления насыщенного пара при температурах 28; 26,7; 22; 21,8; 20; 19,9; 19; 18,9°C, вычисленные по формуле (2) соответственно равны $3{,}78\cdot10^{-3}$; $3{,}5\cdot10^{-3}$; $2{,}64\cdot10^{-3}$; $2{,}61\cdot10^{-3}$; $2{,}34\cdot10^{-3}$; $2{,}33\cdot10^{-3}$; $2{,}2\cdot10^{-3}$; $2{,}08\cdot10^{-3}$ МПа,

Влагосодержание воздуха $x_н$ при температурах 28; 22; 20°C (влажность 65%) и температуре 19°C; (влажность 60%) равны $1{,}31\cdot10^{-2}$; $1{,}05\cdot10^{-2}$; $1{,}05\times10^{-2}$; $9{,}36\cdot10^{-2}$; $8{,}12\cdot10^{-3}$ кг/кг.

Средняя и конечная влажности воздуха в рабочем помещении в первый период рассчитываются по формулам (56), (57):

$$\varphi_{ср}^{I} = \frac{0{,}5\cdot 0{,}65 + 0{,}81\cdot 1{,}51\cdot 10^{-2}\,\dfrac{0{,}101}{3{,}78\cdot 10^{-3}} + \dfrac{0{,}8\cdot 0{,}17\cdot 10^{-3}\cdot 0{,}101}{3{,}6\cdot 3{,}78\cdot 10^{-3}}}{1 + \dfrac{0{,}8\cdot 0{,}17\cdot 10^{-3}\cdot 0{,}101\cdot 1440}{3{,}6\cdot 3{,}78}} \times$$

$$\times \frac{\dfrac{1440\cdot 3{,}5\ 10^{-3}}{3{,}6\ 3{,}78\ 10^{-3}} + \dfrac{0{,}8\cdot 0{,}101\cdot 0{,}65\cdot 10^{-2}}{3{,}6\cdot 3{,}78\cdot 10^{-3}}}{\dfrac{3{,}78\cdot 10^{-3}}{10^{-3}}} = 0{,}69\ ;$$

$$\varphi_{к} = 2\varphi_{ср} - \varphi_{н} = 1{,}38 - 0{,}65 = 0{,}73$$

Для второго периода

$$\varphi_{ср}^{II} = \frac{0{,}5\cdot 0{,}65 + 0{,}8\cdot 1{,}05\cdot 10^{-2}\,\dfrac{0{,}101}{2{,}64\cdot 10^{-3}} + \dfrac{0{,}8\cdot 0{,}17\cdot 10^{-3}\cdot 0{,}101}{3{,}6\cdot 2{,}64\cdot 10^{-3}}}{1 + \dfrac{0{,}8\cdot 0{,}17\cdot 10^{-3}\cdot 0{,}101\cdot 1440}{3{,}6\cdot 2{,}64}} \times$$

$$\times \frac{\dfrac{1440\cdot 2{,}61\cdot 10^{-3}}{3{,}6\ 2{,}64\cdot 10^{-3}} + \dfrac{0{,}8\cdot 0{,}101\cdot 0{,}65\cdot 10^{-2}}{3{,}6\cdot 2{,}64\cdot 10^{-3}}}{\dfrac{2{,}64\cdot 10^{-3}}{10^{-3}}} = 0{,}7\ .$$

$$\varphi_{к} = 2\cdot 0{,}7 - 0{,}65 = 0{,}75\ .$$

Для третьего периода

$$\varphi_{ср}^{III} = \frac{0{,}5\cdot 0{,}65 + 0{,}8\cdot 9{,}36\cdot 10^{-3}\,\dfrac{0{,}101}{2{,}34\cdot 10^{-3}} + \dfrac{0{,}8\cdot 0{,}17\cdot 10^{-3}\cdot 0{,}101\cdot 1440}{3{,}6\cdot 2{,}34\cdot 10^{-3}}}{1 + \dfrac{0{,}8\cdot 0{,}17\cdot 10^{-3}\cdot 0{,}101\cdot 1440}{2{,}34}} \times$$

$$\times \frac{\dfrac{2{,}33\cdot10^{-3}}{3{,}6\cdot2{,}34\cdot10^{-3}} + \dfrac{0{,}8\cdot0{,}101\cdot0{,}65\cdot10^{-2}}{3{,}6\cdot2{,}34\cdot10^{-3}}}{\dfrac{2{,}34\cdot10^{-3}}{10^{-3}}} = 0{,}71.$$

$$\varphi_к = 2\cdot0{,}71^{-0{,}65} = 0{,}77$$

Для четвертого периода

$$\varphi_{ср}^{IV} = \frac{0{,}5\cdot0{,}6 + 0{,}8\cdot8{,}12\cdot10^{-3}\,\dfrac{0{,}101}{2{,}2\cdot10^{-3}} + \dfrac{0{,}8\cdot0.17\cdot10^{-3}\cdot 0{,}101\cdot1440\cdot2{,}08}{3{,}6\cdot2{,}2\cdot10^{-3}}}{1 + \dfrac{0{,}8\cdot0{,}17\cdot10^{-3}\cdot0{,}101\cdot1440}{3{,}6\cdot2{,}2}} \times$$

$$\times \frac{\dfrac{10^{-3}}{3{,}6\cdot2{,}2\cdot10^{-3}} + \dfrac{0{,}8\cdot0{,}101\cdot0{,}65\cdot10^{-2}}{3{,}6\cdot2{,}2\cdot10^{-3}}}{\dfrac{2{,}2\cdot10^{-3}}{10^{-3}}} = 0{,}67$$

$$\varphi_к = 2\ 0{,}67 - 0{,}6 = 0{,}73$$

6. Вычисляем необходимые теплопроизводительности нагревательных приборов $Q_{об}$, устанавливаемых в рабочих помещениях (камерах), и калориферов $Q_{кал}$, используемых для подогрева воздуха на входе в выработки.

Формула (61) при $t_к = t_н$ и $Q_{абс} = -Q_{эл} + Q_{пор}$ ($Q_{эл} = 500$ Вт) принимает вид

$$Q_{об} = -Q_{эл} + Q_{пер} - k_т U_{выр} l (T_e - t_i).$$

Величину $Q_{кал}$ определим по формуле (54) при $i_н - i_н^0 = c_в (t_н - t_н^0)$, где $t_н^0 = 8^oC$.

Для первого периода:

$$Q_{кал} = 3{,}6\cdot1005\,(28 - 8) = 72360 \text{ Вт};$$

$$Q_{пер} = 7{,}5\cdot2{,}5\cdot1{,}4\,(28 - 8) = 525 \text{ Вт (см. формулу 60)};$$

$$Q_{об} = -500 + 525 - 0{,}635\cdot1440\,(12 - 28) = 14655 \text{ Вт};$$

$$\Sigma Q = 72{,}4 + 14{,}7 = 87{,}1 \text{ кВт}.$$

Для второго периода:

$Q_{кал} = 3{,}6 \cdot 1005 (22 - 8) = 50662$ Вт;

$Q_{пер} = 18{,}75 \cdot 1{,}4 (22 - 8) = 368$ Вт (см. формулу 60);

$Q_{об} = -500 + 368 - 0{,}186 \cdot 1440 (12 - 22) = 2546$ Вт;

$\Sigma Q = 50{,}7 + 2{,}5 = 53{,}2$ кВт.

Для третьего периода:

$Q_{кал} = 3{,}6 \cdot 1005 (20 - 8) = 43416$ Вт;

$Q_{пер} = 18{,}75 \cdot 1{,}4 (20 - 8) = 315$ Вт (см. формулу 60);

$Q_{об} = -500 + 315 - 0{,}085 \cdot 1440 (12 - 20) = 794$ Вт;

$\Sigma Q = 43{,}4 + 0{,}79 = 44{,}2$ кВт

Для четвертого периода:

$Q_{кал} = 3{,}6 \cdot 1005 (19 - 8) = 39800$ Вт;

$Q'_{пер} = 18{,}75 \cdot 1{,}4 (19 - 8) = 289$ Вт (см. формулу 60);

$Q_{об} = -500 + 289 - 0{,}059 \cdot 1440 (12 - 19) = 95$ Вт;

$\Sigma Q = 39{,}8 + 0{,}095 = 39{,}9$ кВт.

Максимальные и минимальные затраты энергии на обеспечение заданных параметров микроклимата в 34 рабочих помещениях составят соответственно 2960 и 1360 кВт.

Вычисление длины теплоаккумулирующих выработок для подогрева наружного воздуха в зимний период времени

1. Суммарный расход воздуха для проветривания каждого рабочего участка с учетом вентиляции подсобных помещений равен 80 $м^3/с$. Воздухопадающую выработку выбираем сечением 39 $м^2$, периметром 25,4 м.

2. Рассчитываем коэффициент нестационарного теплообмена.

По формуле (17) определяем коэффициент теплоотдачи

При $d_{эк} = \frac{4 \cdot 39}{25{,}4} = 6{,}14$ м; $Re = \frac{2{,}05 \cdot 6{,}19}{13{,}5 \cdot 10^{-6}} = 9{,}4 \cdot 10^5$; $\epsilon_{ш} = 1{,}5$; $\lambda_{в} = 0{,}024$ Вт/

/(м·°С); $\alpha = 0{,}029 \cdot 1{,}5 \frac{0{,}024}{6{,}14} (9{,}4 \cdot 10^5)^{0{,}8} = 10{,}2$ Вт/(м²·°С).

По формулам (24), (34) при $Bi = 39{,}3$ $Bi' = 39{,}7$; $F_0 = 4{,}6$; $Pd = 6{,}8$ вычисляем $k_{\Sigma\tau}$ и Δk_{τ}°

$$k_{\Sigma\tau} = \frac{10{,}2}{1 + 39{,}3 \ln (1 + \sqrt{3{,}14 \cdot 4{,}6})} = 0{,}164 \text{ Вт/(м}^2 \cdot {}^{\circ}\text{С)};$$

$$\Delta k_\tau = \left[0{,}75\,\frac{39{,}3}{39{,}7} + 1{,}26\,(6{,}8)^{0{,}5}\left(\frac{39{,}3}{39{,}7}\right)^2\right]\frac{1{,}05}{4{,}04} = 1{,}04\ \text{Вт/(м}^2\cdot{}^\circ\text{C)}.$$

3. По формулам (51), (63), (64) вычисляем величины $c_{эф}$, $A_{ак}$, $B_{ак}$ при $\varphi_{ср} = 0{,}7$ и $n'_{апр} = 0{,}295$

$$c_{эф} = 1006 + 2470 \cdot 0{,}7 \cdot 0{,}295 = 1516\ \text{Дж/(кг}\cdot{}^\circ\text{C)};$$

$$A_{ак} = \frac{1{,}04 \cdot 25{,}4}{1{,}3 \cdot 80 \cdot 1516} = 1{,}68 \cdot 10^{-4};$$

$$B_{ак} = \frac{0{,}5 \cdot 0{,}164 \cdot 25{,}4\,(12 + 2 - 7{,}8)}{1{,}3 \cdot 80 \cdot 1516} = 8{,}19 \cdot 10^{-5};$$

$$B_{ак}/A_{ак} = \frac{8{,}19 \cdot 16^{-5}}{1{,}68 \cdot 10^{-4}} = 0{,}49.$$

4. По формуле (62) определяем величину $l_{ак}$

$$l_{ак} = \frac{1}{1{,}68 \cdot 10^{-4}} \ln\left(\frac{-4{,}8 - 0{,}5\,(12 - 2 + 7{,}8) - 0{,}49}{6 - 0{,}5\,(12 - 2 + 7{,}8) - 0{,}49}\right) = 8520\ \text{м}.$$

При расходе воздуха 20 $м^3/с$ необходимая длина теплоаккумулирующей выработки снижается до 2260 м.

Тепловой расчет распределительного подземного холодильника вместимостью 10 000 т

Исходные данные для теплового расчета

Распределительный подземный холодильник вместимостью 10000 т располагается в известняке. Горные породы, окружающие выработки, характеризуются следующими свойствами: плотность 2600 $кг/м^3$, весовая влажность 7%, коэффициент теплопроводности 1,43 Вт/(м·°С), коэффициент температуропроводности 6,33 х х 10^{-7} $м^2/с$, удельная теплоемкость 871 Дж/(кг·°С). Естественная температура горных пород — плюс 8°С (при расчетах приняты теплофизические свойства талых и мерзлых пород одинаковыми).

Геометрические параметры горных выработок следующие: высота камер 5 м, длина 15 м, ширина 7 м, сечение камер имеет прямоугольную форму. Ширина целика между камерами составляет 10 м. Расходы холода на термическую обработку продуктов по камерам с температурами 0 —,10°С, — 20°С, —30°С составляют $Q_{техн} = 165$ кВт.

Задачами тепловых расчетов являются:

1. Вычисление расхода холода для поддержания в эксплуатационный период в производственных помещениях холодильника температур $0^{\circ}C$, $-10^{\circ}C$, $-20^{\circ}C$ и $-30^{\circ}C$.

2. Определение длительностей предэксплуатационных периодов формирования заданных температурных режимов в производственных помещениях.

Вычисление расхода холода для поддержания в эксплуатационный период в производственных помещениях холодильника температур $0^{\circ}C$, $-10^{\circ}C$, $-20^{\circ}C$ и $-30^{\circ}C$.

1. По формуле (60) определяем потери холода через перемычки $Q_{пер}$.

Принимаем коэффициент теплоотдачи в соответствии с данными СНиП II-3-79** равным 6 Вт/(м$^2\cdot^{\circ}$C). При $b_{пер} = 0{,}25$ м; $\lambda_{пер} = 0{,}8$ Вт/(м $^{\circ}$C); $\delta_{из} = 0{,}1$ м; $\lambda_{из} = 0{,}07$ Вт/(м$\cdot^{\circ}$C) коэффициент теплопередачи, вычисленный по формуле (48), равен:

$$k_{пер} = \frac{1}{2/6 + 0{,}25/0{,}8 + 0{,}1/0{,}07} = 0{,}48 \text{ Вт/(м}^2\cdot^{\circ}\text{C)}.$$

При температуре воздуха в грузовом коридоре плюс $8^{\circ}C$ *потери холода через перемычки равны:*

для камер с $t_к = 0^{\circ}C$ (3 камеры)

$$Q_{пер} = 0{,}48\cdot 3\cdot 2\cdot 7\cdot 7\,(8 + 0) = 806 \text{ Вт};$$

для камеры с $t_к = -10^{\circ}C$ (1-я камера)

$$Q_{пер} = 0{,}48\cdot 2\cdot 5\cdot 7\,(8 + 10) = 605 \text{ Вт};$$

$\delta = 1{,}68\cdot F\,(0{,}8) = 1{,}68\cdot 4{,}7 = 7{,}9$; $R_t = 7{,}9\cdot 3{,}82 = 30{,}2$ м;

для камер с $t_к = -20^{\circ}C$

$k_т = 0{,}4$; $K_0 = 1{,}35$, $k_а = k_\epsilon = 1$; $k_\beta = 0{,}5$; erf (0,5) $= 0{,}52$; $k_{агр\,ц} = 1{,}2$; $\xi = 2{,}2$; $\delta = 7{,}7$, $R_t = 29$ м;

для камеры с $t_к = -30^{\circ}C$

$k_т = 0{,}27$; $K_0 = 0{,}9$; $k_а = k_\epsilon = 1$; $k_\beta = 0{,}648$; erf (0,648) $= 0{,}64$; $k_{агр.ц} = 1{,}13$; $\xi = 2{,}52$; $\delta = 6{,}8$; $R_t = 26$ м;

для камеры с $t_к = 0^{\circ}C$

$k_{агр} = 1$, а δ рассчитываем по формуле (28)

$$\delta = 0{,}837 \ln 2{,}64\left[2{,}72\left(1 + \sqrt{3\cdot 2{,}74}\right)\right] = 8{,}3;\ R_t = 8{,}4\cdot 3{,}82 = 32 \text{ м}.$$

2. По формуле (24) вычисляем коэффициент нестационарного теплообмена

$$k_т = \frac{6}{1 + 16 \ln (1 + \sqrt{3 \cdot 2{,}74})} = 0{,}265 \text{ Вт/(м}^2 \cdot {}^\circ\text{C)}.$$

3. По формуле (32) определяем поправки к коэффициенту нестационарно теплообмена, учитывающие тепловое взаимодействие камер.

Для камер с $t_к = -20^\circ C$ $R_t = 29$ м. Поэтому в тепловое взаимодействие дет вовлечено две соседние камеры, так как $h_{выр} = 10 + 7 = 17$ м. По форму (32) при $t_1 = t_i$ и $r_{эк_1} = r_{эк_i}$ получим

$$c_т = \frac{7{,}7 \ln \frac{17}{3{,}82} - 0{,}637\left(\frac{17}{3{,}82} + 1\right) 1{,}3 + 1}{7{,}7 \ln (7{,}7) + 1 - 7{,}7} = 0{,}87 ;$$

для камер с $t_к = -20^\circ C$ (9 камер)

$$Q_{пер} = 0{,}48 \cdot 9 \cdot 2 \cdot 5 \cdot 7 (8 + 20) = 8470 \text{ Вт};$$

для камеры с $t_к = -30^\circ C$ (1 камера)

$$Q_{пер} = 0{,}48 \cdot 2 \cdot 5 \cdot 7 (8 + 30) = 1280 \text{ Вт};$$

$$\Sigma Q_{пер} = 11{,}2 \text{ кВт}.$$

4. Вычисляем коэффициенты интенсификации теплообмена при агрегатных п реходах $k_{агр}$ и радиус теплового влияния каждой камеры на 2-й год эксплуатаци

Определяем эквивалентный радиус каждой камеры $r_{эк}$ и числа подобия Bi Fo.

$$r_{эк} = \frac{2(5 + 7)}{2 \cdot 3{,}14} = 3{,}82 ; \quad Bi = \frac{6 \cdot 3{,}82}{1{,}43} = 16 ; \quad F_0 = \frac{6{,}33 \cdot 10^{-7} \cdot 17520 \cdot 3600}{(3{,}82)^2} = 2{,}74.$$

Величины $k_{агр}$, ξ, δ определяем по формулам (39) – (43).

Для камеры с $t_к = -10^\circ C$

$$k_т = 8/10 = 0{,}8 ; \quad K_0 = \frac{335200 \cdot 0{,}07 \cdot 2600}{871 \cdot 2600 \cdot 10} = 2{,}7 ; \quad k_a = k_\epsilon = 1 ;$$

$$k_\beta = \frac{-0{,}494 \cdot 0{,}8 + \sqrt{0{,}244 (0{,}8)^2 + 1{,}55 \cdot 2{,}7 + 1{,}11 + 0{,}48}}{1{,}77 \cdot 2{,}7 + 1{,}25 \cdot 0{,}8 + 0{,}54} = 0{,}32 ;$$

$\text{erf}(0{,}32) = 0{,}35$;

$$k_{агр_ц} = 1 + \frac{1 - (1 + 0{,}8) 0{,}35}{(1 + 0{,}8) 0{,}35 (1 + 0{,}5\sqrt{2{,}74})} = 1{,}32 ;$$

$$\xi = (1 + \sqrt{3 \cdot 2,74}) \frac{1}{(1+0,8)\ 1,32} \operatorname{erf}\left\{-\frac{1}{16}\left[1 - \frac{1}{(1+0,8)\ 1,32}\right]\right\} =$$

$$= 1,68;$$

$$E\left[\frac{2\sqrt{17/3,82}}{(1+17/3,82)}\right] = E(0,774) = 1,3 \text{ (см. прил. 5)}.$$

Для камеры с $t_к = -30^\circ C$. Камера попадает в зону теплового влияния выработок с $t_к = -10^\circ C$ ($R_t = 30,2$ м) и $t_к = -20^\circ C$ ($R_t = 29$ м).

По формуле (32) при $r_{эк_1} = r_{эк_1}$ получим.

$$c'_\tau = 1 - \frac{-10-8}{-30-8}\left[1 - \frac{7,9 \ln(17/3,82) - 0,637(17/3,82+1)\ 1,3+1}{7,9 \ln(7,9) + 1 - 7,9}\right] = 0,94;$$

$$c''_\tau = 1 - \frac{-20-8}{-30-8}\left[1 - \frac{7,7 \ln(17/3,82) - 0,637(17/3,82+1)\ 1,3+1}{7,7 \ln(7,7) + 1 - 7,7}\right] = 0,9.$$

Для камеры с $t_к = -10^\circ C$. Камера попадает в зону влияния выработки с $t_к = -30^\circ C$

$$c_\tau = 1 - \frac{-30-8}{-10-8}\left[1 - \frac{6,8 \ln(17/3,82) - 0,637(17/3,82+1)\ 1,3+1}{6,8 \ln(6,8) + 1 - 6,8}\right] = 0,65.$$

Для камеры $t_к = 0^\circ C$. Камера попадает в зону влияния выработок с $t_к = -20^\circ C$ и $t_к = 0^\circ C$ ($R_t = 32$ м)

$$c'_\tau = 1 - \frac{-20-8}{0-8}\left[1 - \frac{7,7 \ln(17/3,82) - 0,637(17/3,82+1)\ 1,3+1}{7,7 \ln(7,7) + 1 - 7,7}\right] = 0,545;$$

$$c''_\tau = \frac{8,3 \ln(17/3,82) - 0,637(17/3,82+1)\ 1,3+1}{8,3 \ln(8,3) + 1 - 8,3} = 0,89.$$

5. Вычисляем величины коэффициентов нестационарного теплообмена с учетом теплового взаимодействия выработок.

Для камер с $t_к = -20^oC$.

$k_т = 0,265 \cdot 0,87 \cdot 0,87 = 0,2$ Вт/ (м$^2 \cdot ^oC$).

Для камеры с $t_к = -30^oC$

$k_т = 0,265 \cdot 0,94 \cdot 0,9 = 0,224$ Вт/ (м$^2 \cdot ^oC$).

Для камеры с $t_к = -10^oC$

$k_т = 0,265 \cdot 0,65 = 0,172$ Вт/ (м$^2 \cdot ^oC$).

Для камеры с $t_к = 0^oC$

$k_т = 0,265 \cdot 0,545 \cdot 0,89 = 0,128$ Вт/ (м$^2 \cdot ^oC$).

6. Определяем по формуле (85) потери холода при теплообмене с окружающими рабочие помещения горными породами.
Поверхность рабочих помещений составляет:

$F_{выр} = 15 \cdot 2 (5 + 7) = 360$ м^2.

Для рабочих помещений с $t_к = -20^oC$ (9 камер)

$Q_п = 1,2 \cdot 0,2 \cdot 360 (8 + 20) \ 9 = 21,8$ кВт.

Для рабочих помещений с $t_к = -10^oC$ (1 камера)

$Q_п = 1,32 \cdot 0,172 \cdot 360 (8 + 10) = 1,48$ кВт.

Для рабочих помещений с $t_к = 0^oC$ (3 камеры)

$Q_п = 0,128 \cdot 360 (8 + 10) \ 3 = 1,1$ кВт.

Для рабочих помещений с $t_к = -30^oC$ (1 камера)

$Q_п = 1,13 \cdot 0,224 \cdot 360 (8 + 30) = 3,46$ кВт;

$\Sigma Q_п = 27,8$ кВт.

7. Рассчитываем потери холода при теплообмене с воздушной средой в грузовых коридорах (3 коридора, $t = +8^oC$). Принимаем среднюю температуру пород, окружающих грузовые коридоры -15^oC; сечение грузовых коридоров — 20 м^2, периметр — 18 м, длину — 100 м.

Величины k_τ и $k_{агр}$, вычисленные по формулам (24), (41) при Bi = 12 и Fo = 4,86 составляют 0,3 Вт/(м²·°С) и 1,25.

$$Q'_п = 1{,}25 \cdot 0{,}3 \cdot 100 \cdot 18\,(8 + 15)\ 3 = 46{,}6\ кВт.$$

8. Общий расход холода на теплообмен с окружающей средой и технологические нужды вычисляем по формулам (83)

$$Q_{об} = 11{,}2 + 27{,}8 + 46{,}6 + 165 = 250{,}6\ кВт.$$

Определение длительности предэксплуатационных периодов формирования заданных температурных режимов в производственных помещениях

Для поддержания в рабочих помещениях заданного температурного режима принимаем систему с непосредственным охлаждением на основе фреона 22. Тогда формула (82), связывающая холодопроизводительность оборудования, установленного в камерах, с плотностью теплового потока при $\Delta t_к = 10^{\circ}C$, $m_х = 0{,}045$, $F_{выр} = 360\ м^2$ принимает вид:

$$q_{уд} = \frac{0{,}0564\, Q_{об}}{8 - t_к}\left[1 - 0{,}7 \exp\left(0{,}045\, t_к\right)\right].$$

Для рабочего помещения с $t_к = -20^{\circ}C$ $Q_{об}$ составляет

$$Q_{об} = Q_{пер} + Q_п + Q_{техн} + Q'_п = 0{,}94 + 2{,}42 + 18{,}3 + 3{,}3 = 25\ кВт.$$

Тогда

$$q_{уд} = \frac{0{,}0564 \cdot 25 \cdot 10^3}{8 + 20}\left[1 - 0{,}7 \exp\left(-0{,}045\ 20\right)\right] = 36\ Вт/м^2.$$

По формуле (80) при $\frac{b}{b_{цел}} = 0{,}7$ и $t_к = -20^{\circ}C$ (см. табл. 4); $k_д = 1{,}2$;

вычисляем $\tau'_{п.эк}$

$$\tau_{п.эк} = 1{,}2\frac{0{,}75 \cdot 1{,}43^2 \cdot 8^2 + 1{,}43 \cdot 6{,}33 \cdot 10^{-7} \cdot 2600\,(2 \cdot 871 \cdot 8 + 335 \cdot 10^3}{6{,}33 \cdot 10^{-7}\,(36)^2}\ldots$$

$$\frac{\text{x } 0{,}07)\ 20}{} = 2{,}72 \cdot 10^6\ с = 31\ сут.$$

Для рабочего помещения с $t_к = -30^oC$

$$Q_{об} = 1{,}28 + 3{,}46 + 18{,}3 + 3{,}3 = 26{,}3 \text{ кВт};$$

$$q_{уд} = \frac{0{,}0564 \cdot 26{,}3 \cdot 10^3}{38} [1 - 0{,}7 \exp(-0{,}045 \cdot 30)] = 32 \text{ Вт/м}^2.$$

По формуле (80) при $\frac{b}{b_{цел}} = 0{,}7$ и $t_к = -30^o$, $k_д = 1{,}28$

$$\tau_{п.эк} = 1{,}28 \frac{0{,}75 \cdot 1{,}43^2 \cdot 8^2 + 1{,}43 \cdot 6{,}33 \cdot 10^{-7} \cdot 2600 (2 \cdot 871 \cdot 8 + 335 \cdot 10^3 \cdot 0{,}07)\, 30}{6{,}33 \cdot 10^{-7} (32)^2} =$$

$$= 5{,}41 \cdot 10^6 \text{ с} = 63 \text{ сут.}$$

Для рабочего помщения с $t_к = -10^oC$

$$Q_{об} = 0{,}605 + 1{,}48 + 18{,}3 + 3{,}3 = 23{,}7 \text{ кВт};$$

$$q_{уд} = \frac{0{,}0564 \cdot 23{,}7 \cdot 10^3}{18} [1 - 0{,}7 \exp(-0{,}045 \cdot 10)] = 41 \text{ Вт/м}^2;$$

$$\tau_{п.эк} = 1{,}07 \frac{0{,}75 \cdot 1{,}43^2 \cdot 8^2 + 1{,}43 \cdot 6{,}33 \cdot 10^{-7} \cdot 2600 (2 \cdot 871 \cdot 8 + 335 \cdot 10^3 \cdot 0{,}07)\, 10}{6{,}33\, 10^{-7} (41)^2} =$$

$$= 9{,}8 \cdot 10^5 \text{ с} = 11{,}4 \text{ сут.}$$

Для рабочего помещения с $t_к = 0^oC$

$$Q_{об} = 0{,}27 + 0{,}37 + 18{,}3 + 3{,}3 = 22{,}2 \text{ кВт};$$

$$q_{уд} = \frac{0{,}0564 \cdot 22{,}2 \cdot 10^3}{8} [1 - 0{,}7 \exp(-0{,}045 \cdot 0)] = 47 \text{ Вт/м}^2.$$

Определяем по формуле (79) величину $q_{исп}$. Используем для вычисления $P_{нас}$, S, $\lambda_{m_в}$, $\beta_п$ формулы (2), (6), (9), (20). При этом примем значение влажности воздуха в камере $\varphi_к = 0{,}9$, а $t_{ср} = 0{,}5 (8 + 0) = 4^oC$.

$$P_{нас}(4^{\circ}C) = 1{,}33\cdot10^{-4}\left(\frac{360+18{,}7\cdot4}{236+4}\right) = 8{,}14\cdot10^{-4}\ \text{МПа},$$

$$S = (2500 - 2{,}38\cdot4)\ 10^{3} = 2{,}49\cdot10^{6}\ \text{Дж/кг},$$

$$\lambda_{m_b} = 4{,}16\ 10^{10}\ \frac{(4+273)^{1{,}89}}{0{,}101} = 1{,}7\cdot10^{-4}\ \text{кг/(м·с·МПа)};$$

$$\beta_{п} = 6\frac{1{,}7\cdot10^{-4}}{2{,}48\cdot10^{-2}} = 4{,}1\cdot10^{-2}\ \text{кг/(м}^2\ \text{с·МПа)};$$

$$q_{исп} = 2{,}49\cdot10^{6}\cdot4{,}1\cdot10^{-2}\cdot 8{,}14\ 10^{-4}(1-0{,}9) = 8{,}31\ \text{Вт/м}^2.$$

По формуле (78) вычисляем $\tau_{п.эк}$:

$$\tau_{п.эк} = \left[\frac{(8-0)\ 1{,}43}{2(47-8{,}31)}\right]\ \frac{3{,}14}{6{,}33\cdot10^{-7}} = 1{,}08\cdot10^{5}\ \text{с} = 1{,}25\ \text{сут}.$$

Параметры воздуха в складских и автотранспортных объектах

Объекты	Параметры воздушной среды		
	температура $t_в$, °С	относительная влажность воздуха $\varphi_в$, %	скорость движения воздуха $v_в$, м/с
Зернохранилища и хранилища муки (крупы) в таре	10–12	65–70	До 0,3
Склады оборудования и другие склады общего назначения	5–20	До 70	+
Склады цветных и черных металлов	Не регламентируется	До 80	+
Склады бумажной продукции	До 25	До 75	+
Хранилища сухих марочных вин	10–12	85–90	До 0,3
Хранилища крепких и десертных марочных вин	13–15	85–90	До 0,3
Помещения для выдержки шампанских вин (в бутылках)	10–15	Не регламентируются	
Хранилища мокросоленого кожевенного сырья	До 18	70–80	До 0,3
Хранилища пресно-сухого кожевенного сырья	До 18	65–70	До 0,3
Хранилища хлопка-волокна и шерсти	+	До 70 (до 90-кратковременно	+
Продуктовые склады	До 20	70–80	До 0,3
Грибницы	12–14	85–90	+
Книгохранилища	16–20	50–60	+
Помещения для стоянки автомобилей	Ниже 5	До 75	+
Холодильники	+	+	+

Примечание. Знаком "плюс" показаны случаи, когда параметры принимаются в соответствии с нормами для наземных объектов.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Тепло- и влагофизические характеристики горных пород

Таблица 1

Теплофизические характеристики горных пород

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

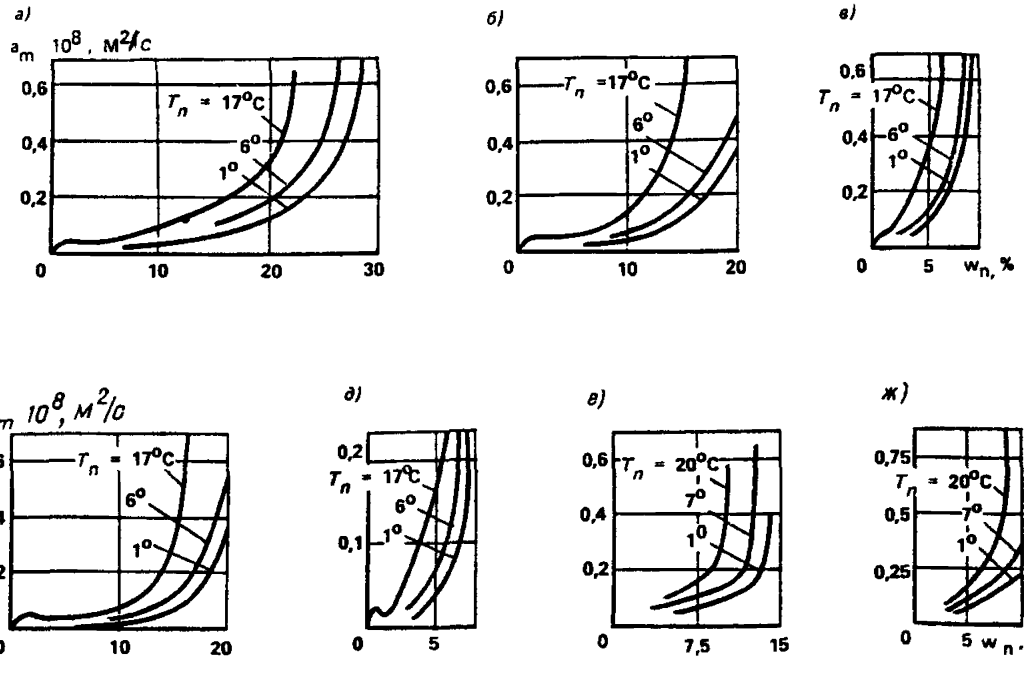
Таблица 2

Теплофизические характеристики некоторых типов горных пород в талом и мерзлом состояниях

Порода	Влажность $w_п$, %	Плотность $\rho_п$, кг/м^3	Удельная теплоемкость $c_п$, кДж/ / (кг·с)	Коэффициент теплопроводности $\lambda_п \cdot 10^3$, кВт/ (м·с)	Коэффициент температуропроводности $a_п \cdot 10^7$, м^2/с
Песок	5	1200	1,0/0,92	0,47/0,6	3,9/5,6
	10	1200	1,13/0,92	0,72/0,92	5,3/8,1
	5	1400	1,0/0,88	0,66/0,8	4,7/6,4
	10	1400	1,1/0,92	1,0/1,95	6,7/9,2
	15	1400	1,21/1,0	1,16/1,57	6,9/10,6
	15	1600	1,21/1,1	1,45/1,86	7,5/11,9
	15	1800	1,21/0,96	1,8/2,2	8,3/12,5
	15	2000	1,21/0,96	2,2/2,56	8,3/13,1
Супесь	10	1200	1,13/0,92	0,44/0,52	3,3/4,7
	10	1400	1,1/0,92	0,84/0,8	3,9/6,1

Продолжение прил. 2

Порода	Влажность $w_п$, %	Плотность $\rho_п$, кг/м^3	Удельная теплоемкость $c_п$, кДж/(кг·с)	Коэффициент теплопроводности $\lambda_п \cdot 10^3$, кВт/(м·с)	Коэффициент температуропроводности $a_п \cdot 10^7$, м^2/с
	15	1600	1,21/0,96	1,1/1,28	5,6/8,3
	15	1800	1,21/0,96	1,38/1,52	6,4/8,6
	15	2000	1,21/0,96	1,63/1,74	6,7/8,9
Суглинки	10	1400	1,10/0,92	0,51/0,79	3,3/6,1
и глины	15	1400	1,21/1,00	0,65/0,98	3,9/6,9
	20	1400	1,34/1,05	0,76/1,09	4,2/7,5
	20	1600	1,34/1,05	1,02/1,30	4,7/7,8
	20	1800	1,34/1,05	1,10/1,40	4,7/8,1
	20	2000	1,34/1,05	1,44/1,70	5,6/8,6
Уголь	3	1400	1,05	0,29/0,3	1,9/1,9
	10	1450	1,26/1,13	0,3/0,41	1,9/2,5
Песчаник	3	2500	0,84/0,84	2,6/2,6	12,2/12,2
	6	2500	0,92/0,88	2,7/2,8	11,7/12,8
Глинистый	2	2500	0,84	1,7/1,7	8,3/8,3
и песчаный и сланцы	6	2500	0,92	1,86/1,98	8,1/8,6



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

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

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Термодинамические свойства воздуха

Термодинамические свойства воздуха при давлении 0,101 МПа

Таблица

t, °C	Теплофизические свойства сухого воздуха					$P_{нас}$, МПа	$k_{нас}$, кг/м³
	$\rho_в$, кг/м³	$c_в$, кДж/(кг·°C)	$\lambda_в$, Вт/(м·°C)	$a_в \cdot 10^6$, м²/с	$\nu_в \cdot 10^6$, м²/с		
−20	1,396	1,009	2,28	16,2	12,79	1,23	1,1
−18	1,385	1,009	2,3	16,4	12,72	1,48	1,3
−16	1,374	1,009	2,31	16,7	12,65	1,74	1,5
−14	1,363	1,009	2,33	16,9	12,57	2,06	1,7
−12	1,353	1,009	2,34	17,2	12,5	2,44	2,0
−10	1,342	1,009	2,36	17,4	12,43	2,85	2,3
−8	1,332	1,009	2,38	17,7	12,6	3,265	2,7
−6	1,322	1,008	2,39	18	12,77	3,83	3,1
−4	1,312	1,007	2,41	18,2	12,94	4,48	3,6
−2	1,303	1,006	2,42	18,6	13,11	5,24	4,2
0	1,293	1,005	2,44	18,8	13,28	6,09	4,9
2	1,284	1,005	2,45	19	13,46	7,05	5,6
4	1,275	1,005	2,47	19,3	13,63	8,11	6,4
6	1,265	1,005	2,48	19,5	13,81	9,31	7,3
8	1,256	1,005	2,5	19,8	13,98	10,66	8,3
10	1,248	1,005	2,51	20	14,16	12,25	9,4
12	1,239	1,005	2,53	20,3	14,34	14	10,6
14	1,23	1,005	2,54	20,6	14,52	15,94	12
16	1,222	1,005	2,56	20,8	14,7	18,13	13,6
18	1,213	1,005	2,57	21,1	14,88	20,6	15,3
20	1,205	1,005	2,59	21,4	15,06	23,3	17,2

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Исходные данные для расчета коэффициентов массоотдачи

Коэффициенты массоотдачи с поверхности льда $\beta_л$ и мороженых продуктов $\beta_{прод}$

Поверхность испарения	Коэффициент массоотдачи $\beta \cdot 10^2$; кг/(м²·с·МПа)
Мясо, глазированное льдом при температуре −9 °C	1,29

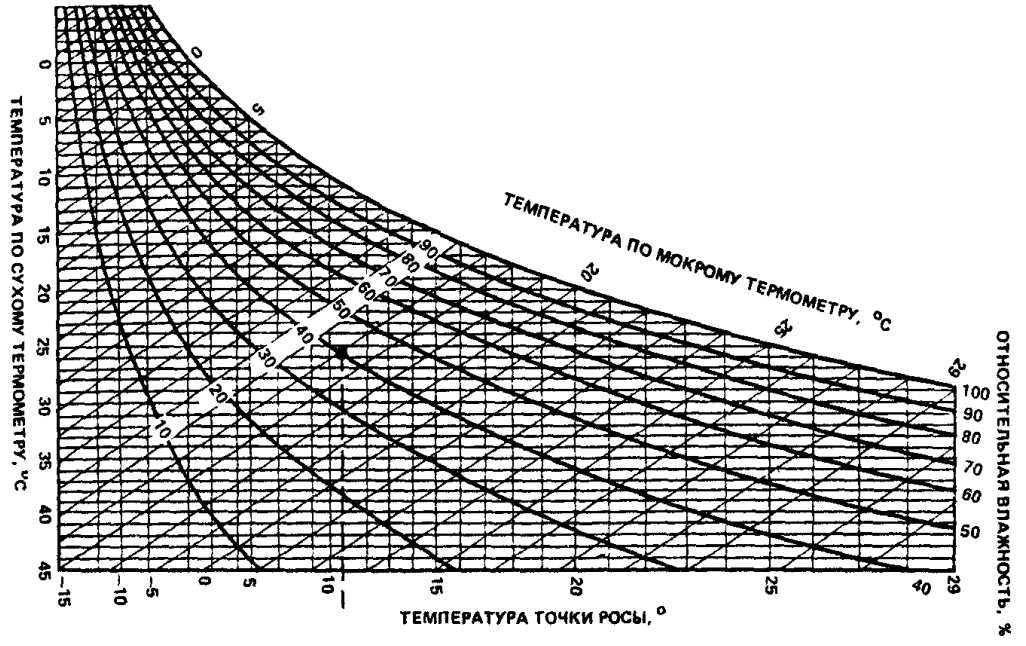
Продолжение табл.

Поверхность испарения	Коэффициент массоотдачи $\beta \cdot 10^2$; кг/ (м^2· с·МПа)
Мороженое мясо средней упитанности	0,815
Ледяные блоки размером 14x16x4 см при температуре −6 ·· −10°С,	1,76 – 2,26
То же при температуре −22 ··· −25°С,	1,59
Ледяная пластина при температуре −10°С	2,09

Таблица 2

Величина параметра $\bar{\mu}$ при различных температурах для некоторых типов горных пород

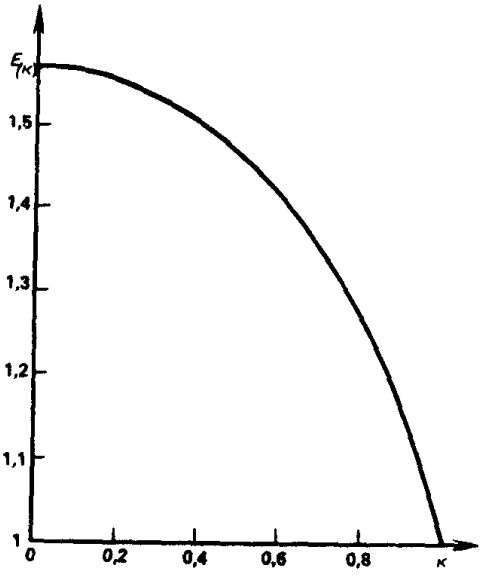
Порода	Температура, °С					
	20	12	8	4	3	1
Крупнообмолочный известняк	0,50	0,76	0,96	1,22	0,98	0,55
Крупноолитовый	0,49	0,75	0,97	1,31	0,96	0,55
Мелкоолитовый	0,39	0,62	0,82	1,21	0,86	0,47
Детритовый	0,42	0,56	0,74	1,06	0,88	0,51
Уплотненный	0,37	0,47	0,57	0,71	0,68	0,6
Плотный	0,56	0,81	0,98	1,29	0,95	0,55
Кристаллический	0,29	0,44	0,55	0,79	0,63	0,35
Среднезернистый песчаник	0,12	0,23	0,33	0,47	0,37	0,2
Мелкозернистый	0,04	0,07	0,12	0,2	0,17	0,09
Арктикский туф	0,42	0,51	0,57	0,75	0,71	0,53
Гипс	–	0,08	0,09	0,13	0,1	0,04



Психрометрическая диаграмма

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

Значения полного эллиптического интеграла II рода E (K)



Значения полного эллиптического интеграла II рода E (K).

Значения коэффициентов $n'_{апр}$, $k'_{апр}$, $m'_{апр}$, $l'_{апр}$

Значения коэффициента $n'_{апр}$ для различных диапазонов изменения температуры

Δt, °C	$n'_{апр}$	Δt, °C	$n'_{апр}$
−40 ··· −30	0,01	15 – 20	0,83
−30 ··· −20	0,05	15 – 25	0,95
−20 ··· 10	0,09	20 – 25	1,10
−10 ··· 0	0,19	20 – 30	1,32
0 ··· 10	0,40	25–30	1,40
5 ··· 15	0,53	25 – 35	1,69
10 ··· 15	0,56	30 – 35	1,37
10 ··· 20	0,72	30 – 40	2,02

Таблица 2

Значения $k'_{апр}$, $m'_{апр}$, $l'_{апр}$ для различных диапазонов изменения температуры

Δt °C	$k'_{апр}$	$m'_{апр}$	$l'_{апр}$	$\frac{m'_{апр}}{l'_{апр}}$
−30 ··· −20	2,892	0,146	0,002	1446
−25 ··· −15	3,112	0,166	0,00244	1275
−20 ··· −10	3,496	0,21	0,0037	945
−15 ·· −5	3,688	0,242	0,005	737
−10 ··· 0	3,77	0,269	0,00676	558
−5 ·· +5	3,77	0,281	0,00916	412
0 ... 10	3,77	0,266	0,012	314
5 ... 15	3,96	0,209	0,0158	251
10 ... 20	4,68	0,089	0,0206	227
15 ... 25	5,42	−0,114	0,0264	244
20 ... 30	9,82	−0,424	0,0334	294
25 ... 35	16,6	−0,94	0,0432	384
30 ... 40	29,6	−1,76	0,056	529
40 ... 50	103,18	−5,44	0,102	1012
50 ... 60	335,2	−14,63	0,193	1737

gost.e-ecolog.ru