

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Политехнический институт

Кафедра «Инженерная экология и безопасность жизнедеятельности»

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____ Т.А. Кулагина
подпись

«____» _____ 2019 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Обоснование использования воздушной замораживающей системы
плотины на вечномерзлом основании

20.04.01 «Техносферная безопасность»

20.04.01.03 «Чрезвычайные ситуации в техносфере»

Научный руководитель _____ д.т.н., профессор Г.И. Кузнецов

подпись, дата

Выпускник _____ Ю.С. Лапаух

подпись, дата

Рецензент _____ канд.тех.наук И.В. Варфоломеев

подпись, дата

Красноярск 2019

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Политехнический институт

Кафедра «Инженерная экология и безопасность жизнедеятельности»

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____ Т.А. Кулагина
подпись

«____» _____ 2019 г.

**ЗАДАНИЕ
НА ВЫПУСКНУЮ
КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ
в форме магистерской диссертации**

Студенту Лапаух Юлии Сергеевне
Группа ФЭ17-09М
Направление (специальность) 20.04.01 Техносферная безопасность.
Программа 20.04.01.03 Чрезвычайные ситуации в техносфере
Тема магистерской диссертации «Обоснование использования воздушной
замораживающей системы плотины на вечномерзлом основании».

Утверждена приказом по университету № 15498/с от 25.10.2017 г.

Руководитель ВКР Г.И. Кузнецов, доктор технических наук, профессор

Исходные данные для ВКР:

- мерзлотная плотина-аналог в р. Саха,
- научная и справочная литература;
- научные работы.

Перечень разделов ВКР:

- воздушные замораживающие системы (ВЗС): конструктивные решения и методы расчета;
- применение ВЗС для создания специальных сооружений в криолитозоне и предложения по созданию мерзлых островов;
- оценка риска при возведении плотины с мерзлотной завесой;
- технико-экономическое обоснование использования воздушной замораживающей системы;

Перечень графического и иллюстративного материала с указанием основных чертежей, плакатов:

- Лист 1 – Расчетное сечение мерзлотной плотины-аналога в р. Саха
- Лист 2 – Сравнение результатов расчетов и измерений (для аналога)
- Лист 3 – Графики расчета и измерения температуры в теле и основании плотины-аналога
- Лист 4 – Конструкция мерзлотной подпорной стены
- Лист 5 – Схема плотины с воздушной мерзлотной завесой
- Лист 6 – Схема формирования мерзлого подпорного сооружения

Научный руководитель

подпись

Г.И. Кузнецов

Задание принял к исполнению

подпись

Ю.С. Лапаух

«___» ____ 2019 г.

КАЛЕНДАРНЫЙ ГРАФИК

выполнения этапов ВКР

Наименование и содержание этапа	Сроки выполнения
Назначение темы диссертации Составление плана диссертации	25.10.17 – 30.11.17
Сбор и анализ исходной документации и литературы	01.12.17 – 31.12.17
Литературный обзор имеющихся методов воздушного замораживания грунта	01.01.18 – 30.04.18
Постановка основной задачи, освоение расчетных методик	01.05.18 – 31.12.18
Выполнение расчетов, технико-экономических показателей, оформление результатов, составление выводов	01.01.19 – 31.03.19
Графическое оформление чертежей	01.04.19 – 31.05.19
Оформление расчетно-пояснительной записи	01.06.19 – 30.06.19
Оформление прочей документации	01.07.19 – 16.07.19

Руководитель ВКР

подпись

Г.И. Кузнецов

Задание принял к исполнению

подпись

Ю.С. Лапаух

« ____ » _____ 2019 г.

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа по теме «Обоснование использования воздушной замораживающей системы плотины на вечномерзлом основании» содержит 83 страницы, включает 20 таблиц, 21 рисунок, 24 литературных источника и 6 листов графического материала.

**ЗАЩИТНАЯ ДАМБА, ВЕЧНОМЕРЗЛЫЙ ГРУНТ,
ЗАМОРАЖИВАЮЩАЯ КОЛОНКА, ЗАМОРАЖИВАНИЕ, МЕРЗЛЫЙ
ОСТРОВ, ВОЗДУШНАЯ МЕРЗЛОТНАЯ ЗАВЕСА, ПОДПОРНАЯ СТЕНА.**

Объект исследования – мерзлотная плотина-аналог р. Саха (Якутия)

Цели работы:

- рассмотреть два практически применимых способа расчета указанных устройств, провести сравнительные расчеты для аналогов и для вновь предлагаемой конструкции защитного терморегулирующего сооружения;
- привести предложения по созданию устройства защитных, причальных и ограждающих сооружений на прибрежных и шельфовых территориях Крайнего Севера.

В результате выполнения магистерской диссертации были рассмотрены способы использования известных, проверенных на практике и экологически безопасных технических решений в новом, более эффективном сочетании без применения энергозатратных технологий, что крайне важно для условий Арктики, приведены расчеты для аналогов и для вновь предлагаемой конструкции защитного терморегулирующего сооружения, проведен расчет риска при возведении плотины с мерзлотной завесой.

В заключении сформулированы выводы по магистерской диссертации – рассмотрены практически применимые способы расчета устройств, выдвинуты предложения по созданию мерзлых островов, приведены расчетные формулы для оценки риска при возведении плотины с мерзлотной завесой.

АННОТАЦИЯ
к выпускной квалификационной работе
на тему: Обоснование использования воздушной замораживающей
системы плотины на вечномерзлом основании

ВКР выполнена на 83 страницы, включает 20 таблиц, 21 рисунок, 24 литературных источника.

Объектом исследования является мерзлотная плотина-аналог р. Саха (Якутия).

Целью исследования является рассмотреть практически применимые способы расчета устройств, выдвинуть предложения по созданию мерзлых островов, провести расчет риска при возведении плотины с мерзлотной завесой, привести технико-экономическое обоснование использования воздушной замораживающей системы.

В магистерскую диссертацию входит введение, четыре главы, итоговое заключение по работе.

Во введении раскрывается актуальность выпускной квалификационной работы по выбранному направлению, ставится проблема, цель и задачи;

В первой главе даны конструктивные решения и расчеты;

Во второй главе рассмотрено практическое применение воздушных замораживающих устройств;

В третьей главе приведена оценка риска при возведении плотины с мерзлотной завесой;

В четвертой главе технико-экономическое обоснование использования воздушной замораживающей системы;

В заключении сформулированы выводы по выпускной квалификационной работе.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	8
1 Воздушные замораживающие системы (ВЗС). Конструктивные решения и методы расчета.....	9
1.1 Общая характеристика.....	9
1.2 Теплотехнический расчет мерзлотной завесы плотины с учетом взаимного влияния колонок (двухмерная задача).....	10
1.3 Метод МГУ.....	16
1.4 Метод Р.М. Каменского.....	22
2 Применение воздушных замораживающих систем (ВЗС) для создания специальных сооружений в криолитозоне.....	37
2.1 Мерзлотная плотина.....	37
2.2 Мерзлотная подпорная стенка для укрепления размываемых берегов.....	39
2.3 Предложения по созданию мерзлых островов.....	42
3 Оценка риска при возведении плотины с мерзлотной завесой.....	50
3.1 Общие положения, термины и определения.....	50
3.2 Интегральная оценка опасности аварии сооружения с мерзлотной установкой.....	53
3.3 Интегральная оценка уязвимости сооружения с мерзлым устройством ..	60
3.4 Интегральная оценка риска аварии сооружения с мерзлотной установкой.....	66
3.5 Расчет риска аварий сооружения с мерзлотной установкой.....	70
4 Технико-экономическое обоснование использования воздушной замораживающей системы.....	76
Заключение.....	79
Список использованных источников.....	80
Приложение А (Данные для расчета).....	81

ВВЕДЕНИЕ

За последние годы в связи с очевидным потеплением климата, усиливаются процессы оттаивания вечномерзлых толщ, особенно содержащих крупные ледяные включения. В то же время льдистые массивы особенно прибрежные используются для прокладки -нефте и газопроводов, устройства причалов, временных и постоянных дорог и т.д. Всем этим сооружениям необходимо обеспечить устойчивость и надежность. Это достигается прежде всего использованием устройств, в которых применяется естественный холодный воздух (воздушные колонки, термосифоны и др.).

Проблема освоения прибрежных территорий и шельфа арктических морей становится все более актуальной по ряду причин (добыча углеводородов, судоходство, энергетика, оборона, и др.).

Сооружения из местных материалов – грунта, камня, льда – начали использовать для освоения шельфа раньше чем сооружения из стали и бетона. Они не потеряли своего значения и в современных условиях, получив в связи с прогрессом в области строительной техники распространение в новых, более суровых по климату районах [1].

Намораживаемые острова и причалы, а также защитные устройства гидротехнических сооружений предназначаются обычно для односезонного использования. Тем не менее делаются попытки сохранить такие острова для использования их в течение нескольких сезонов с помощью обсыпки грунтом, теплоизоляции пенопластовыми плитами, искусственного замораживания и др. В целом имеются различные возможности для создания новых способов устройства искусственных островов и берегоукрепления в Арктике. Одно из таких решений предложено ранее [2] при решении задачи обеспечения повышенной надежности защитных дамб в сложных мерзлотно-геологических условиях для строительства причалов, при формировании прибрежных территорий, в частности полуостровов, оснований нефтепроводов и др.

1 Воздушные замораживающие системы (ВЗС). Конструктивные решения и методы расчета

1.1 Общая характеристика

Замораживание грунта производится путем отвода тепла из промораживаемой толщи с помощью буровых скважин (колонок), оборудованных теплообменниками. В условиях, когда в течение продолжительного периода температура наружного воздуха оказывается достаточно низкой (от -20 до -40) используется естественное охлаждение хладоносителя наружным воздухом. Такие устройства работают зимой и их называют сезоннодействующими охлаждающими устройствами. Под влиянием работы замораживающей колонки, вокруг нее создается столб мерзлого грунта, диаметр которого со временем увеличивается.

Скорость увеличения мерзлого столба зависит от величины потока тепла отводимого теплообменником в атмосферу, и потока, поступающего от охлаждаемого (или замораживаемого) грунта к системе охлаждения.

При расположении замораживающих колонок в ряд, начинается их тепловое взаимодействие между соседними колонками, что приводит к смыканию замороженных столбов грунта между собою и образованию сплошной мерзлотной стенки [3].

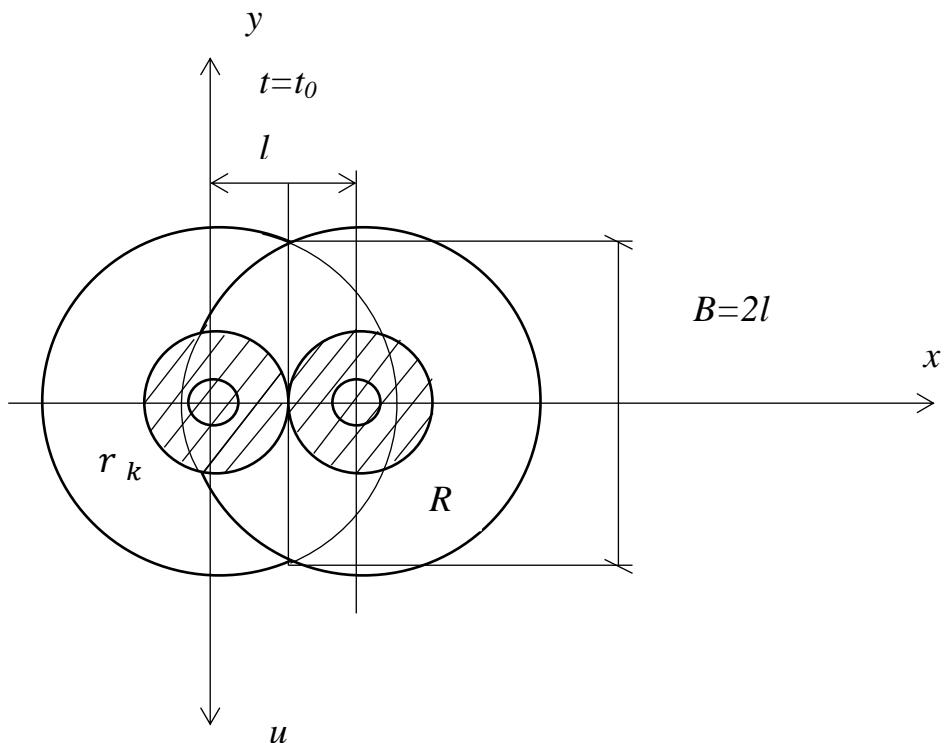
Воздушная колонка представляет собой заглубленное в грунт теплообменное устройство типа труба в трубе. Циркуляция атмосферного воздуха по трубам осуществляется за счет естественной конвекции, возникающей в результате разности температур давлений столбов воздуха во внутренней трубе и кольцевом канале. Колонки с естественной циркуляцией включаются и выключаются автоматически: циркуляция возможна лишь при условии, если $t_{cp} > t_e$.

1.2 Теплотехнический расчет мерзлотной завесы плотины с учетом взаимного влияния колонок (двухмерная задача)

Для определения продолжительности работы замораживающей системы до момента смыкания мерзлотных цилиндров и образования сплошной мерзлотной завесы заданной толщины, рекомендуется формула 1.2, учитывающая взаимное влияние соседних колонок.

На рисунке 1.2 для перехода от трехмерной задачи к двухмерной в плоскости, перпендикулярной оси колонки принимались:

- вертикальный градиент температуры в грунте равный нулю;
- температура воздуха в сечении, перпендикулярном оси колонки, постоянна в течение расчетного периода времени;
- начальная температура грунта и его физические характеристики одинаковы во всем массиве грунта.



Аналитическое решение задачи промораживания о взаимном влиянии колонки невозможно, поэтому были использованы теория и методы подобия и решение большого числа частных задач с их последующим обобщением [3].

В результате получено исходное критериальное уравнение, связывающее в общем виде искомый критерий F_o с определяющими, и представлено формулой 1.2:

$$F_0 = f \left(B_i, K_0 \left[\frac{t_{\text{в}}}{t_0} \right], \frac{l}{r_k} \right); \quad (1.2)$$

Ниже приведены расчетные формулы 1.3, 1.4 и 1.5 критерия Фурье (безразмерного времени), критерия Био и критерия Коссовича:

$$\text{где: } F_0 = \frac{\lambda_M \tau}{C_M r^2 k} - \text{критерий Фурье (безразмерное время)}; \quad (1.3)$$

$$B_i = \frac{\alpha_1 d_k}{\lambda_M} - \text{критерий Био}; \quad (1.4)$$

$$K_0 = \frac{q}{C_M [t_{\text{в}}]} - \text{критерий Коссовича}; \quad (1.5)$$

где: λ_M – коэффициент теплопроводности мерзлого грунта, ккал/(м · ч · град);

C_M – объемная теплоемкость мерзлого грунта, ккал/(м³ · град);

r_k, d_k – внешний радиус и диаметр замораживающей колонки, м;

τ – продолжительность работы замораживающей системы, ч;

l – шаг колонок, м;

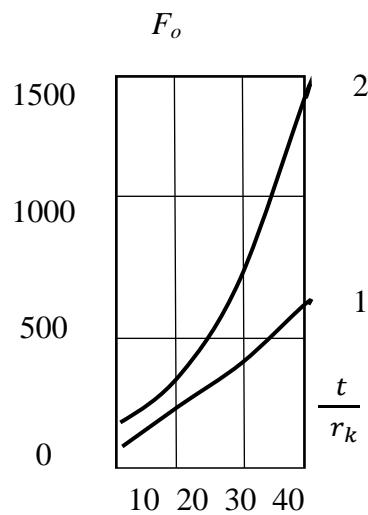
$t_{\text{в}}$ – средняя за расчетный период температура воздуха в колонке, град;

t_0 – начальная температура грунта, град;

q – затраты тепла на фазовые переходы грунтовой влаги в 1 м³ грунта, ккал/м³;

α_1 – определяется по формуле, данной в расчетном методе МГУ п.1.3, град;

Если нужно определить только время смыкания льдогрунтовых цилиндров при заданном l или время образования мерзлотной завесы шириной $2l$, можно воспользоваться номограммой, выражающей зависимость $F_o = f\left(\frac{l}{r_k}\right)$, представленной на рисунке 1.3.



- 1 – момент смыкания мерзлотных цилиндров;
2 – образование льдогрунтовой стенки $2l$.

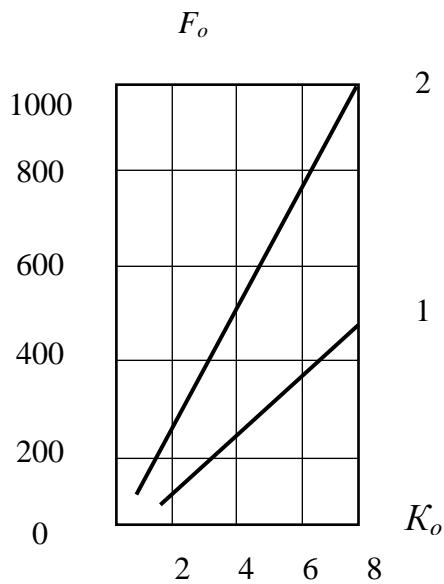
Рисунок 1.3 – Зависимость критерия F_o от безразмерного шага колонок

При экспериментальных и теоретических исследованиях установлено, что продолжительность работы замораживающей системы до момента смыкания льдогрунтовых цилиндров и образования сплошной льдогрунтовой стенки прямо пропорциональна критерию K_o , величина которого определяется затратами тепла на фазовый переход грунтовой влаги, температурой теплоносителя и теплоемкостью грунта [4].

В результате решения серии задач на гидроинтеграторе найдены функции, аппроксимирующие зависимости безразмерного времени (критерий

F_o) от каждого из критериев, определяющих процесс промерзания грунта двумя соседними замораживающими колонками.

На рисунке 1.4 представлена зависимость продолжительность работы замораживающей системы до момента смыкания мерзлотных цилиндров от критерия Коссовича.



$$1 - \text{при } \frac{l}{r_k} = 15;$$

$$2 - \text{при } \frac{l}{r_k} = 20;$$

Рисунок 1.4 – Зависимость продолжительность работы замораживающей системы до момента смыкания мерзлотных цилиндров от критерия Коссовича;

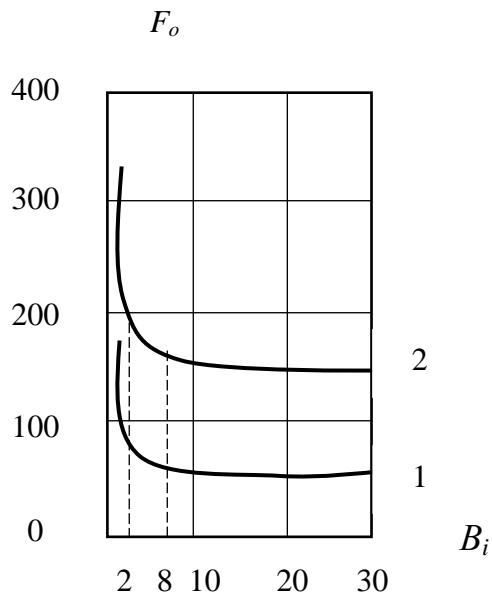
Получены формулы для определения F_o для момента смыкания мерзлотных цилиндров и для момента образования стенки шириной $2l$.

Вместо таких зависимостей из-за их сложности приводятся номограммы для определения величин $F_o=f(Bi)$, $F_o=f(K_o)$, $F_o=f\left(\frac{l}{r_k}\right)$.

При выборе оптимальных размеров замораживающей системы следует проводить проверку по величине критерия Bi . При малых значениях Bi резко увеличивается продолжительность работы замораживающей системы до момента смыкания льдогрунтовых цилиндров [5].

Увеличение Bi более 6-8 не дает практического эффекта и дано на рисунке 1.5. Приводим соотношение, данное ниже:

$$2 < Bi < 8; \quad (1.6)$$



$$1 - \text{при } \frac{l}{r_k} = 15;$$

$$2 - \text{при } \frac{l}{r_k} = 20;$$

Рисунок 1.5 – Зависимость продолжительности работы замораживающей системы до момента смыкания мерзлотных цилиндров от критерия Био;

На рисунке 1.6 приведена номограмма в наиболее вероятном диапазоне изменения критериев F_o , Bi , K_o . При определении критериев F_o , Bi , K_o предполагается, что расчет отдельных параметров замораживающей колонки уже произведен.

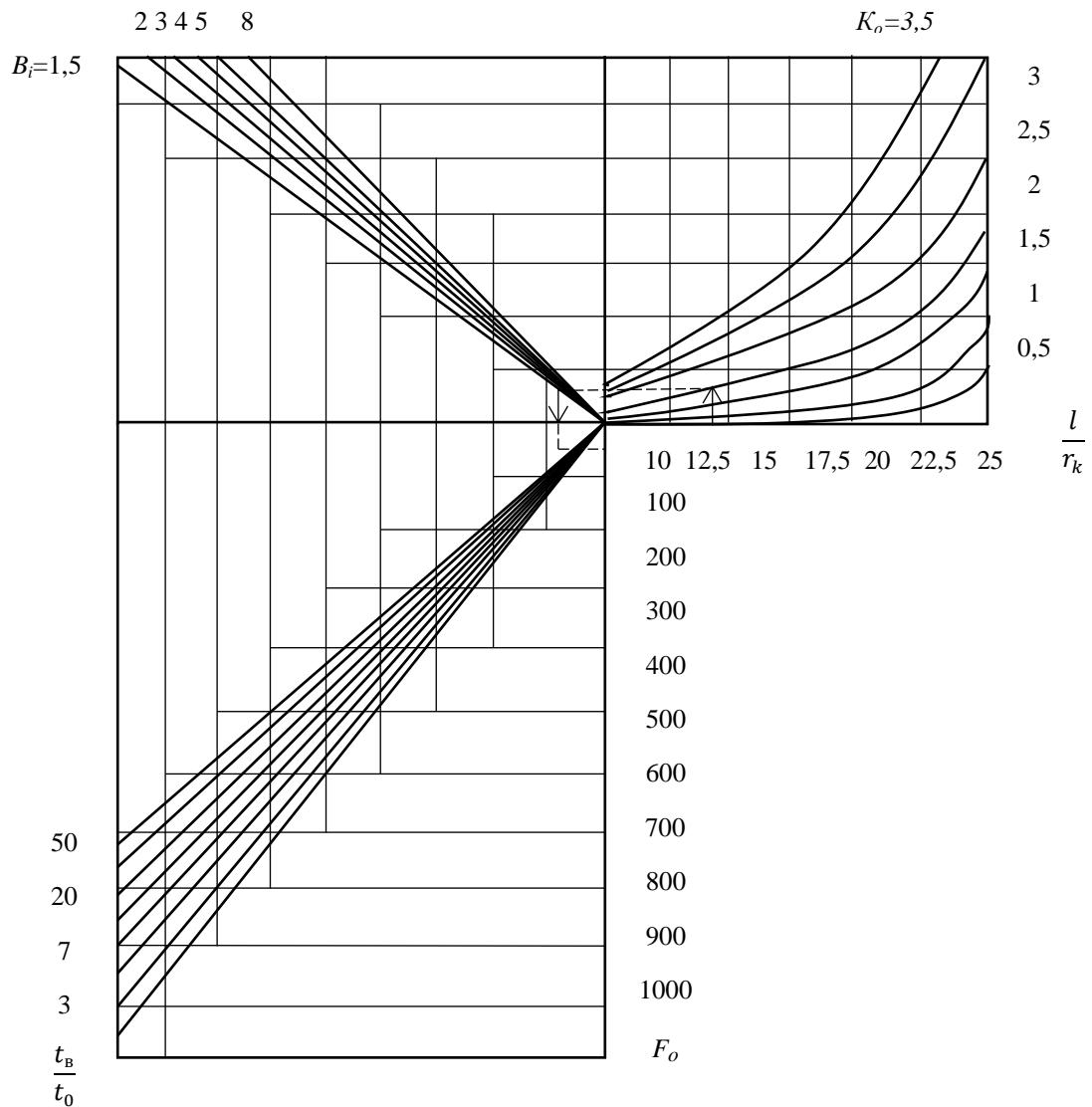


Рисунок 1.6 – Номограмма наиболее вероятных изменений определяющих критериев

Оптимальность принятых параметров воздушной замораживающей колонки может быть проверена по условию С.М. Филипповского, приведенного при помощи формулы 1.7:

$$\frac{\lambda_m \cdot h}{C_b Q_{\rho T}} < 0,3 \quad (1.7)$$

где: C_b – объемная теплоемкость воздуха;
 Q – расход воздуха;
 h – длина колонки;
 ρ_t – термическое сопротивление стенок колонок;

1.3 Метод МГУ

Теоретические основы метода разработаны на кафедре «Мерзлотоведения» МГУ и приведены в учебном пособии [6].

Для сравнительной оценки метода можно воспользоваться результатами расчетов, приведенных в [7]. Эти расчеты выполнены для условий «классической» вечной мерзлоты Якутии. Основные характеристики этого региона представлены в [8]. Ниже приведены исходные данные для сравнительных расчетов разными методами.

Расчет глубинного охлаждения грунта. Методика расчета радиуса охлаждения грунта вокруг замораживающей колонки осуществляется по nomogrammам.

Для определения радиуса охлаждения следует использовать выражение 1.3.1:

$$r_f = \eta_a \cdot r_p ; \quad (1.3.1)$$

где: r_f – радиус охлаждения, м;
 r_p – внешний радиус замораживающей колонки, м;

η_a – безразмерный параметр, определяемый по номограмме в зависимости от значений безразмерных параметров b, M, H_a , которые определяются по формулам. По формуле 1.3.2 находим безразмерный параметр b :

$$b = \left(\frac{\lambda_f}{r_p} \right) \cdot R_{\text{вн}}; \quad (1.3.2)$$

где: $R_{\text{вн}}$ – внутреннее термическое сопротивление колонки теплообмену, $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$.

Внутреннее термическое сопротивление колонки теплообмену рассчитывается по формуле:

$$R_{\text{вн}} = \frac{1}{\alpha_{\text{вн}}}; \quad (1.3.3)$$

где: $\alpha_{\text{вн}}$ – коэффициент теплообмена между рабочим телом и внутренней поверхностью колонки, принимаемый для газообразного рабочего тела 25 $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$.

Для расчета охлаждения приводят формулы 1.3.4 и 1.3.5:

$$M = \frac{T_0 - T_{\text{max}}}{T_{\text{max}} - T_{\text{cp}}} ; \quad (1.3.4)$$

$$H_a = \frac{\lambda_m (T_0 - T_{\text{cp}}) \cdot t_f}{r_p^2 L_0 \rho_m W}; \quad (1.3.5)$$

Для расчета замораживания приводятся формулы 1.3.6 и 1.3.7:

$$M = \frac{\lambda_t (T_0 - T_{\text{rp}})}{\lambda_m (T_{\text{rp}} - T_{\text{cp}})}; \quad (1.3.6)$$

$$H_a = \frac{\lambda_m(T_{gp} - T_{cp})t_f}{r_p^2 L_0 \rho_t W_0}; \quad (1.3.7)$$

где: R_{bh} – внутреннее термическое сопротивление колонки теплообмену, $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$.

λ_m, λ_t – теплопроводность грунта в мерзлом и талом состояниях, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$;

T_{gp} – температура начала замерзания грунта, $^\circ\text{C}$;

T_{max} – максимальная температура грунта в твердомерзлом состоянии, $^\circ\text{C}$;

T_0 – начальная температура грунта у подошвы слоя с годовыми теплооборотами, $^\circ\text{C}$;

T_{cp} – средняя по длине колонки температура рабочего тела ($^\circ\text{C}$), принимаемая для воздушных установок 3 $^\circ\text{C}$;

t_f – продолжительность охлаждения, ч;

L_0 – удельная теплота фазовых превращений вода – лед в расчете на единицу массы, 93 $\text{Вт} \cdot \text{ч}/\text{кг}$;

ρ_t и ρ_m – плотность скелета мерзлого или талого грунта, $\text{кг}/\text{м}^3$;

W – суммарная влажность грунта;

W_0 – содержание незамёрзшей воды при температуре T_0 ;

Для воздушных установок определяется необходимый расход воздуха, подаваемого к колонке, по формуле 1.3.8:

$$G_{a,p} = \frac{1,2 \cdot \pi \cdot r_f^2 \cdot l_p \cdot L_v}{C_{w,b} \cdot \Delta T \cdot t_f}; \quad (1.3.8)$$

где: $G_{a,p}$ – необходимый расход воздуха, $\text{м}^3/\text{ч}$;

l_p – длина подземной части колонки, м;

L_v – количество тепла, отводимого при охлаждении и замораживании 1 м^3 грунта, $\text{Вт} \cdot \text{ч}/\text{м}^3$;

$C_{w,b}$ – объемная теплоемкость рабочего тела, принимается для воздуха 0,39 Вт · ч/м³ · °C;

ΔT – разность температуры на входе и на выходе из колонки, принимается равной для воздуха 6 °C;

Количество тепла, отводимого при охлаждении и замораживании 1 м³ грунта, рассчитывается по формулам 1.3.9 и 1.3.10:

$$L_v = L_0 \cdot \rho_{d,f} \cdot W; \quad (1.3.9)$$

$$L_v = L_0 \cdot \rho_{d,th} \cdot w_0; \quad (1.3.10)$$

Далее приводим результаты расчетов по методу МГУ:

$$R_{\text{BH}} = \frac{1}{\alpha_{\text{BH}}} = \frac{1}{25} = 0,04 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Bt};$$

$$b = \left(\frac{2}{0,106} \right) \cdot 0,04 = 0,755;$$

для охлаждения:

$$M = \frac{4 - (-8)}{-8 - 3} = \frac{12}{-11} = -1,09;$$

$$H_a = \frac{2((4 - 3) \cdot 40)}{0,106^2 \cdot 93 \cdot 1,7 \cdot 20} = 2,25;$$

На рисунке 1.3.1 приведена номограмма для расчета радиуса охлаждения или оттаивания вокруг вертикального цилиндрического стока или источника тепла [9].

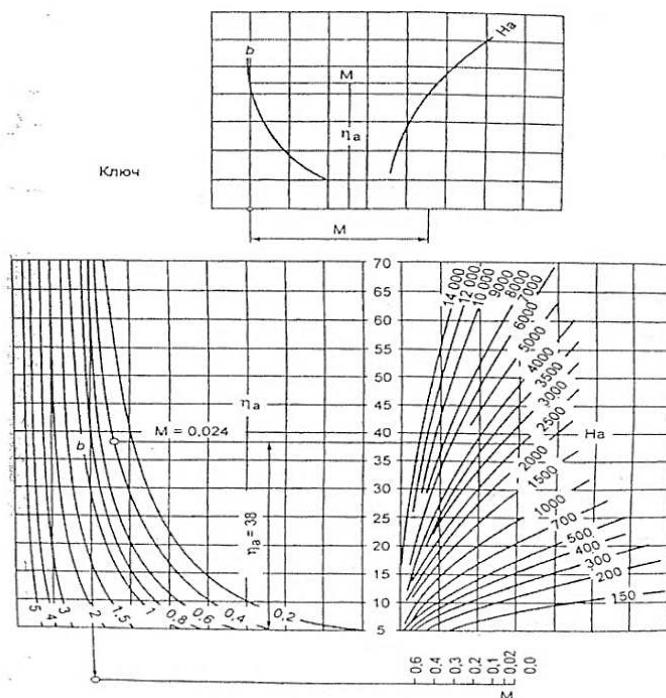


Рисунок 1.3.1 – Номограмма для расчета радиуса охлаждения или оттаивания вокруг вертикального цилиндрического стока или источника тепла

В таблице 1.3.1 приведено время охлаждения грунта до начала его смерзания.

Таблица 1.3.1 – Время охлаждения грунта до начала его смерзания

№ п/п	Наименование процесса	Температура окружающего воздуха, °C		
		- 5 °C	-10 °C	-30 °C
		Продолжительность процесса, мин.		
1	смерзание грунта внутри отсыпки	120 – 150	90 – 120	40 – 50

На рисунке 1.3.2 представлены кривые содержания незамерзшей воды в зависимости от величины T_o начальной температуры грунта у подошвы слоя с годовыми темплооборотами, °С.

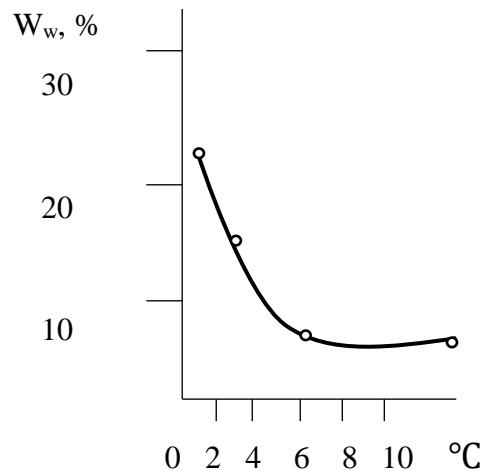


Рисунок 1.3.2 – Кривые содержания незамерзшей воды в зависимости от величины T_o начальной температуры грунта (суглинок) у подошвы слоя с годовыми темплооборотами, °С

для замораживания:

$$M = \frac{\lambda_{th}(T_0 - T_{bf})}{\lambda_f(T_{bf} - T_{in})} = \frac{2(4 + 2,5)}{2 \cdot (-2,5 - 3)} = -1,2$$

$$H_a = \frac{\lambda_f(T_{bf} - T_{in})t_f}{r_p^2 L_0 \rho_{d,t} w_{tot}} = \frac{2(-2,5 - 3) \cdot 40}{0,106^2 \cdot 93 \cdot 1,7 \cdot 10} = -24,8$$

В таблице 1.3.2 приведены температурные показатели начала смерзания грунта, представленные ниже:

Таблица 1.3.2 – Температурные показатели начала замерзания грунта

№ п/п	Грунты	Температура начала замерзания грунта $T_{\text{з}}$, °C, при концентрации порового раствора $C_{\text{р}}$, доли единицы					
1	суглинки и глины	0	0,005	0,01	0,02	0,03	0,04
		-0,2	-0,6	-1,1	-1,8	-2,5	-3,2

Для воздушных установок определяется необходимый расход воздуха, подаваемого к колонке:

$$G_{a,p} = \frac{1,2 \cdot 3,14 \cdot 0,0395^2 \cdot 1,8 \cdot 3162}{0,39 \cdot 6 \cdot 40} = 0,36 \text{ м}^3/\text{ч};$$

$$G_{a,p} = \frac{1,2 \cdot 3,14 \cdot 0,0395^2 \cdot 1,8 \cdot 1581}{0,39 \cdot 6 \cdot 40} = 0,2 \text{ м}^3/\text{ч};$$

Количество тепла, отводимого при охлаждении и замораживании 1 м³ грунта, Вт · ч/м³:

$$L_v = 93 \cdot 1,7 \cdot 20 = 3162 \text{ Вт} \cdot \text{ч}/\text{м}^3;$$

$$L_v = 93 \cdot 1,7 \cdot 10 = 1581 \text{ Вт} \cdot \text{ч}/\text{м}^3;$$

1.4 Метод Р.М. Каменского

Для примера принят проектный вариант плотины на р. Сытыкан.

Параметры системы колонок в русловой части плотин:

r_k – внешний радиус колонки 0,106 м;

r_1 – внешний радиус питающей трубы 0,0665 м;

δ_2 – толщина стенки питающей трубы 0,004 м;

δ_1 – толщина стенки колонки 0,006 м;

h – длина колонки 31 м;

λ – коэффициент теплопроводности стенок труб 40 ккал/(ч · м · град);

l – шаг колонок 1,5 м;

$$r_{\text{экв.}} = r_k - r_1 = 0,106 - 0,0665 = 0,0395 \text{ м};$$

Параметры грунта в центральной части тела плотины (ядра) суглинок:

W – влажность 20 %;

γ – объемная масса 2 т/м³;

λ_m – коэффициент теплопроводности мерзлого грунта 2 ккал/м · ч · град;

C_m – объемная теплоемкость мерзлого грунта 480 ккал/м³ · град;

t_0 – начальная температура грунта 4 °C;

$t_{\text{гр}}$ – средняя расчетная температура грунта охлаждения грунта –8 °C;

Параметры воздуха:

Q – расход воздуха 558 м³/ч;

V_1 – скорость в кольцевом пространстве колонки 8,9 м/с;

V_2 – скорость в питающей трубе 12,6 м/с;

$t_{\text{в}}$ – температура воздуха -31 °C;

$C_{\text{в}}$ – теплоемкость 0,3393 ккал/м³ · град;

$\lambda_{\text{в}}$ – теплопроводность 0,01915 ккал/м³ · град;

ϑ – кинематическая вязкость $0,9494 \cdot 10^{-5}$ м²/с;

Pr – критерий Прандтля 0,722;

Принимаем $C_{\text{в}}, \lambda_{\text{в}}, \vartheta, Pr$ – при условии, что $t = t_{\text{в}}$;

Условия оптимальности параметров замораживающей колонки определяются по формулам 1.4.1, 1.4.2, 1.4.3, 1.4.4, 1.4.5 и 1.4.6 представленным ниже:

$$\frac{\lambda_m \cdot h}{C_{\text{в}} \cdot Q \cdot \rho_T} < 0,3; \quad (1.4.1)$$

$$\rho_T = \frac{\lambda_M}{\lambda} \cdot \ln \frac{r_1}{r_1 - \delta_2} + \frac{\lambda_m}{\alpha_2(r_1 - \delta_2)} + \frac{\lambda_m}{\alpha_1 \cdot r_1}; \quad (1.4.2)$$

$$\alpha_1 = 0,015 \frac{\lambda_B}{2r_{\text{ЭКВ}}} \cdot Pr^{0,4} \cdot Re^{0,8} \left(\frac{r_k}{r_1} \right)^{0,25}; \quad (1.4.3)$$

$$r_{\text{ЭКВ}} = r_k - r_1; \quad (1.4.4)$$

$$Re = \frac{1V_1 \cdot r_{\text{ЭКВ}}}{\vartheta_B}; \quad (1.4.5)$$

$$\alpha_2 = 0,023 \frac{\lambda_B}{2r_1} Pr^{0,4} \cdot Re^{0,8}; \quad (1.4.6)$$

Далее приводим результаты расчета по методу Р.М. Каменского:

$$Re = \frac{2V_1 r_{\text{ЭКВ}}}{\vartheta_B} = \frac{2 \cdot 8,9 \cdot 0,0395}{0,9494 \cdot 10^{-5}} = \frac{0,7031}{0,000009} = 78122,2;$$

$$\begin{aligned} \alpha_2 &= 0,023 \frac{\lambda_B}{2r_1} Pr^{0,4} \cdot Re^{0,8} = 0,023 \cdot \frac{0,01915}{2 \cdot 0,00665} \cdot 0,722^{0,4} \cdot 78122^{0,8} \\ &= 0,023 \cdot 0,144 \cdot 0,877 \cdot 8210,0 = 23,85; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= 0,015 \frac{\lambda_B}{2r_{\text{ЭКВ}}} \cdot Pr^{0,4} \cdot Re^{0,8} \cdot \left(\frac{r_k}{r_1} \right)^{0,25} \\ &= 0,015 \cdot \frac{0,01915}{2 \cdot 0,0395} \cdot 0,722^{0,4} \cdot 78122,2^{0,8} \left(\frac{0,106}{0,00665} \right)^{0,25} \\ &= 0,015 \cdot 0,2424 \cdot 0,877 \cdot 8210,0 \cdot 1,124 = 29,42; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\rho_T &= \frac{\lambda_M}{\lambda} \cdot \ln \frac{r_1}{r_1 - \delta_2} + \frac{\lambda_m}{\alpha_2(r_1 - \delta_2)} + \frac{\lambda_m}{\alpha_1 \cdot r_1} \\
&= \frac{2,0}{40,0} \ln \frac{0,0665}{0,0665 - 0,004} + \frac{2,0}{23,85 \cdot (0,0665 - 0,004)} \\
&+ \frac{2,0}{29,42 \cdot 0,0665} = 0,05 \cdot 0,0583 + 1,34 + 1,02 = 2,36;
\end{aligned}$$

$$\frac{\lambda_m \cdot h}{C_B \cdot Q \cdot \rho_T} < 0,3 \quad \frac{2,0 \cdot 31,0}{0,94 \cdot 558 \cdot 2,36} = 0,138 < 0,3;$$

ρ_T – термическое сопротивление стенки колонки, поэтому режим работы колонки может быть принят.

Срок работы замораживающей системы, необходимые для смыкания льдогрунтовых цилиндров с учетом их взаимного теплового влияния F_0 и образования сплошной льдогрунтовой стенки толщиной, равной удвоенному шагу колонок F_0^{11} , определяются по критериальным уравнениям по формулам 1.4.7 и 1.4.8:

$$F_0 = 0,87 \cdot \exp(-1,66 Bi)^{0,144} \cdot K_0 \cdot \left| \frac{t_0}{T} \right|^{0,113} \cdot \left(\frac{l}{r} \right)^{2,45}; \quad (1.4.7)$$

$$F_0^{11} = 1,13 \cdot \exp(-0,897 Bi)^{0,295} \cdot \frac{t_0}{T} + 2,8 \left(\frac{B\tau}{3,2} \right)^3 - K_0 \left(\sqrt{\frac{l_0}{r}} - 0,08 \frac{l}{r} \right); \quad (1.4.8)$$

где: $F_0 = \lambda_m / C_m r^2$ – искомое число Фурье (безразмерное время), характеризующее динамику роста толщины мерзлотной стенки;

$Bi = \alpha_1 d / \lambda_m$ – критерий Био, определяющий теплоотдачу от воздуха, движущего в кольцевом пространстве колонки в окружающий ее мерзлый грунт;

$K_0 = \rho W_0 / C_M T$ – критерий Коссовича, учитывающий количество теплоты, необходимой для замерзания паровой влаги в 1 м³ грунта, Дж;

l – шаг колонок;

$d = 2r$ – внешний диаметр колонок;

C_m – объемная теплоёмкость мерзлого грунта, Дж/(м³ · °C);

α_1 – коэффициент теплоотдачи от воздуха к стенке труб в кольцевом пространстве колонки, Вт/(м² · °C);

T – температура воздуха, продуваемого через колонку;

t_0 – начальная температура грунта;

λ_m – теплопроводность мерзлого грунта, Вт/(м² · °C);

Для облегчения расчетов, Р.М. Каменским предложены номограммы. Опыт эксплуатации системы замораживания показывает, что шаг колонок следует принимать равным 1,5-2,0 м.

Количество теплоты, выделяющейся при замораживании грунта всеми колонками системы (стенки), определяется по формуле 1.4.9:

$$Q_{ct} = QV_{ct}; \quad (1.4.9)$$

где: Q – количество теплоты, выделяющейся при замораживании 1 м³ грунтами;

V_{ct} – объем мерзлой стенки, который определяется по формуле 1.4.10:

$$V_{ct} = (2/L - \pi r^2) \cdot H; \quad (1.4.10)$$

где: L – длина мерзлотной завесы (стенки);

H – ее средняя высота или средняя высота колонки;

n – число замораживающих колонок;

r – радиус внешней трубы колонки.

Общая холдоотдача в грунт всей стенки q_{ct} при движении воздуха в колонках системы определяется по формуле 1.4.11:

$$q_{ct} = q_0 N; \quad (1.4.11)$$

где: N – общий объем воздуха, необходимого для замораживания грунтов стенки объемом V_{ct} ;

q_0 – холодаотдача 1 м³ воздуха, движущегося по колонке, находим из выражения 1.4.12:

$$q_0 = \rho_b (t_{bx} - t_{vyx}) \cdot c_b; \quad (1.4.12)$$

где: ρ_b и c_b – объемная плотность, кг/м³ и удельная теплоемкость воздуха, Дж/(м³ · °C);

t_{bx} и t_{vyx} – температуры воздуха на входе и выходе из колонок.

Для замораживания грунтов должно быть соблюдено условие, данное выражением 1.4.13:

$$q_{ct} \geq Q_{ct} \geq QN; \quad (1.4.13)$$

Отсюда необходимое количество воздуха для создания мерзлотной завесы, толщиной $2L$ определяется по формуле 1.4.14:

$$N = q_{ct}/Q; \quad (1.4.14)$$

Определение времени смыкания мерзлотных цилиндров или образование мерзлых стенок с учетом взаимного влияния замораживающих колонок.

Данные для расчета:

$$r = 0,106 \text{ м};$$

$$\lambda_T = 2 \text{ ккал/(м} \cdot \text{ч} \cdot \text{град});$$

$$C_m = 480 \text{ ккал/(м}^3 \cdot \text{град});$$

$l=1,5$ м (шаг колонок);

$2l=3$ м – толщина мерзлотной стенки;

Для определения времени смыкания мерзлотных цилиндров и образования мерзлотной стенки используем критерий Фурье, определяемый по формуле 1.4.15:

$$F_O = \frac{\lambda_T \tau}{C_M r_k^2} \text{ или } \tau = \frac{F_O C_M r_k^2}{\lambda_T}; \quad (1.4.15)$$

По номограмме на рисунке 1.3.1 для значения $\frac{h}{r} = \frac{1,5}{0,106} = 14,1$, находим F_O для условия смыкания мерзлотных цилиндров и образования мерзлотной стенки:

$$F_O = 82; \tau = \frac{82 \cdot 480 \cdot 0,106^2}{2} = 221 \text{ ч} = 9,1 \text{ сут.}$$

$$F_O = 170; \tau = \frac{170 \cdot 480 \cdot 0,106^2}{2} = 4584 \text{ ч} = 19,1 \text{ сут.}$$

Сравнение времени, необходимого для смыкания мерзлотных цилиндров при расчете с учетом взаимного влияния колонки и без учета этого влияния [10].

Время, необходимое для смыкания льдогрунтовых цилиндров без учета взаимного влияния замораживающей колонки, определяем по формуле 1.4.15:

$$R_1 = \sqrt[3]{\frac{3\tau_1 t_k r_k \lambda_M}{q} + 0,5 r_k}; \quad (1.4.15)$$

где: $q = 80000 \cdot W_o = 80000 \cdot 0,2 \cdot 1,6 = 25600$;

$$W_0 = W_c \cdot \gamma_{ck};$$

$$t_k = -31^\circ\text{C} + 4^\circ\text{C} = -27^\circ\text{C};$$

$$\lambda_M = 2,4 \text{ ккал}/(\text{м} \cdot \text{ч} \cdot \text{град});$$

Приводим данные расчета, при $\tau_1 = 400$ ч:

$$R_1 = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot 400 \cdot (-27) \cdot 0,106 \cdot 2,4}{25600}} + 0,5 \cdot 0,11 = \sqrt[3]{\frac{8250}{25600}} + 0,05 = 0,75 \text{ м};$$

Следовательно, без учета влияния колонки $\tau_1 = 400$ ч, а с учетом влияния колонки $\tau_1 = 221$ ч.

$K_{уд.} = \frac{400}{221} = 1,8$ – коэффициент увеличения времени смыкания мерзлотных цилиндров без учета влияния замораживающих колонок.

Теплотехнический расчет динамики роста мерзлотной завесы в земляной плотине проводился для расчетного сечения плотины-аналога в республике Саха (Якутия).

Определяем радиусы мерзлотных цилиндров в различные периоды зимнего охлаждения для плотины (высота плотины 10 м).

Данные для расчета:

l – расстояние между центрами колонок 1,5 м;

h – высота колонки 20 м (средняя высота);

t_k – средняя температура внешней поверхности колонки $-20^\circ\text{C} + 4^\circ\text{C} = -16^\circ\text{C}$ (расчетная температура наружного воздуха в период вентилирования -20°C) t_k в предварительных расчетах допускается определять по формуле:

$$t_k = t_{\text{нач}} + 4^\circ\text{C};$$

r_k – внешний радиус колонки 0,11 м;

λ_M – коэффициент теплопроводности мерзлого грунта 1,8 ккал/(м · ч · град);

q – количество тепла, выделяющегося при охлаждении 1 м³ грунта от $t_{\text{нач}}$ до $t_{\text{пр}}$;

$t_{\text{нач}}$ – начальная положительная средняя температура грунта +1°C (принята по местным условиям);

$t_{\text{пр}}$ – предельная температура, до которой следует охладить центральную часть плотины минус 1°C;

W_0 – объемная влажность грунта 0,15;

$\gamma_{\text{ск}}$ – объемная масса скелета грунта 1,7 т/м³;

t_1 – время зимнего охлаждения (первая зима с момента пуска установки);

R_1 – радиус замороженного цилиндра за первый зимний период работы установки в зависимости от радиуса колонки и других данных, определяется по формуле 1.4.16:

$$R_1 = \sqrt[3]{\frac{3\tau_1 t_k r_k \lambda_m}{q}} + 0,5r_k; \quad (1.4.16)$$

где: $q = 80000 \cdot W_c \gamma_{\text{ск}}$, ккал/м³; (1.4.17)

Так как в формуле 1.4.16 два неизвестных R_1 и τ_1 , задаемся одной из величин:

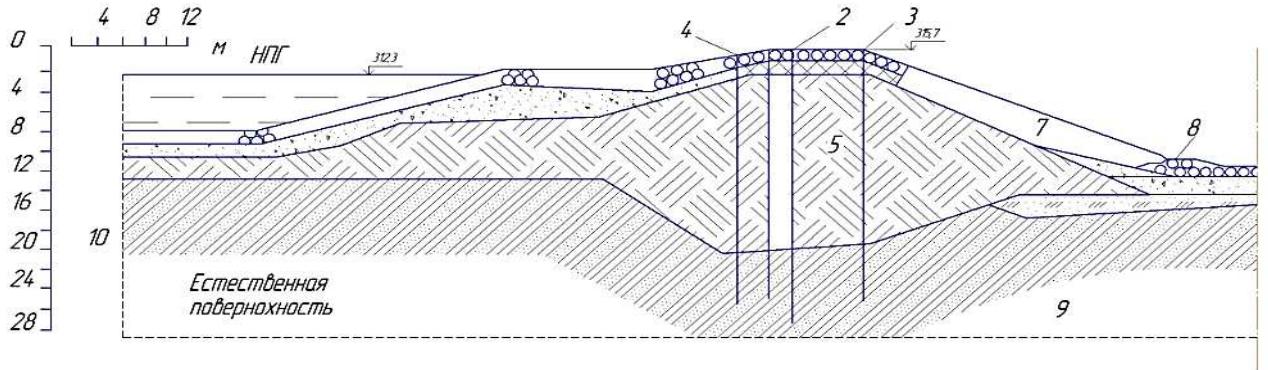
$$\tau_1 = 1000 \text{ ч} = 42 \text{ сут. и } \tau_1 = 1 \text{ месяц } 12 \text{ дней.}$$

Тогда радиус мерзлотного цилиндра будет равен:

$$R_1 = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot 1000 \cdot (-16) \cdot 0,11 \cdot 1,8}{20400}} + 0,5 \cdot 0,11 = 0,78 + 0,06 = 0,84 \text{ м;}$$

где: $q = 80000 \cdot 0,15 \cdot 1,7 = 20400 \text{ ккал/м}^3$;

Поперечный профиль плотины представлен на рисунке 1.4.1, где показано расположение замораживающей колонки и температурных скважин.



- 1 – замораживающая колонка;
- 2,3,4 – температурные скважины;
- 5 – суглинок;
- 6 – коренные полускальные породы;
- 7 – крепление откоса из щебня и каменной наброски;
- 8 – мохоторфяной слой;
- 9 – нижняя граница расчетного сечения (на глубине 42 м от отметки гребня плотины);
- 10 – вертикальная граница расчетного сечения;

Рисунок 1.4.1 – Расчетное сечение плотины-аналога в Республике Саха

С некоторым запасом это время можно принять для смыкания мерзлотных цилиндров радиусом $R_1 = 0,75$ м при $l = 1,5$ м.

Для последующего периода промораживания время τ_2 определяется по формуле 1.4.18:

$$\tau_2 = \frac{80000 \cdot W_o + t_{\text{нав}} C_T - 0,33 \cdot t_k C_M}{-4t_k \lambda_M} \cdot \left(2R_2^2 \ln \frac{R_2}{r_k} - 2R_1^2 \ln \frac{R_1}{r_k} - R_2^2 + R_1^2 \right); \quad (1.4.18)$$

Для второго периода промораживания в течение 2-й и последующих зим принимаем $R_1 = 1$ м.

Задаемся $R_2 = 6$ м; $R_2^2 = 36$ м; $t_k = -20^\circ\text{C}$ (принимаем для 2-ой зимы и последующих охлаждений); $t_{\text{нач}} = +1^\circ\text{C}$.

C_T, C_M – осредненные объемные теплоемкости талого и мерзлого грунта;

$$C_T = 700 \text{ ккал}/\text{м}^3 \cdot \text{град};$$

$$C_M = 456 \text{ ккал}/\text{м}^3 \cdot \text{град};$$

τ_2 – продолжительность второго (любого последующего) зимнего периода охлаждения.

$$\begin{aligned}\tau_2 &= \frac{80000 \cdot 0,15 + (+1) \cdot 700 - 0,33(-20) \cdot 465}{-4(-20) \cdot 1,8} \\ &\cdot \left(2 \cdot 36 \ln \frac{6}{0,11} - 2 \cdot 1^2 \cdot \ln \frac{1,0}{0,11} - 36 + 1 \right) = \frac{9640}{140} \cdot 244,6 \\ &= 16400 \text{ ч:}\end{aligned}$$

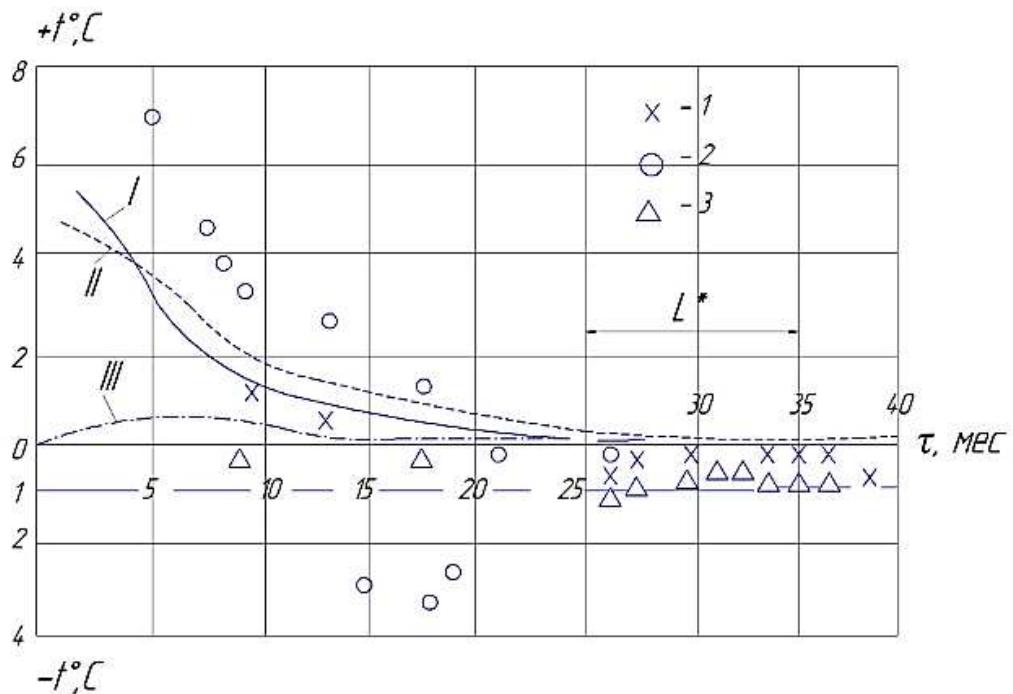
$$\tau_2 = \frac{16400}{24 \cdot 30} = 22,8 \text{ месяца.}$$

Тогда полное время охлаждения:

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 = 1,3 + 22,8 = 24 \text{ месяца.}$$

Если принять начальную температуру грунта $t_{\text{нач}} = +5^\circ\text{C}$ и предельную температуру $t_{\text{пр}} = -1^\circ\text{C}$, то расчетный период охлаждения тела и основания плотины $\tau = 29 - 30$ месяцам.

На рисунке 1.4.2 представлено изменение температуры тела и основания плотины по теоретическим решениям на ЭВМ при $t_{\text{пр}} = -0,1^\circ\text{C}$ и натурным данным.



I – температура грунта на глубине 7 м от гребня плотины по данным расчета;

II – то же, на глубине 11 м;

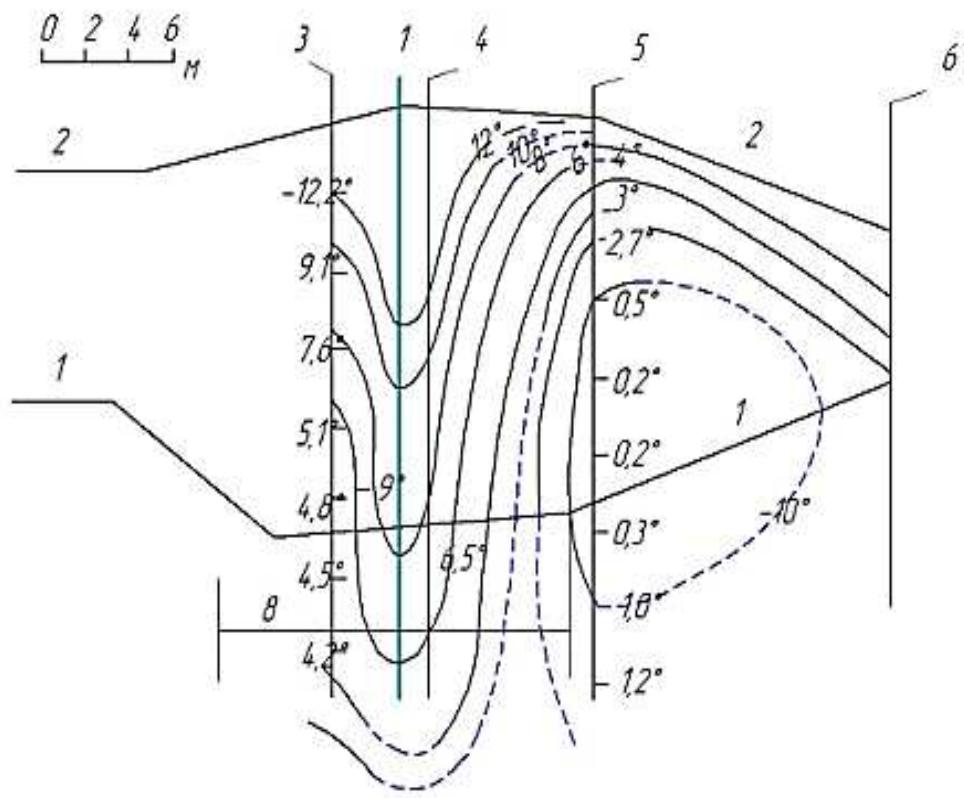
III – то же, на глубине 19 м;

1,2,3 – наблюденные значения температуры грунтов на тех же глубинах;

L^* – период активного промораживания (время промораживания при этом $\tau = 29 - 30$ месяцам)

Рисунок 1.4.2 – Графики расчета и измерения температуры в теле и основании плотины-аналога

Примерно этот же срок был необходим для охлаждения тела и основания плотины до $t_{\text{пр}} = -1^\circ\text{C}$ по натурным данным, представлен на рисунке 1.4.3. Дано распределение температур в поперечном сечении плотины после промораживания ее в течение трех зимних периодов по натурным данным.



1 – замораживающая колонка;

1 – верхний контур плотины;

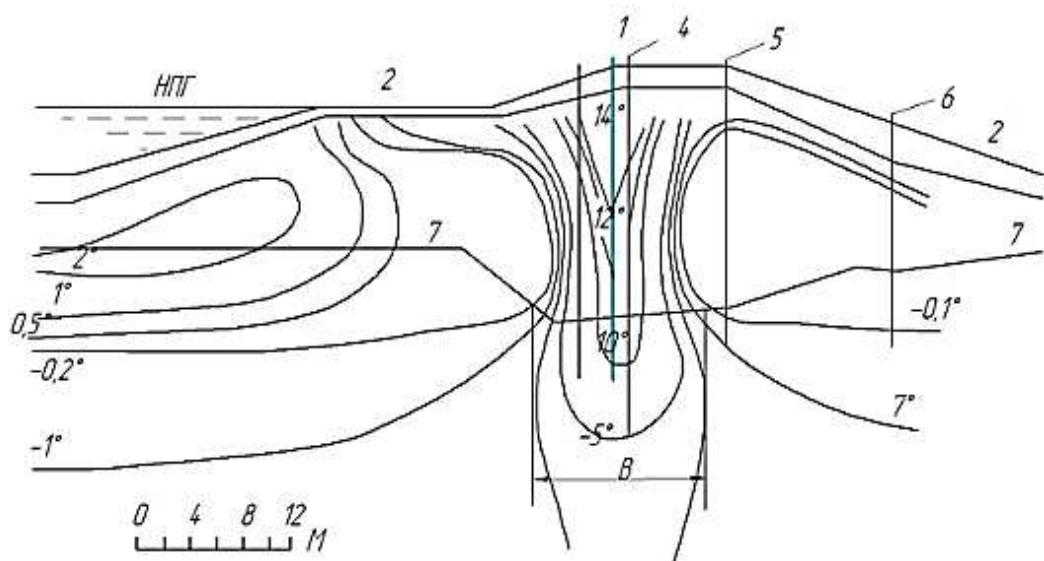
3,4,5 и 6 – температурные скважины;

7 – естественная поверхность.

Рисунок 1.4.3 – Температурное поле центральной части плотины и ее основания по натурным данным при $B=16-18$ м

На рисунке 1.4.4 дано распределение температур в поперечном сечении этой плотины, рассчитанное на ЭВМ [11].

Расчетный температурный створ от русла реки в сторону левого берега находится на расстоянии 25-30 м.



- 1 – замораживающая колонка;
 2 – верхний контур плотины;
 3,4,5 и 6 – температурные скважины;
 7 – естественная поверхность.

Рисунок 1.4.4 – Температурное поле центральной части плотины и ее основания и части ложа водохранилища, построенное по данным расчета ЭВМ ($B=10-12$ м);

Сопоставление данных натурных наблюдений и расчетных решений по образованию мерзлотной завесы в центральной части плотины-аналога в республике Саха:

1. По данным теоретического расчета, выполненного на ЭВМ, для периода начального промораживания плотины при $t_{\text{пр}} = -0,1^{\circ}\text{C}$ и $t_{\text{нач}} = +5^{\circ}\text{C}$ ширина мерзлотной завесы $B=10$ м в центральной части $B=12$ м в основании плотины как представлено на рисунке 1.4.4. Суммарное время зимнего промораживания при этом $\tau = 18$ месяцам.

2. По данным натурных наблюдений. Начальное промерзание центральной части плотины до $t_{\text{пр}} = 0,1^{\circ}\text{C}$ и $t_{\text{нач}} = +5^{\circ}\text{C}$ происходит за $\tau = 10 - 12$ месяцам (рисунок 1.4.1). При более стабильном промораживании тела плотины и основания до $t_{\text{пр}} = -1^{\circ}\text{C}$ представленным на рисунке 1.4.2 потребовалось $\tau = 25 - 35$ месяцам зимнего промерзания. Ширина мерзлотной завесы при этом 15-16 м как показано на рисунке 1.4.3.

3. По теоретическим расчетам с использованием формул 1.4.16, 1.4.17 и 1.4.18:

$$R_1 = \sqrt[3]{\frac{3\tau_1 t_k r_k \lambda_M}{q}} + 0,5r_k;$$

$$q = \rho W_o = 80000 \cdot W_c \gamma_{\text{ск}};$$

$$\tau_2 = \frac{80000 \cdot W_o + t_{\text{нач}} C_T - 0,33 \cdot t_k C_M}{-4t_k \lambda_M} \cdot \left(2R_2^2 \ln \frac{R_2}{r_k} - 2R_1^2 \ln \frac{R_1}{r_k} - R_2^2 + R_1^2 \right);$$

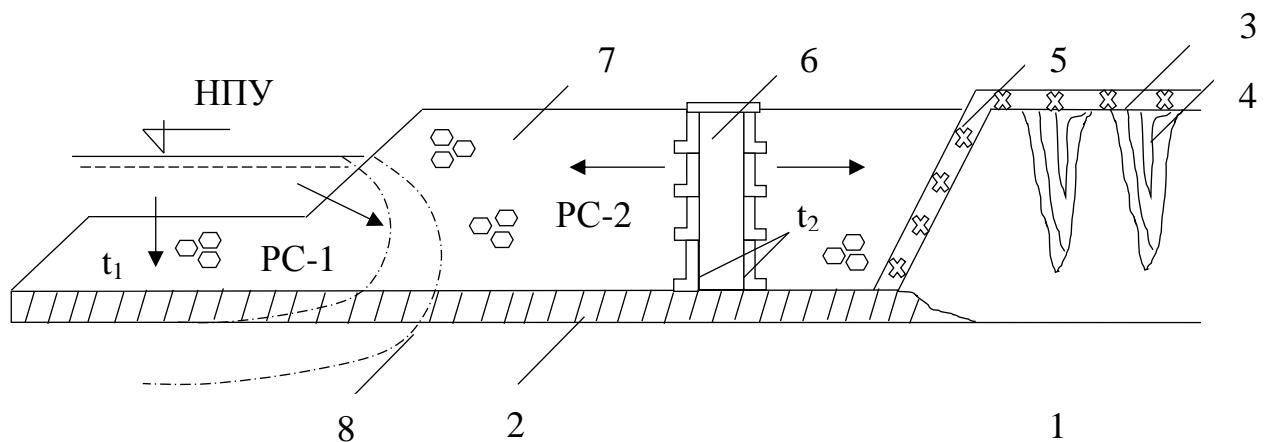
Для промораживания тела и основания плотины принимая $t_{\text{пр}} = -1^{\circ}\text{C}$ и $t_{\text{нач}} = +5^{\circ}\text{C}$, потребуется для промораживания $\tau = 29 - 30$ месяцам, при этом ширина мерзлотной завесы будет $B=12-14$ м.

Как видно из сопоставления расчетных решений и натурных данных, все результаты практически довольно близки.

2 Применение воздушных замораживающих систем (ВЗС) для создания специальных сооружений в криолитозоне

2.1 Мерзлотная плотина

На рисунке 2.1 представлена мерзлотная подпорная стена для борьбы с разрушением мерзлого массива.



1 – льдистые вечномерзлые грунты;

2 – оттаявшие грунты;

2 – поверхностный мохоторфяной слой;

3 – льдистые мерзлые грунты с включениями чистого льда;

4 – переходный слой (обратный фильтр);

5 – охлаждающая полость;

6 – насыпной массив подпорной стены (каменная наброска);

8 – контур чаши оттаивания;

РС-1 – расчетное сечение в одномерной задаче оттаивания основания под водонасыщенной зоной насыпного массива подпорной стены;

РС-2 – расчетное сечение при оценке толщины мерзлотной стенки.

Рисунок 2.1 – Мерзлотная подпорная стена для борьбы с разрушением мерзлого массива

Известно изобретение [12] относящееся к области гидротехнического строительства, которое может быть использовано, в частности при возведении грунтовых плотин водохранилищ и ограждающих дамб гидроотвалов, хвостохранилищ, золоотвалов и т.п., включая и криолитозону.

Грунтовая плотина с мерзлотной завесой в теле и основании включает замораживающие колонки, расположенные в основании охлаждающей полости, по высоте выполненной до гребня плотины и имеющей бетонные стенки со съемным перекрытием [13]. Бетонные стенки охлаждающей полости в теле плотины выполняются из сборных железобетонных элементов уголкового профиля в процессе паярусного возведения тела плотины, а создание охлаждающей полости завершается установкой на гребне плотины вентиляционного короба с задвижками в торцах.

Технический результат заключается в повышении надежности и эксплуатационной безопасности плотины и дамбы гидроотвала за счет совершенствования создания мерзлотных завес в нефильтрующих плотинах мерзлого типа.

Для этого варианта важным является возможность применения более экономичной одноярусной конструкции, так как здесь устройство глубокого нижнего яруса мерзлотной завесы в виде ряда термосифонов, заглубленных в основание мерзлотной подпорной стенки, может потребоваться редко [14].

Глубина оттаивания основания по направлению РС-1 может быть определена с ориентировочной погрешностью до 20 % по формуле Стефана:

$$h_1 = \sqrt{\frac{2\lambda_T(t_1 - t_M)\tau}{\rho W \gamma_c}}; \quad (2.1)$$

где: W, γ_c – объемный вес скелета грунта и его весовая влажность, $\text{т}/\text{м}^3$;

$\rho = 80$ – скрытая теплота фазового перехода влаги грунта, $\text{мккал}/\text{т}$;

t_M – отрицательная температура основания в начальный момент времени;

t_1 – температура воды в оттаявшей, частично размытой и водонасыщенной зоне насыпного массива (можно принять ее равной температуре воды на дне водоема);

λ_T – коэффициент теплопроводности грунта в талом состоянии, ккал/(м · ч · °C);

τ – время, ч;

Глубина промерзания насыпи по направлению РС-2 может быть определена по аналогичной формуле:

$$h_1 = \sqrt{\frac{2\lambda_T(-t_2)\tau}{\rho_w \gamma_c}}, \quad (2.2)$$

где: t_2 – температура охлаждаемой внутренней поверхности вентилируемой полости;

λ_M – коэффициент теплопроводности грунта в мерзлом состоянии, ккал/(м · ч · °C);

Остальные обозначения те же.

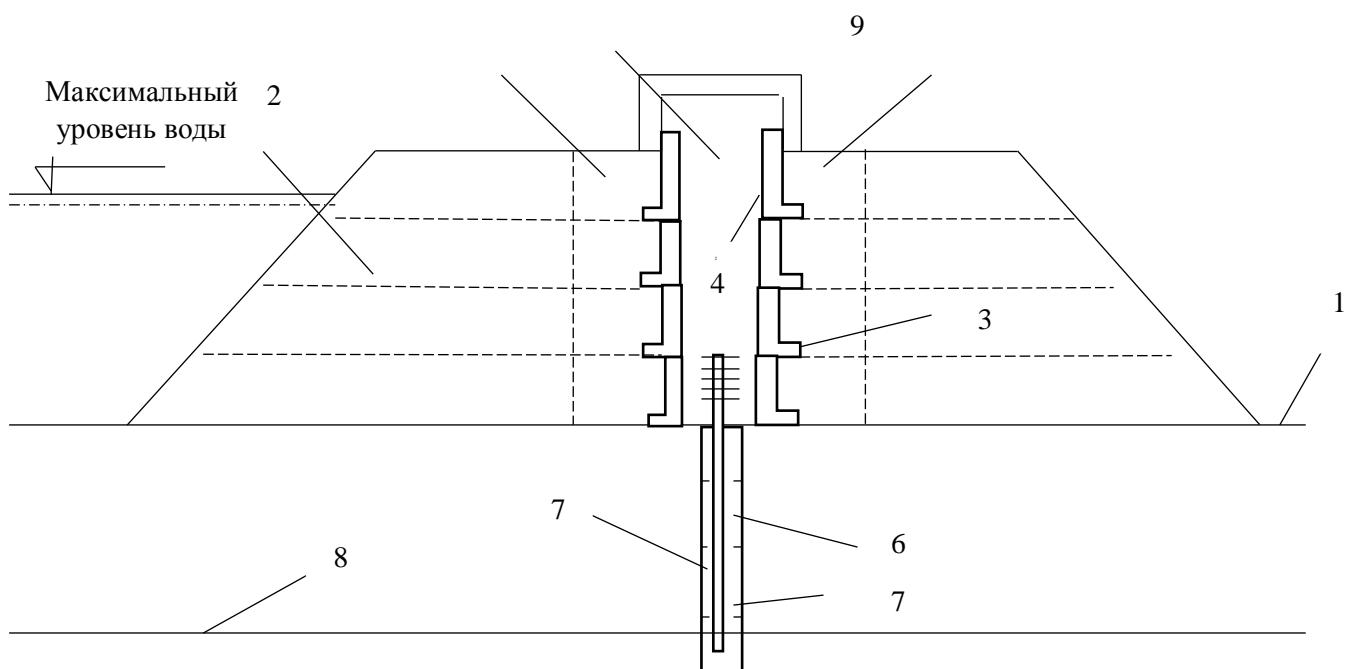
Соответственно толщина мерзлой стенки равна $2h_{Mc}$. Температуру t_2 назначаем в зависимости от температуры наружного воздуха, поступающего в охлаждающую полость в период зимнего вентилирования. Ближайшими аналогами являются существующие воздушные замораживающие системы (колонки, холодные подполья, воздушные охлаждающие каналы и т.п.). В дальнейшем более полные и точные материалы наблюдений могут быть получены на опытных участках МПС.

2.2 Мерзлотная подпорная стенка для укрепления размываемых берегов

Существует известная проблема разрушения гидроузлов арктических зон, за счёт вытаивания подземных льдов, и, следовательно, подмыва тела плотины и образования термокарста.

Известен способ [15] заключающийся в использовании железобетонных уголковых подпорных стен, позволяющих создать укрепление низового откоса тела дамбы.

На рисунке 2.2 схематично представлена заявляемая грунтовая плотина с мерзлотной завесой в теле и в основании в поперечном разрезе.



- 1 – основание грунтовой плотины;
- 2 – грунтовая насыпь;
- 3 – сборные железобетонные элементы уголкового профиля;
- 4 – подпорная стена;
- 5 – охлаждающая полость;
- 6 – система замораживающих колонок;
- 7 – мерзлотная завеса;
- 8 – мерзлый водонепроницаемый грунт;
- 9 – вентиляционный короб.

Рисунок 2.2 – Грунтовая плотина с мерзлотной завесой в теле и в основании

На подготовленное основание грунтовой плотины поярусно отсыпано грунтовое тело плотины, при этом в каждом ярусе установлены сборные железобетонные элементы уголкового профиля, которые образуют подпорные стены охлаждающей полости [16].

В основании под охлаждающей полостью установлена система замораживающих колонок, образующих мерзлотную завесу, находящуюся в сопряжении с мерзлым водонепроницаемым грунтом.

На гребне грунтовой плотины над охлаждающей полостью размещено съемное перекрытие в виде вентиляционного короба, в торцах которого установлены задвижки (в частности, как у вентилируемых подполий зданий), позволяющие открывать и вентилировать системы в зимний (охлаждающий) период и закрывать ее в теплый период года, а также зимой при оттепелях и метелях, дабы исключить прогрев, оттаивание и засорение снегом и льдом охлаждающей полости.

В коробе могут быть смонтированы, по меньшей мере два вентилятора, используемых в случае необходимости для принудительного вентилирования охлаждающей полости.

Эксплуатация плотины начинается после полного промораживания тела и основания грунтовой плотины в пределах мерзлотной завесы, что достигается за один-два зимних периода.

Затем водохранилище заполняется и начинается, собственно, эксплуатационный период, на протяжении которого ежегодно выполняется цикл зимнего поддержания отрицательных температур, как в мерзлотной завесе, так и в постоянно мерзлом основании под ней.

Тем самым обеспечивается температурная устойчивость и надежность всего сооружения.

При увеличении высоты проектируемых плотин до 30-40 м и более необходимость и вероятность применения предлагаемого типа грунтовой плотины с мерзлотной завесой в теле и в основании будут возрастать.

Холодный зимний воздух поступает в охлаждающую полость естественным путем при открытых задвижках в вентилируемом коробе и отключенных вентиляторах, или этот воздух (например, при более глубокой замораживающей системе) нагнетается вентиляторами принудительно.

Из вентиляционного короба осуществляется техническое обслуживание, ремонтные работы и натурные наблюдения за работой замораживающей системы и состоянием всей грунтовой плотины (с использованием размещенных датчиков и стационарных измерительных приборов).

2.3 Предложения по созданию мерзлых островов

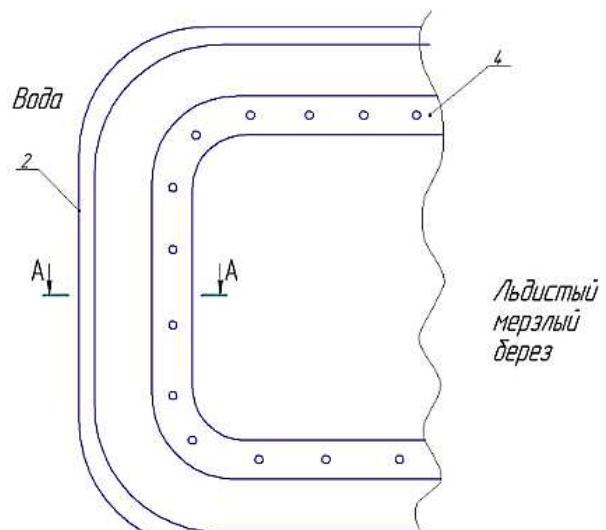
Намораживаемые острова и причалы предназначаются обычно для односезонного использования.

Делаются попытки сохранить такие острова для использования их в течение нескольких сезонов с помощью обсыпки грунтом, теплоизоляции пенопластовыми плитами и пр.

Известно предложение [17] для решения задач обеспечения повышенной надежности защитных дамб в сложных мерзлотно-геологических условиях для строительства причалов, при формировании прибрежных территорий, в частности полуостровов, оснований нефтепроводов и др.

Способ отличается использованием известных, проверенных на практике и экологически безопасных технических решений в новом, более эффективном сочетании без применения энергозатратных технологий, что крайне важно для условий Арктики.

На рисунке 2.3 приведена схема формирования полуострова с мерзлотной завесой в теле и основании защитной дамбы.



*Осыпший льдистый берег,
испытавший просадку
после термоадрации*

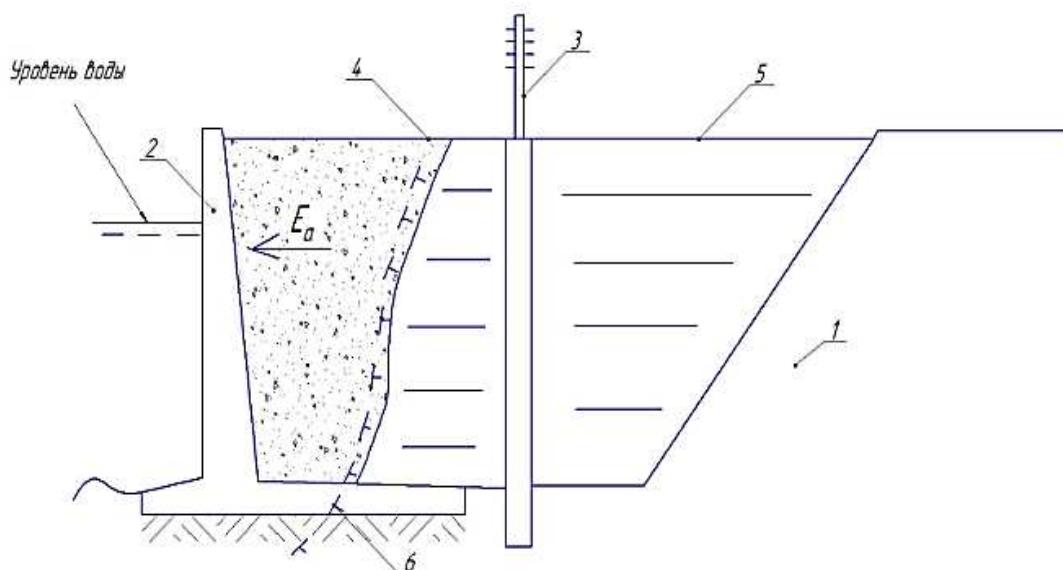
Рисунок 2.3 – Схема формирования полуострова с мерзлотной завесой в теле и основании защитной дамбы

Общий вид укрепляемого берегового массива показан на рисунке 2.4.



Рисунок 2.4 – Общий вид укрепляемого берегового массива на Севере Якутии (фото В.В. Куницкого)

Фундаментная часть углковой стены, развитая в тыловую (внутреннюю) сторону и нагруженная весом грунта обратной засыпки, обеспечивает устойчивость стены и всей подпорной конструкции в целом. Таким образом, защитное сооружение надежно вмораживается в укрепляемый берег или становится ограждающей частью острова (полуострова, причала и т.д). На рисунке 2.5 показана конструктивная схема подпорного сооружения.



1 – естественный льдистый берег (для варианта острова – грунт, заполняющий тело острова);

2 – подпорная стена;

3 – термосифоны;

4 – обратная засыпка (внешняя талая часть);

5 – обратная засыпка (промороженная внутренняя часть);

6 – граница раздела талого и мерзлого массива;

E_a – активное давление талого грунта на вертикальную часть подпорной стены.

Рисунок 2.5 – Конструктивная схема подпорного сооружения

Данное сооружение включает в себя внешнюю подпорную стену уголкового типа и мерзлотную завесу, образуемую однорядной системой термосифонов [18], преимущественно жидкостных, расположеннную непосредственно за подпорной стеной. Пространство между ней и сохраняемым сохраняемым естественным льдистым берегом заполняется грунтом обратной засыпки, промораживаемым в пределах мерзлотной завесы включает в себя фундаментальную плиту уголковой подпорной стенки. На рисунке 2.6 приведена схема уголковой подпорной стены.

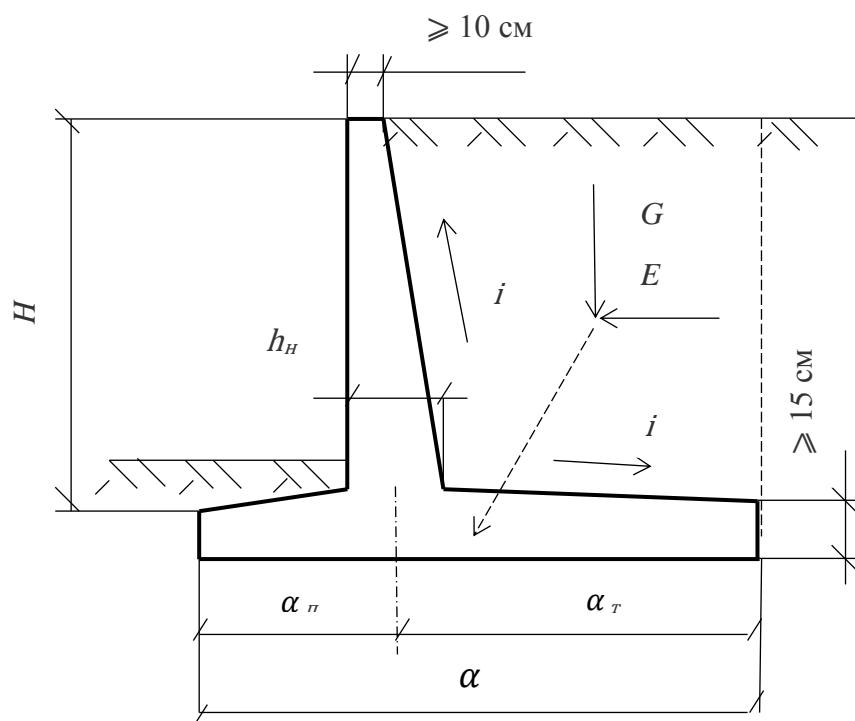


Рисунок 2.6 – Схема уголковой подпорной стены

Основными нагрузками на эту стену являются вертикальное давление G (вес грунта обратной засыпки) и боковое давление этого грунта E .

От суммарного воздействия этих нагрузок давление на подошве фундамента должно быть равномерным, а растягивающее напряжение в случае отрыва бетонной фундаментной плиты от основания не допускается, исходя из

этого требования, ширина тыловой части фундаментной плиты назначается по формуле 2.3.1:

$$\alpha_T = 1(1 + 4K) \operatorname{tg} \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) H; \quad (2.3.1)$$

где: $K = \frac{\alpha_n}{\alpha_T}$, назначенное в пределах 0,25-0,4;

φ – угол внутреннего трения грунта;

H – высота стенки.

Полная ширина плиты α назначается равной 0,5-0,7 H . При наличии слабых грунтов и грунтовых (талых) вод принимают большее значение α . При одностороннем давлении грунта и воды величина α может быть увеличена до 0,9 H .

Активное боковое давление грунта на 1 пог. м вертикальной части бетонной стенки определяется по формуле 2.3.2:

$$E_\alpha = 0,5\gamma H_A \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right); \quad (2.3.2)$$

Параметры мерзлотной завесы [19], располагаемой непосредственно за фундаментальной плитой бетонной подпорной стенки определяются следующим образом: определяем радиус одиночного мерзлотного цилиндра, получаемого за первый зимний сезон охлаждения [20].

Расчет динамики роста мерзлого грунта вокруг воздушной замораживающей колонки (термосифона) основан на следующих допущениях:

- промораживаемый массив отсыпан из однородного грунта. Начальная положительная температура грунта, его влажность, плотность и теплофизические свойства осредняются по высоте, длине и ширине массива;
- средняя температура по высоте наружной поверхности подземного теплообменника замораживающей колонки (термосифона) постоянна в течение периода зимнего охлаждения;

- процессы теплообмена колонки и грунта рассматриваются только в горизонтальной плоскости; тепловые потоки направлены по радиусу колонки термосифона и образуемого ею мерзлотного цилиндра;
- температура замерзания грунта принимается равной 0 °C;
- фильтрация и обусловленный ею конвективный теплообмен в пределах мерзлотной завесы отсутствуют;
- всё тепло, выделяющееся при охлаждении растущего мерзлого цилиндра и окружающего его талого массива грунта, сосредоточено на границе промерзания, т.е. на внешнем контуре мерзлого цилиндра;
- неустановившийся температурный режим рассматривается как последовательная смена стационарных состояний.

Совместная работа колонок (термосифонов) в мерзлотной завесе и их взаимное тепловое влияние не учитываются (что несколько уменьшит фактическое время промораживания).

Радиус мерзлотного цилиндра определяем по формулам 1.4.16 и 1.4.17.

При более длительном промораживании в течение двух и более зимних периодов зависимость между продолжительностью охлаждения, радиусом мерзлого цилиндра и другими данными можно определить по зависимости [21] по формулам 2.3.3 и 2.3.4:

$$\tau = \frac{\rho W_0 + t_{\text{нач}} C_T - 0,33 t_k C_M}{4 t_k \lambda_M} A; \quad (2.3.3)$$

$$A = (2R_2^2 \ln \frac{R_2}{r_k} - 2R_1^2 \ln \frac{R_1}{r_k} - R_2^2 + R_1^2); \quad (2.3.4)$$

где: W_0 – объемная влажность, доли единицы;

$t_{\text{нач}}$ – начальная температура грунта, чаще всего положительная, близкая к нулю ($0^\circ\text{C} \leq t_{\text{нач}} \leq 1^\circ\text{C}$);

C_T, C_M – объемная теплоемкость талого и мерзлого грунта, ккал/(м³ · град);

R_1 – радиус мерзлого цилиндра в конце предыдущего периода промораживания, определенный по формуле (1.4.16);

R_2 – радиус мерзлотного цилиндра к концу второго периода охлаждения, м.

Формула (1.4.16) может быть использована при определении радиуса мерзлотного цилиндра при работе охлаждающей установки в течение нескольких зимних периодов охлаждения, когда $\tau = \tau_1 + \tau_2 + \dots + \tau_n$.

Величину t_k – расчетную среднюю температуру внешней поверхности подземного теплообменника колонки – рекомендуется определять по формуле 2.3.5:

$$t_k = t_h + 4^\circ\text{C}; \quad (2.3.5)$$

где: t_h – средняя температура наружного воздуха за охлаждающий период (ноябрь-март).

Для жидкостных термосифонов [22] определяется по формуле 2.3.6:

$$t_k = 0,5 t_h + t_r; \quad (2.3.6)$$

где: t_r – температура грунта на внешнем контуре теплообменника.

Определение средней по высоте температуры мерзлотной завесы необходимо для расчетов устойчивости и прочности плотины или другого сооружения (например, мерзлотной подпорной стенки).

Для практических целей среднюю температуру по высоте завесы можно определять приближенно по зависимостям:

средняя температура по объему завесы при полном смыкании мерзлых цилиндров определяется по формуле 2.3.7:

$$t_{\text{cp}} = t_k \left(0,32 + 0,8 \frac{d}{l} - 0,2 \frac{l}{B} \right); \quad (2.3.7)$$

средняя для завесы температура в точке пересечения продольной оси завесы с плоскостью смыкания цилиндров, определяется по формуле 2.3.8:

$$t_{\text{cm}} = t_k \left(0,73 + 0,55 \frac{l}{B} + \frac{d}{l} \right); \quad (2.3.8)$$

где: d – внешний диаметр замораживающей колонки (термосифона), м;
 l – расстояние между осями колонок, м;
 B – минимальная толщина завесы в плоскости смыкания цилиндров, м;
 t_k – расчетная температура внешней поверхности колонки, средняя за период охлаждающего цикла.

Далее назначаем шаг установки замораживающих колонок (термосифонов) из условия смыкания одиночных мерзлых цилиндров и образования сплошной мерзлой стенки. Положительная роль мерзлотной завесы определяется ее толщиной и прочностью мерзлого грунта в различные периоды года. Поскольку в теплое время года прочность завесы ослабевает, то нет необходимости учитывать этот фактор в расчетах устойчивости; следует рассматривать его лишь как дополнительный компонент удерживающих сил [23].

В случае круглогодичного замораживания в подпорном сооружении возникает уже постоянная мерзлая стенка; но такой режим работы предлагаемой системы не рассматривается, так как применение холодильных машин существенно усложняет ситуацию и не предусматривается в данной работе.

3 Оценка риска при возведении плотины с мерзлотной завесой

3.1 Общие положения, термины и определения

Применительно к опасным природным и техногенным процессам понятия «опасность» и «риск» относятся соответственно к возможным воздействиям на объект и его реакции на эти воздействия («уязвимости»). Графически рассматриваемое соотношение представлено на рисунке 3.1.



Рисунок 3.1 – Схема формирования риска от внешней опасности

Из рисунка видно, что риск возникает только в области пересечения опасности с объектом и не существует без них, т. е. риск при существующей опасности для технически неуязвимого объекта отсутствует (равен нулю), как и риск для весьма уязвимого объекта при отсутствии опасности. Отсюда вытекают общие определения понятий [24].

Опасность при оценке возможности аварий гидротехнических сооружений - процессы, протекающие в гидротехнических сооружениях и зоне их влияния и представляющие угрозу для жизни или условий жизнедеятельности людей, объектов хозяйства или окружающей среды.

Уязвимость - свойство гидротехнических сооружений терять способность к выполнению заданных функций в результате негативных воздействий.

Риск аварий гидротехнических сооружений - вероятностная мера опасности, установленная для гидротехнического сооружения определенной уязвимости в виде возможных потерь.

Комплексной характеристикой объекта становится оценка суммарного риска, позволяющая произвести сравнительную оценку ситуации с позиций возможных потерь для существующих или проектируемых объектов.

Оценка риска основывается на результатах контроля и анализа факторов безопасности, наиболее существенных для данного сооружения, и условий его эксплуатации.

Под факторами безопасности понимаются количественные и качественные характеристики состояния сооружения, природных воздействий и ожидаемого ущерба от аварии или разрушения гидротехнических сооружений.

Понятие риска является универсальной количественной мерой потенциальной опасности, позволяющей:

- провести корректировку исходных целей и стратегии решения задач анализа риска;
- провести сравнение опасностей различной природы и механизмов действия;
- провести классификацию и ранжирование потенциальных источников опасности по их вкладу в интегральные показатели риска;
- изучить механизм и исследовать причинно-следственную логику возникновения и развития аварий, а также влияние на показатели риска различных факторов технологического, природного и социального характера;

- обеспечить направленное снижение рисков за счет оптимального управления технологическими (техническими) и организационно-методическими факторами воздействия (снижение вероятности, уменьшение величины ущерба).

Использование и расчеты меры риска в качестве оценки безопасности эксплуатируемого сооружения с мерзлотной установкой требует совместного учета характеристик состояния сооружения, которые непосредственно связаны с вероятностью аварии, и характеристик ущерба от возможной аварии.

Безопасность сооружения с мерзлотной установкой (в особенности ГТС) – свойство сооружения, позволяющее обеспечивать защиту жизни, здоровья и интересов человека, окружающей среды и объектов экономики на основе реализации мер по предупреждению аварийных состояний и аварий.

Аварийное состояние сооружения с мерзлотной установкой – это состояние сооружения, при котором вследствие развития опасных процессов его дальнейшая эксплуатация в проектном режиме недопустима, а промедление с реализацией противоаварийных мероприятий неизбежно приводит к аварии (разрушению) сооружения с мерзлотной установкой или влечет за собой человеческие жертвы, ущерб здоровью людей или окружающей среде, значительные материальные потери и нарушение условий жизнедеятельности людей.

Переходя к количественным оценкам опасности, уязвимости, риска, следует иметь в виду, что каждое из них является достаточно сложной функцией многих переменных факторов. Для получения количественных характеристик указанных понятий необходимо определить полный набор таких факторов.

Их объединение по совокупностям будем называть показателями (показателями уязвимости, опасности, риска). В зависимости от величин показателей строится градация по степеням опасности, уязвимости, риска. Такой подход позволяет работать уже с достаточно ограниченным числом

переменных и выполнять количественную оценку, которую можно назвать интегральной.

Оценки риска представляют собой вероятностные меры опасности, устанавливаемые для сооружений с мерзлотной установкой (в особенности ГТС, причальное сооружение) в виде возможных потерь за определенное время в экономической, социальной и экологической сферах.

За основу количественной оценки опасности, уязвимости, риска аварий сооружений с мерзлотной установкой, принят широко известный подход получения нормирующих коэффициентов, характеризующих долю (вероятность) от наиболее неблагоприятной ситуации, принимаемой за единицу. Указанный подход количественной оценки риска аварий реализован ниже.

3.2 Интегральная оценка опасности аварии сооружения с мерзлотной установкой

Исследование посвящено оценке рисков, возникающих при возведении плотины с мерзлотной завесой.

Опасность аварии сооружения с мерзлотной установкой (в частности ГТС, причальное сооружение) определяется следующими показателями:

- опасность превышения принятых при обосновании конструкции сооружения природных нагрузок и воздействий.
- обоснованность и соответствие проектных решений современным нормативным требованиям.
- соответствие проекту конструкции сооружения, условий его эксплуатации и свойств материалов сооружения и основания.
- возможные последствия и ущерб при аварии сооружения с мерзлотной установкой.

Степень опасности по каждому из показателей устанавливается отдельно на том или ином уровне на основании экспертных оценок.

Показатель опасности 1. Степень опасности превышения принятых при расчетном обосновании конструкции сооружения природных нагрузок и воздействий (сейсмические, волновые, температурные воздействия, нагрузки от наносов, гидростатические, ветровые и ледовые, опасность превышения расчетных расходов через водосбросные сооружения, опасность обрушения в водохранилище береговых склонов и др.) принимается по экспертной оценке на одном из трех уровней, каждый из которых имеет соответствующий код, с учетом указаний действующих нормативных документов по определению нагрузок и воздействий на сооружения, данных натурных наблюдений за период эксплуатации сооружения с мерзлотной установкой и отличительных признаков, приведенных ниже в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Данные натурных наблюдений за период эксплуатации сооружения с мерзлотной установкой и отличительных признаков

№ п/п	Степень опасности по показателю 1	Код	Отличительные признаки
1	малая	1	возможны лишь локальные повреждения элементов конструкций и сооружений (крепления откосов и т.п.), которые могут быть устранены в ходе текущих (плановых) ремонтных работ
2	средняя	2	возможно разрушение элементов конструкций (бетонных плотин, водосбросов, водовыпусков, пульпопроводов и т. п.) или отдельных сооружений, которые могут привести к возникновению аварийной ситуации. Требуется проведение неотложных ремонтных работ, изменения режима эксплуатации объекта

Окончание таблицы 3.2

3	большая	3	возможны разрушения конструкций и сооружений, приводящие к прорыву напорного фронта (прежде всего, если установлена возможность превышения расчетных сейсмических воздействий или паводковых расходов)
---	---------	---	--

Показатель опасности 2. Степень опасности по показателю 2 устанавливается по одному из 4-х уровней в соответствии с таблицей 3.3.

Таблица 3.3 – Степень опасности по показателю 2 и отличительные признаки.

№ п/п	Степень опасности по показателю 2	Код	Отличительные признаки
1	отсутствует	0	полное соответствие современным нормативным требованиям по всем оцениваемым факторам
2	малая	1	в проекте имеются незначительные отклонения от современных нормативных требований
3	средняя	2	в проекте имеются значительные ошибки по одному из оцениваемых факторов или существенные отклонения от современных нормативных требований по двум факторам.
4	большая	3	в проекте имеются грубые ошибки или существенные отклонения от современных нормативных требований по всем трем основным оцениваемым факторам

При экспертной оценке обоснованности и соответствия проектных решений современным нормативным требованиям принимаются во внимание следующие основные факторы:

- достаточность инженерно-геологических изысканий, выполненных при проектировании сооружения с мерзлотной установкой;
- надежность и обоснованность методов определения и назначения расчетных характеристик (физико-механические) материалов сооружения и основания;

- достаточность расчетного обоснования конструкции сооружения, обоснованность и соответствие современным нормативным требованиям применяющихся расчетных методов.

Показатель опасности 3. Степень опасности по этому показателю, так же как для показателя опасности 2, устанавливается на одном из четырех уровней, характеризуемых отличительными признаками, приведенными в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Степень опасности по показателю 3 и отличительные признаки

№ п/п	Степень опасности по показателю 3	Код	Отличительные признаки
1	отсутствует	0	полное соответствие современным нормативным требованиям по всем оцениваемым факторам
2	малая	1	незначительные отклонения от проекта, которые не могут привести к нарушению нормальной работы сооружений, конструкций и элементов
3	средняя	2	существенные отклонения от проекта, которые могут привести к возникновению аварийной ситуации; требуется оценка возможности дальнейшей эксплуатации ГТС в проектном режиме и необходимости проведения тех или иных мероприятий по обоснованию нормативной прочности и устойчивости конструкций и сооружений, пропускной способности водосбросов и водоспусков и др.
4	большая	3	значительные отклонения от проекта по оцениваемым факторам, которые могут привести к аварии ГТС и прорыву напорного фронта

При экспертной оценке соответствия проекту сооружения с мерзлотной завесой (в частности ГТС, причальное сооружение), условий его эксплуатации, а также свойств материалов сооружения и основания подлежат учету следующие основные факторы:

- наличие изменений проектных конструкций сооружения с мерзлотной завесой и компоновочных решений;
- наличие изменений в режиме эксплуатации сооружения с мерзлотной завесой;
- данные геотехнического контроля качества материалов при возведении сооружения с мерзлотной завесой, а также данные инженерно-геологических работ по определению фактических характеристик материалов сооружения и основания в период эксплуатации.

Показатель опасности 4. Возможные последствия при аварии сооружения с мерзлотной завесой. В соответствии с «Положением о классификации чрезвычайных ситуаций (ЧС) природного и техногенного характера», утвержденным постановлением Правительства РФ от 13.09.96 г., масштаб ЧС, возникающей при аварии сооружения с мерзлотной завесой и затоплении в нижнем бьефе территории при прохождении волны прорыва, определяется в зависимости от количества пострадавших людей, количества людей, у которых оказались нарушены условия жизнедеятельности, размера материального ущерба и границ зоны распространения поражающих факторов.

Интегральная количественная оценка опасности сооружения с мерзлотной установкой включая возможный ущерб при аварии и образовании волны прорыва, характеризуется коэффициентом опасности 1, который представляет собой долю (вероятность) от наиболее неблагоприятной обстановки (сочетания показателей опасности) на объекте.

Код показателя 4 принимается по таблице 3.5 в зависимости от масштаба возможной ЧС при аварии рассматриваемого сооружения с мерзлотной завесой. В таблице представлена степень опасности по показателю 4, отличительные признаки, а также силы и средства, привлекаемые для ликвидации ЧС.

Таблица 3.5 – Степень опасности по показателю 4

Отличительные признаки							Силы и средства, привлекаемые для ликвидации ЧС
Степень опасности по показателю 4	Код	Масштаб возможной ЧС	Число пострадавших, чел.	Нарушены условия жизнедеятельности, чел.	Материальный ущерб, МРОТ	Зона распространения ЧС	
малая	1	локальная	не более 10	не более 100	не более 1 тыс.	не выходит за пределы территории объекта	собственника или эксплуатирующй организаций
средняя	2	местная	выше 10, но не более 50	свыше 100, но не более 300	свыше 1 тыс., но не более 5 тыс.	не выходит за пределы города, района	органов местного самоуправления
большая	3	территориальная	свыше 50, но не более 500	свыше 300, но не более 500	свыше 5 тыс., но не более 0,5 млн.	не выходит за пределы субъекта РФ	органов исполнительной власти субъектов РФ
очень большая	4	региональная	свыше 50, но не более 500	свыше 500, но не более 1000	свыше 0,5 млн., но не более 5 млн.	охватывает территорию 2-х субъектов РФ	органов исполнительной власти субъектов РФ, оказавшихся в зоне ЧС
очень большая	4	федеральная	свыше 500	свыше 1000	свыше 5 млн.	выходит за пределы более 2-х субъектов РФ	то же
очень большая	4	трансграничная	-	-	-	поражающие факторы выходят за пределы РФ	по решению правительства РФ, в соответствии с нормами международного права

При наиболее неблагоприятном сочетании уровней четырех рассмотренных показателей опасности (интегральный код 3334) коэффициент опасности равен $l = 1$, в остальных случаях $0 < l < 1$.

Численные значения коэффициента опасности l в зависимости от установленного интегрального кода показателей опасности получены на основе экспертной оценки коэффициентов значимости или «удельного веса» каждого из показателей опасности, а также оценки относительной роли (весовых коэффициентов) каждой из степеней опасности по тому или иному показателю. Качественные оценки этих величин приведены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Качественные оценки каждой из степеней опасности по тому или иному показателю

№ п/п	Показатели опасности	Степень опасности	Код	Коэффициент значимости показателя опасности
1	опасность превышения природных нагрузок и воздействий	малая	1	0,2
		средняя	2	
		большая	3	
2	обоснованность и соответствие проектных решений современным нормативным требованиям	отсутствует	0	0,2
		малая	1	
		средняя	2	
		большая	3	
3	соответствие проекту конструкции сооружения с мерзлотной установкой, условий его эксплуатации и свойств материалов сооружения и основания	отсутствует	0	0,2
		малая	1	
		средняя	2	
		большая	3	
4	возможные последствия и ущерб при аварии сооружения с мерзлотной установкой	малая	1	0,4
		средняя	2	
		большая	3	
		очень большая	4	

При этом коэффициент опасности определен из формулы 3.1:

$$\lambda = \sum_{i=1}^4 \delta_i \cdot \alpha_i \cdot \lambda_0; \quad (3.1)$$

где: δ_i – коэффициент значимости i -го показателя опасности;

a_i – значение кода i -го показателя опасности;

λ_0 – нормирующий множитель.

3.3 Интегральная оценка уязвимости сооружения с мерзлым устройством

Степень уязвимости сооружения с мерзлотной установкой определяется их восприимчивостью к воздействию факторов опасности.

Приняты следующие основные показатели уязвимости сооружения с мерзлотной установкой:

- состояние сооружения (по данным инструментальных наблюдений и визуального контроля);
- организация эксплуатации сооружения с мерзлотной установкой (соблюдение требований безопасной эксплуатации);
- готовность объекта к локализации и ликвидации ЧС.

Экспертная оценка уязвимости сооружения с мерзлотной установкой по показателю 1 производится на основе анализа результатов контрольных инструментальных наблюдений и комиссионных обследований состояния сооружения и его основания с учетом установленных нарушений конструктивных элементов, влияющих на их прочность и устойчивость, и соответствия контролируемых параметров их предельно допустимым значениям (ПДЗ).

ПДЗ параметров состояния принимаются равными расчетным значениям для основного и особого сочетания нагрузок или значениям, уточненным в процессе строительства и эксплуатации.

Показатель уязвимости 1. Степень уязвимости сооружения с мерзлотной установкой по показателю 1 устанавливается на одном из 4-х уровней в соответствии с таблицей 3.7.

Таблица 3.7 – Степень уязвимости сооружения с мерзлотной установкой по показателю 1 и отличительные признаки.

№ п/п	Степень уязвимости по показателю 1	Код	Отличительные признаки
1	отсутствует	0	отсутствие каких-либо нарушений конструктивных элементов сооружений и превышения предельно допустимых значений (ПДЗ) контролируемых параметров состояния сооружений и их оснований.
2	малая	1	наличие локальных повреждений элементов конструкций и сооружений, которые могут быть устранены в ходе текущих (плановых) ремонтных работ, отсутствие превышения ПДЗ контролируемых параметров состояния.
3	средняя	2	существенные разрушения элементов конструкций или отдельных сооружений и (или) превышение ПДЗ контролируемых параметров состояния, которые могут привести к возникновению аварийной ситуации. невозможна работа сооружения в экстремальных условиях, предусмотренных проектом, требуется проведение неотложных ремонтных работ, временное изменение режима эксплуатации объекта.
4	большая	3	наличие разрушений конструкций и сооружений и (или) превышение ПДЗ контролируемых параметров состояния, обусловливающих возникновение на объекте аварийной ситуации и угрозу прорыва напорного фронта. Дальнейшая эксплуатация сооружения в проектном режиме невозможна и должна быть приостановлена для проведения ремонтно-восстановительных работ

Примечание: При прочих равных условиях степень уязвимости по показателю 1 плотин из грунтовых материалов, находящихся в эксплуатации более 40 - 50 лет, повышается на один уровень (если отсутствуют данные

полевых исследований по определению фактических физико-механических характеристик грунтов основания и тела плотины или дамбы).

Показатель уязвимости 2. Степень уязвимости по показателю 2 устанавливается в соответствии с таблицей 3.8 на одном из 4-х уровней.

Таблица 3.8 – Степень уязвимости по показателю 2 и отличительные признаки

№ п/п	Степень уязвимости по показателю 2	Код	Отличительные признаки
1	отсутствует	0	полное соответствие требованиям безопасной эксплуатации по всем оцениваемым факторам
2	малая	1	незначительные отступления от требований безопасной эксплуатации
3	средняя	2	значительные нарушения требований безопасной эксплуатации
4	большая	3	грубые нарушения требований безопасной эксплуатации

Экспертная оценка уязвимости сооружения с мерзлотной установкой в зависимости от организации его эксплуатации (уровня культуры эксплуатации) производится на основе анализа следующих основных факторов:

1. Укомплектованность штатов и квалификация персонала службы эксплуатации.

2. Наличие необходимой документации и нормативно-методических материалов: правил использования водных ресурсов водохранилища; инструкции по эксплуатации сооружения с мерзлотной установкой с регламентацией должностных обязанностей обслуживающего персонала, схемы заполнения накопителя промышленных отходов, вопросов техники безопасности и охраны окружающей среды; инструкции по проведению контрольных наблюдений и материалы контроля состояния сооружения с мерзлотной установкой; ежегодные графики планово-предупредительных ремонтов сооружений, сетей и оборудования; материалы геотехнического

контроля в процессе строительства, обобщенные материалы наблюдений в период эксплуатации (годовые отчеты, заключения и рекомендации специализированных организаций), а также материалы инспекторских проверок, обследований состояния сооружения с мерзлотной установкой, расследований аварий и повреждений, предписаний органов государственного надзора и авторского надзора.

3. Соответствие проекту.
4. Регулярность контрольных наблюдений и комиссионных обследований состояния сооружения с мерзлотной установкой.
5. Уровень и регулярность технического обслуживания и ремонта оборудования (механизмов) и сооружений.
6. Соблюдение правил эксплуатации (режима наполнения и сработки водохранилища и др.)

Показатель уязвимости 3. Экспертная оценка готовности объекта к локализации и ликвидации ЧС производится с учетом следующих основных факторов:

- наличие типовых решений по локализации и ликвидации аварийных ситуаций по возможным сценариям их развития на сооружения с мерзлотной установкой, плана оперативных действий персонала при возникновении ЧС, плана эвакуации персонала и населения из зоны возможного затопления волной прорыва.
- наличие и укомплектованность аварийно-ремонтных и аварийно-спасательных бригад, регулярность их тренировок.
- оснащенность аварийно-ремонтных бригад и привлекаемых в случае необходимости для ликвидации ЧС формирований ГО инструментом, оборудованием и механизмами для выполнения аварийно-спасательных работ.
- наличие и достаточность аварийного запаса строительных материалов.
- состояние дорог, мостов и подъездов к сооружению с мерзлотной установкой в районе гидроузла и на его территории.

– наличие и состояние аварийных средств связи, системы оповещения.

Степень уязвимости сооружения с мерзлотной установкой по показателю 3 устанавливается на одном из 4-х уровней в соответствии с отличительными признаками, приведенными в таблице 3.9.

Таблица 3.9 – Степень уязвимости сооружения с мерзлотной установкой по показателю 3 и отличительные признаки.

№ п/п	Степень уязвимости по показателю 3	Код	Отличительные признаки
1	отсутствует	0	полное соответствие предъявляемым требованиям по всем оцениваемым факторам
2	малая	1	незначительные отступления от предъявляемых требований
3	средняя	2	значительные нарушения
4	большая	3	грубые нарушения

Перечень факторов, характеризующих уязвимость сооружения с мерзлотной установкой по рассмотренным показателям уязвимости, может дополняться и корректироваться с учетом особенностей рассматриваемого сооружения.

Каждый из рассмотренных показателей уязвимости может проявляться независимо от других, а степень уязвимости сооружения с мерзлотной установкой зависит от их комплексного воздействия.

Интегральная количественная оценка уязвимости характеризуется коэффициентом уязвимости v_y , который также как коэффициент опасности, представляет собой долю (вероятность) от наиболее неблагоприятной обстановки на объекте по сочетанию показателей уязвимости. Принятый за единицу коэффициент уязвимости v_y соответствует наиболее неблагоприятному сочетанию показателей уязвимости на объекте и характеризуется интегральным

кодом 333. Численные значения коэффициента уязвимости в зависимости от интегрального кода могут изменяться в диапазоне $0 < v_y < 1$.

В результате экспертной оценки значимости показателей уязвимости сооружения с мерзлотной установкой (в частности ГТС) получены значения коэффициентов, которые приведены в таблице 3.10.

Таблица 3.10 – Показатели уязвимости сооружения с мерзлотной установкой

№ п/п	Показатели уязвимости	Степень (уровни) уязвимости по показателю	Код	Коэффициент значимости показателя уязвимости j_i
1	состояние сооружения с мерзлотной установкой (в частности ГТС) по данным инструментальных и визуальных наблюдений	отсутствует малая средняя большая	0 1 2 3	0,5
2	организация эксплуатации сооружения с мерзлотной установкой (в частности ГТС) (соблюдение требований безопасной эксплуатации)	отсутствует малая средняя большая	0 1 2 3	0,3
3	готовность объекта к локализации и ликвидации ЧС	отсутствует малая средняя большая	0 1 2 3	0,2

Оценка коэффициентов уязвимости v_y выполнена по формуле 3.3.1:

$$v_y = \sum_{i=1}^3 \varphi_i \cdot \alpha_i \cdot v_0 \quad (3.3.1)$$

где: φ_i – коэффициент значимости i -го показателя уязвимости;

a_i – значение кода i -ого показателя уязвимости;

v_0 – нормирующий множитель.

Результаты расчетов приведены в таблице 3.4 в Приложении А (Данные для расчета).

3.4 Интегральная оценка риска аварии сооружения с мерзлотной установкой

Оценка риска аварии производится на основании экспертного анализа степени опасности аварии и степени уязвимости сооружения с мерзлотной установкой.

Степень риска аварии оценивается по принципу пересечения этих событий и количественно выражается коэффициентом риска аварии по формуле 3.4.1:

$$R_a = \lambda \cdot v_y ; \quad (3.4.1)$$

где: λ – коэффициент опасности аварии;

v_y – коэффициент уязвимости аварии сооружения с мерзлотной установкой.

Физический смысл коэффициента R_a состоит в том, что он представляет собой долю от риска, который имеет место на сооружении с мерзлотной установкой при наиболее неблагоприятных сочетаниях показателей опасности (код 3334, $\lambda = 1$) и уязвимости (код 333, $v_y = 1$).

Степень риска аварии оценивается по величине коэффициента риска аварии R_a в соответствии с данными таблицы 3.11.

Таблица 3.11 – Степень риска аварии по величине коэффициента риска аварии R_a

№ п/п	Степень риска аварии	R_a
1	малая (нормальный уровень безопасности)	не более 0,15
2	умеренная (пониженный уровень безопасности)	свыше 0,15, но не более 0,3
3	большая (неудовлетворительный уровень безопасности)	свыше 0,3, но не более 0,5
4	аварийная ситуация (опасный уровень)	свыше 0,5

Диапазоны изменения коэффициента R_a в таблице 3.11 назначены таким образом, чтобы была возможность практически увязать степень риска аварии с качественными характеристиками уровня безопасности, регламентированными «Инструкцией о ведении Российского регистра гидротехнических сооружений», утвержденной Министерством природных ресурсов Российской Федерации, Министерством топлива и энергетики Российской Федерации, Министерством транспорта Российской Федерации, Федеральным горным и промышленным надзором России 12 июля 1999 г. №№ 144, К-3357, К-14/367-ис, 01/229а, зарегистрированной в Минюсте РФ 5 августа 1999 г. Регистрационный номер № 1858.

В области значений $R_a \leq 0,15$ (малая степень риска аварии) уровень безопасности сооружения с мерзлотной установкой оценивается как нормальный.

Сооружение удовлетворяет всем проектным требованиям по назначению и конструктивной надежности, а также современным нормативным требованиям; эксплуатация осуществляется в соответствии с действующими законодательными актами, нормами и правилами.

Дальнейшая эксплуатация сооружений и оборудования возможна без проведения каких-либо технических или организационных мероприятий по

повышению безопасности при обеспечении мониторинга безопасности и своевременном выполнении плановых ремонтно-профилактических работ.

В области значений $0,15 < R_a \leq 0,30$ (умеренная степень риска аварии) уровень безопасности сооружения с мерзлотной установкой оценивается как пониженный.

Имеются те или иные отклонения от правил безопасной эксплуатации, не устранимые своевременно в ходе плановых мероприятий по обеспечению нормального уровня безопасности, которые, однако, не препятствуют возможности выполнения сооружением заданных эксплуатационных функций.

Дальнейшая безопасная эксплуатация сооружения в проектном режиме возможна при обязательном выполнении в согласованные (установленные) органами государственного надзора сроки мероприятий по повышению уровня безопасности, конкретный перечень которых вытекает из анализа факторов, обуславливающих максимальные значения показателей опасности и уязвимости.

При большой степени риска аварии ($0,30 < R_a < 0,50$) уровень безопасности сооружения с мерзлотной установкой оценивается как неудовлетворительный.

Имеются отклонения от проектного состояния и нарушения правил безопасной эксплуатации, которые могут привести к возникновению аварийной ситуации.

Дальнейшая эксплуатация сооружения в проектном режиме недопустима без проведения в установленные органами государственного надзора сроки тех или иных технических (вплоть до капитального ремонта, замены оборудования и др.) и организационных мероприятий по снижению риска аварии и восстановлению нормального уровня безопасности на основе анализа факторов, обуславливающих максимальные значения показателей опасности и уязвимости.

К проведению такого анализа и разработке мероприятий по повышению уровня безопасности, как правило, должны привлекаться специализированные

научно-исследовательские и проектные организации; в случае необходимости по специальным программам предусматриваются полевые исследования физико-механических характеристик грунтовых материалов, бетонных конструкций и др., проводится дополнительное расчетное обоснование прочности и устойчивости сооружений и конструкций, корректируются ПДЗ контролируемых параметров состояния и пр.

Значения коэффициента риска аварии $R_a \geq 0,50$ свидетельствуют о возникновении аварийной ситуации, уровень безопасности сооружения с мерзлотной установкой оценивается как опасный.

Дальнейшая эксплуатация сооружения в проектном режиме по условиям риска аварии недопустима и должна осуществляться в соответствии с требованиями «Положения об эксплуатации гидротехнического сооружения и обеспечения безопасности гидротехнического сооружения, разрешение на строительство и эксплуатацию которого аннулировано, а также гидротехнического сооружения, подлежащего консервации, ликвидации либо не имеющего собственника», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 27 февраля 1999 г. № 237. Необходимо незамедлительно информировать органы государственного надзора и в соответствии с полученным предписанием ввести ограничения на режим эксплуатации (снижение уровня верхнего бьефа и др.), разработать и утвердить временные правила эксплуатации.

Мероприятия по восстановлению нормального уровня безопасности должны выполняться на основании анализа факторов, обуславливающих возникновение аварийной ситуации, с обязательным привлечением специализированных организаций.

После проведения необходимых мероприятий перевод сооружений вновь в проектный режим эксплуатации должен быть согласован с органами государственного надзора за безопасностью сооружения с мерзлотной установкой.

Если при оценке риска аварии сооружения с мерзлотной установкой, вне зависимости от конечной величины R_a , установлены максимальные значения тех или иных показателей опасности и уязвимости с кодом 3 (кроме показателя опасности, характеризующего возможные последствия и ущерб при аварии сооружения с мерзлотной установкой), собственник (эксплуатирующая организация) обязан информировать об этом органы государственного надзора за безопасностью сооружения с мерзлотной установкой и принять меры по устранению причин, вызывающих повышенную опасность или уязвимость сооружения по конкретному показателю в сроки, установленные соответствующим предписанием органов государственного надзора.

3.5 Расчет риска аварий сооружения с мерзлотной установкой

Плотина из грунтовых материалов. Интегральная оценка опасности аварии плотины с мерзлотной завесой проводится в соответствии с рекомендациями и представлены в таблице 3.12.

Таблица 3.12 – Показатели опасности и отличительные признаки, на основании которых экспертом установлена степень (уровень) опасности

№ п/п	Показатель опасности	Степень опасности	Код	Отличительные признаки, на основании которых экспертом установлена степень (уровень) опасности по рассматриваемому критерию
1	показатель 1	большая	3	ввиду изменения нормативной сейсмичности района расположения плотины с 8 баллов (принято при проектировании) до 9 баллов возможно превышение сейсмического воздействия, прорыв напорного фронта;
2	показатель 2	малая	1	в проекте имеются лишь незначительные отклонения от современных нормативных требований по всем оцениваемым факторам (помимо природных нагрузок и воздействий);

Окончание таблицы 3.12

3	показатель 3	малая	1	установлены отклонения от проекта, которые не могут повлиять на нормальную работу плотины: - вместо бетонного монолитного крепления верхового откоса выполнено железобетонное сборное крепление;
4	показатель 4	средняя	2	в расчетной зоне затопления возможно возникновение ЧС местного масштаба (зона затопления не выходит за пределы района, в котором расположена плотина); нарушены условия жизнедеятельности не более чем для 300 человек, возможный материальный ущерб не превышает 5000 МРОТ.

Интегральный код показателей опасности в соответствии с данными таблицы 3 составляет 3112. Коэффициент опасности λ определяется согласно установленному коду по таблице 3.13. Присваиваем значение исходя из данных, приведенных в Приложении А (Данные для расчета) $\lambda = 0,529$. Интегральная оценка уязвимости плотины производится аналогично оценке опасности в табличной форме.

В таблице 3.14 приведены показатели уязвимости и отличительные признаки, на основании которых экспертом установлена степень (уровень) уязвимости по рассматриваемому показателю уязвимости

Таблица 3.14 – Показатели уязвимости и отличительные признаки, на основании которых экспертом установлена степень (уровень) уязвимости по рассматриваемому показателю уязвимости

№ п/п	Степень опасности	Код	Отличительные признаки, на основании которых экспертом установлена степень (уровень) опасности по рассматриваемому критерию;
1	малая	1	имеются локальные нарушения бетонного крепления верхового откоса, которые предусмотрено устранить в ходе плановых ремонтных работ;

Окончание таблицы 3.14

2	малая	1	установленные в последнем акте обследования состояния плотины планово-предупредительные и ремонтные работы выполнены в срок не в полном объеме: не завершен ремонт швов бетонного крепления верхового откоса на участке ПК 2+20 – ПК 3+50;
3	большая	3	на объекте отсутствует локальная система оповещения и аварийный запас строительных материалов.

В соответствии с данными таблицы 4 интегральный код показателей уязвимости 113.

Коэффициент уязвимости ϑ_y определяется согласно установленному коду по таблице 3.15. Присваиваем значение $\vartheta_y = 0,468$.

Приводим расчетную формулу 3.1 определения коэффициента риска аварии:

$$R_a = \lambda \cdot \vartheta_y; \quad (3.5.1)$$

где: λ – коэффициент опасности аварии;

ϑ_y – коэффициент уязвимости аварии мерзлотного устройства.

$$R_a = 0,529 \cdot 0,468 = 0,247;$$

Степень риска аварии оценивается по величине коэффициента риска аварии R_a в соответствии с данными таблицы 3.16.

Таблица 3.16 – Степень риска аварии

№ п/п	Степень риска аварии	R_a
1	малая (нормальный уровень безопасности)	не более 0,15

Окончание таблицы 3.16

2	умеренная (пониженный уровень безопасности)	свыше 0,15, но не более 0,3
3	большая (неудовлетворительный уровень безопасности)	свыше 0,3, но не более 0,5
4	аварийная ситуация (опасный уровень)	свыше 0,5

Риск аварии, по результатам вышеприведенных расчетов оценивается как «умеренный».

Бетонный водосброс. Интегральные оценки опасности аварии сооружения с мерзлотным устройством и уязвимости водосброса представлены соответственно в таблицах 3.17 и 3.18.

Таблица 3.17 – Оценки опасности аварии сооружения с мерзлотным устройством и уязвимости водосброса

№ п/п	Показатель опасности	Степень опасности	Код	Отличительные признаки
1	показатель 1	малая	1	не предполагается превышения принятых при расчетном обосновании сооружения природных нагрузок и воздействий
2	показатель 2	средняя	2	недостаточный объем инженерно-геологических изысканий;
3	показатель 3	средняя	2	не соответствуют проекту плотность и качество грунтов засыпки пазух водосброса. В ходе эксплуатации повышен класс капитальности с III до II без проработки необходимых аспектов соответствия сооружения новому статусу
4	показатель 4	очень большая	4	возможна ЧС с числом пострадавших более 50 человек и нарушением жизнедеятельности свыше 500 человек

Интегральный код показателей опасности составит 1224, что соответствует коэффициенту опасности $\lambda = 0,773$.

Таблица 3.18 – Оценки опасности аварии сооружения с мерзлотным устройством и уязвимости водосброса

№ п/п	Показатель опасности	Степень опасности	Код	Отличительные признаки
1	показатель 1	средняя	2	в месте сопряжения плотины с подводящим каналом обнаружена полость размером $0,5 \times 0,5$ м с фильтрационным ходом в тело плотины; в месте сопряжения бетонного левобережного устоя с земляной плотиной в районе ремонтных шандор обнаружены два провала размером $1,0'1,0$ м глубиной 0,5 м. на правобережном береговом устое наблюдались небольшие разрушения бетона - каверны, трещины, фильтрация воды через бетон; полностью разрушены уплотнения затворов, на быстротоке и в водобойном колодце обнаружены места разрушения бетона с обнажением арматуры, трещины, повреждения железобетонный плит крепления водоотводящего канала, в районе быстротока и водобойного колодца из засыпки пазух отмечается фильтрация, гидромеханическое оборудование выработало свой ресурс.

Окончание таблицы 3.18

2	показатель 2	большая	3	низкий уровень квалификации и недоукомплектованность штатов (нет специалистов-гидротехников), отсутствует инструкция по эксплуатации.
3	показатель 3	высокая	3	отсутствует план ликвидации аварий и необходимый аварийный запас материалов для выполнения аварийно-восстановительных работ; неподготовленность персонала к локализации и ликвидации аварии

Таким образом, интегральный код показателя уязвимости по таблице 3.18 составляет 233. Коэффициент уязвимости ϑ_y в соответствии с таблице 3.15 Приложения А (Данные для расчета) составляет 0,834.

Коэффициент риска аварии равен:

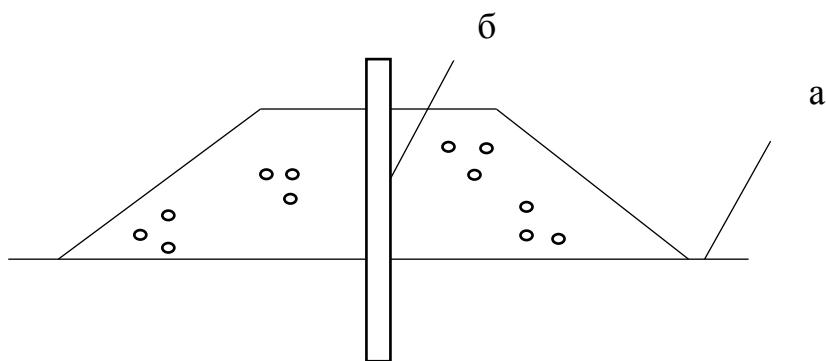
$$R_a = 0,773 \cdot 0,834 = 0,664;$$

Согласно таблице 3.16 степень риска аварии для рассматриваемого водосброса принимается как «критическая ситуация».

4 Технико-экономическое обоснование использования воздушной замораживающей системы

Экономическая эффективность новых предложений по созданию мерзлой стенки может быть определена путем сравнения основных затрат на рисунок 4.1, схема «А» («классическая» мерзлотная завеса) и рисунок 4.2, схема «Б» (предлагаемая мерзлая подпорная стенка).

В первой схеме суммарная стоимость мерзлотной завесы в основном будет определяться глубиной и количеством металлических замораживающих колонок, а также вентиляторов, побуждающих холодный наружный воздух двигаться в этой системе.

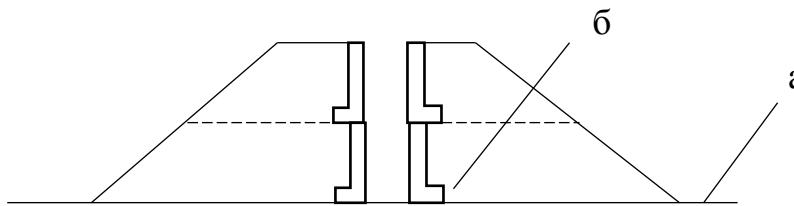


- а) подготовленное грунтовое основание;
- б) замораживающая колонка;

Рисунок 4.1 – Схема «А» «классическая мерзлотная завеса (неслойное намораживание грунта)

Во второй схеме суммарные затраты на замораживание будут определяться стоимостью внутренней подпорной стенки из железобетонных элементов, позволяющих использовать естественную вентиляцию для создания мерзлого элемента в центральной части профиля. Здесь затраты на

металлические замораживающие колонки не требуются. Также существенно уменьшаются затраты на устройство вентиляции.



- а) подготовленное грунтовое основание;
- б) конструкция железобетонных элементов уголкового профиля;

Рисунок 4.2 – Схема «Б» предлагаемая мерзлая подпорная стена

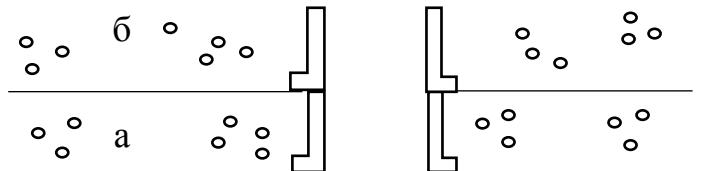
Данное технологическое решение по созданию конструкции мерзлого типа упрощает схему прогона охлажденного воздуха в основание и тело отсыпанной плотины, в сравнении с прогоном воздуха по многочисленно установленным металлическим колонкам.

Кроме того, расход материала (металл, устройство нагнетания воздуха в трубы – вентиляторы) во втором случае несопоставимо больше, нежели в предложенном способе воздушного охлаждения грунта естественным путем (металлические трубы не используются).

Схема «В» введение завесы в процессе возведения плотины. Эта схема предусматривает послойное возведение плотины с соответствующим послойным намораживанием грунта.

Соответствующая схема показана на рисунке 4.3 выполнением трудоемких работ по их извлечению, исключаются работы по нагнетению воздуха в трубы при помощи вентиляторов, следовательно повышается качество монтажа замораживающих колонок и, самое главное, ускоряется ввод в эксплуатацию системы замораживания.

Промораживание грунтов ядра и его основания возможно параллельно с возведением плотины. Главным ее недостатком является возможность повреждения колонок в период строительства.



- а) подготовленное основание и установка
первого железобетонного элемента уголкового профиля;
б) отсыпка нового слоя грунта;

Рисунок 4.3 – Схема «В» создания льдогрунтового ядра плотины с
послойным намораживанием грунта

Летом происходит установка железобетонных блоков уголкового профиля, затем сверху отсыпается грунт. В процессе длительной зимы нагнетается холод естественным путем. Путь движению воздуха к грунту пресекается, либо открывается в зависимости от времени года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За последние годы в связи с очевидным потеплением климата, усиливаются процессы оттаивания вечномерзлых толщ, особенно содержащих крупные ледяные включения. В то же время льдистые массивы особенно прибрежные используются для прокладки -нефте и газопроводов, устройства причалов, временных и постоянных дорог и т.д. Всем этим сооружениям необходимо обеспечить устойчивость и надежность. Это достигается прежде всего использованием устройств, в которых применяется естественный холодный воздух (воздушные колонки, термосифоны и др.).

В данной работе рассмотрены два практически применимых способа расчета указанных устройств, проведены сравнительные расчеты для аналогов и для вновь предлагаемой конструкции защитного терморегулирующего сооружения.

Показано, что воздушные замораживающие системы являются вполне надежным и достаточным вариантом обеспечения устойчивости льдонасыщенных мерзлых массивов, особенно в пределах прибрежных и шельфовых территорий. Совершенствование систем СОУ продолжается в направлении конструктивно-технологических решений и повышения эксплуатационных качеств.

Считаю целесообразным в дальнейшем продолжить изучение данной проблемы, учитывая опасное оттаивание мерзлых массивов особенно на вновь осваиваемых территориях.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Морские гидротехнические сооружения на континентальном шельфе: Учеб./Г.В. Симаков, К.Н. Шхинек, В.А. Сиелов и др. – М: Изд-во Судостроение, 1989. – 328 с.
2. Берегозащитные сооружения: Учеб./Т.Г. Смирнова, Ю.П. Правдивец, Г.Н. Смирнов. – М: Изд-во АСВ, 2002. – 303 с.
3. Кузнецов Г.И., Крук Н.В. Мерзлотные подпорные стены в гидротехническом строительстве. Известия вузов. Строительство 2018 № 1. – 76–83 с.
4. Техносферная безопасность сооружений при строительстве на Севере: Учеб./Кузнецов Г.И., Балацкая Н.В. –М: СФУ 2012. – 50 с.
5. Рекомендации по проектированию и строительству плотин из грунтовых материалов для производственного и питьевого водоснабжения в условиях Крайнего Севера и вечной мерзлоты ВНИИ ВОДГЕО –М: Москва, Стройиздат, 1976. – 112 с.
6. Гончаров Ю.М. Гидротехнические сооружения на мелиоративных системах. КрасГАУ. Красноярск, 2010. – 499 с.
7. Патент на изобретение № 2649021 Грунтовая плотина с мерзлотной завесой в теле и основании Авторы: Кузнецов Г.И, Крук Н.В., 2017. – 5 с.
8. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах: Учеб./ Гончаров Ю.М. –М: Изд-во ИМЗ СО РАН 2016 г. – 406 с.
9. Основы геотехники в криолитозоне: Учеб./ Хрусталев Л.Н. – М: Изд-во МГУ, 2005. – 543 с.
10. А.А. Цвид К вопросу о сооружении земляных плотин с замораживанием естественным холодом. Известия восточных филиалов Академии наук СССР № 3, 1957. – с. 88-93.
11. А.А. Цвид Расчет времени замораживания грунтов естественным холодом. Известия Сибирского отделения Академии наук СССР № 6, 1959. – 59–69 с.

12. В.И. Макаров Термосифоны в северном строительстве. – Новосибирск –М: Наука, 1985. – 167 с.
13. СТО 4.2-07-2014 Система менеджмента качества. Общие требования к построению, изложению и оформлению документов учебной деятельности. – Красноярск: ИПК СФУ, 2014. – 60 с.
14. Н.А. Бучко, В.А. Турчина Искусственное замораживание грунтов – М: Информэнерго, 1978. – 64 с.
15. Кузнецов Г. И., Крук Н.В. Мерзлотные подпорные стены в гидротехническом строительстве / Кузнецов Г.И., Крук Н.В // Известия вузов. Строительство – 2018. – № 1. – С. 76–83.
16. Патент РФ 2005118 Способ образования противофильтрационного экрана [Электронный ресурс] / В. С. Пивкин // НПО Поиск Роспатента – 1991. – Режим доступа: <http://www.findpatent.ru/patent/200/2005118.html>
17. Патент СССР 1694771 Способ возведения каменно-ледяной плотины [Электронный ресурс] / Я.А. Кроник // Московский инженерно-строительный институт им. В.В. Куйбышева – 1991. – Режим доступа: <http://www.findpatent.ru/patent/169/1694771.html>
18. Патент РФ 2537437 Способ укрепления грунтов основания зданий и земляного полотна линейных сооружений на вечномерзлых грунтах [Электронный ресурс] / А.А. Шилин, Л.В. Фабиянский // Закрытое акционерное общество «Триада-Холдинг» – 2014. – Режим доступа: <http://www.findpatent.ru/patent/253/2537437.html>
19. Сооружения из грунтовых материалов в районах Крайнего Севера Г.И. Кузнецов 1978 –М: СФУ – 77 с.
20. Федеральный закон «О безопасности гидротехнических сооружений» от 21.07.1997 г. № 117-ФЗ (с последующими редакциями в Федеральных законах от 10.01.2003 г. № 15-ФЗ, от 22.08.2004 г. № 122-ФЗ, от 09.05.2005 г. № 45-ФЗ, от 18.12.2006 г. № 232-ФЗ и изменениями, внесенными Федеральными законами от 27.12.2000 г. № 150-ФЗ, от 30.12.2001 г. № 194-ФЗ, от 24.12.2002 г. № 176-ФЗ, от 23.12.2003 г. № 186-ФЗ);

21. Рекомендации по оценке риска аварий гидротехнических сооружений водохранилищ и накопителей промышленных отходов: метод. рекомендации / В. С. Алексеев [и др.]. – Москва: ФГУП НИИ ВОДГЕО, 2002. – 36 с.

22. РД-03-443-02. Инструкция о порядке определения критерииов безопасности и оценки состояния гидротехнических сооружений накопителей жидких промышленных отходов на поднадзорных Госгортехнадзору России производствах, объектах и организациях. Утверждена постановлением Госгортехнадзора России от 04.02.2002 г. № 10.

23. Стефанишин Д.В. Оценка нормативной безопасности плотин по критериям риска. –М: Москва, «Гидротехническое строительство», 1997, № 2 – с. 44 – 47.

24. Кофф Г.Л., Гусев А.А., Воробьев Ю.Л., Козменко С.Н. Оценка последствий чрезвычайных ситуаций. –М: Изд-во РЭФИА. 1997 – 364 с.

Таблица 3.13 – Значения коэффициентов опасности

$K_{код}$	λ																											
1001	0,176	1101	0,235	1201	0,294	1301	0,353	2001	0,235	2101	0,235	2201	0,353	2301	0,412	3001	0,294	3101	0,353	3201	0,412	3301	0,471					
1002	0,294	1102	0,353	1202	0,412	1302	0,471	2002	0,353	2102	0,412	2202	0,471	2302	0,529	3002	0,412	3102	0,471	3202	0,529	3302	0,588					
1003	0,412	1103	0,471	1203	0,529	1303	0,588	2003	0,471	2103	0,529	2203	0,588	2303	0,647	3003	0,529	3103	0,588	3203	0,647	3303	0,706					
1004	0,529	1104	0,588	1204	0,647	1304	0,706	2004	0,588	2104	0,647	2204	0,706	2304	0,765	3004	0,647	3104	0,706	3204	0,765	3304	0,823					
1011	0,235	1111	0,294	1211	0,353	1311	0,412	2011	0,294	2111	0,353	2211	0,412	2311	0,471	3011	0,353	3111	0,412	3211	0,471	3311	0,529					
1012	0,352	1112	0,412	1212	0,471	1312	0,529	2012	0,412	2112	0,471	2212	0,529	2312	0,588	3012	0,471	3112	0,529	3212	0,588	3312	0,647					
1013	0,470	1113	0,528	1213	0,588	1313	0,647	2013	0,529	2113	0,588	2213	0,647	2313	0,706	3013	0,588	3113	0,647	3213	0,706	3313	0,765					
1014	0,588	1114	0,647	1214	0,706	1314	0,765	2014	0,647	2114	0,706	2214	0,765	2314	0,823	3014	0,706	3114	0,765	3214	0,823	3314	0,882					
1021	0,294	1121	0,353	1221	0,412	1321	0,474	2021	0,353	2121	0,412	2221	0,471	2321	0,529	3021	0,412	3121	0,471	3221	0,529	3321	0,588					
1022	0,412	1122	0,471	1222	0,529	1322	0,588	2022	0,471	2122	0,529	2222	0,588	2322	0,647	3022	0,529	3122	0,588	3222	0,647	3322	0,706					
1023	0,529	1123	0,588	1223	0,647	1323	0,706	2023	0,588	2123	0,647	2223	0,706	2323	0,765	3023	0,647	3123	0,706	3223	0,765	3323	0,823					
1024	0,647	1124	0,706	1224	0,765	1324	0,823	2024	0,706	2124	0,765	2224	0,823	2324	0,882	3024	0,765	3124	0,823	3224	0,882	3324	0,941					
1031	0,353	1131	0,412	1231	0,471	1331	0,529	2031	0,412	2131	0,471	2231	0,529	2311	0,588	3031	0,471	3131	0,529	3231	0,588	3331	0,647					
1032	0,471	1132	0,529	1232	0,588	1332	0,647	2032	0,529	2132	0,588	2232	0,706	2332	0,706	3032	0,588	3132	0,647	3232	0,706	3332	0,765					
1033	0,588	1133	0,647	1233	0,706	1333	0,765	2033	0,647	2133	0,706	2233	0,821	2333	0,823	3033	0,706	3133	0,765	3233	0,823	3333	0,832					
1034	0,706	1134	0,765	1234	0,823	1334	0,852	2034	0,765	2134	0,823	2234	0,941	2334	0,941	3034	0,823	3134	0,882	3234	0,941	3334	1,00					

Таблица 3.15 – Значения коэффициентов уязвимости

$K_{код}$	ϑ_y																												
000	0,0	010	0,099	020	0,201	030	0,300	100	0,168	110	0,267	120	0,366	130															
001	0,066	011	0,168	021	0,267	031	0,366	101	0,234	111	0,333	121	0,432	131	0,534														
002	0,132	012	0,234	022	0,333	032	0,432	102	0,300	112	0,399	122	0,501	132	0,600														
003	0,201	013	0,300	023	0,339	033	0,501	103	0,366	113	0,468	123	0,567	133	0,666														
200	0,333	210	0,432	220	0,534	230	0,633	300	0,501	310	0,600	320	0,699	330	0,801														
201	0,399	211	0,501	221	0,600	231	0,699	301	0,567	311	0,666	321	0,768	331	0,867														
202	0,468	212	0,567	222	0,666	232	0,768	302	0,633	312	0,732	322	0,834	332	0,933														
203	0,534	213	0,633	223	0,732	233	0,834	303	0,699	313	0,801	323	0,900	333	1,00														

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Политехнический институт
Кафедра «Инженерная экология и безопасность жизнедеятельности»

УТВЕРЖДАЮ

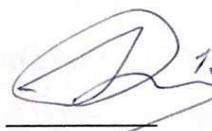
Заведующий кафедрой


T.A. Кулагина
подпись

«17» 07 2019 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Обоснование использования воздушной замораживающей системы
плотины на вечномерзлом основании
20.04.01 «Техносферная безопасность»
20.04.01.03 «Чрезвычайные ситуации в техносфере»

Научный руководитель  д.т.н., профессор Г.И. Кузнецов
подпись, дата

Выпускник  Ю.С. Лапаух
подпись, дата

Рецензент  канд.тех.наук И.В. Варфоломеев
подпись, дата

Красноярск 2019