ВНИИ ВОДГЕО

РЕКОМЕНДАЦИИ

ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ И СТРОИТЕЛЬСТВУ ПЛОТИН ИЗ ГРУНТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО И ПИТЬЕВОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ В УСЛОВИЯХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА И ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ

МОСКВА СТРОЙИЗДАТ 1976

УДК 624.139 : 627.8

Рекомендовано к изданию решением гидротехнической секции НТС ВНИИ ВОДГЕО.

Рекомендации по проектированию и строительству плотин из грунтовых материалов для производственного и питьевого водоснабжения в условиях Крайнего Севера и вечной мерзлоты. М., Стройиздат, 1976. 112 с. (Всесоюз науч.-исслед. ин-т водоснабжения, канализации, гидротехн. сооружений и инженерной гидрогеологии Госстроя СССР ВНИИ ВОДГЕО).

Рекомендации разработаны в помощь проектировщикам и строителям грунтовых плотин, предназначенных для создания водохранилищ производственного и питьевого водоснабжения в районах распространения вечной мерзлоты на Крайнем Севере. В Рекомендациях рассматриваются основные особенности изысканий, проектирования, строительства и эксплуатации этих плотин, отличающие их от плотин зоны умеренного климата.

Значительное место отведено изложению имеющихся методов расчета температурного режима дна и берегов водохранилищ, тела и основания плотин, а также процесса промораживания центральных зон плотин мерзлого типа с помощью воздушных замораживающих систем, получивших значительное распространение. Приведены результаты расчета на ЭВМ температурного режима нефильтрующих грунтовых плотин.

Рекомендации составлены на основе анализа и обобщения опыта строительства и эксплуатации грунтовых плотин на Севере.

Табл. 14, рис. 49.

Р $\frac{30213—578}{047(01)—76}$

Стройиздат. 1976

ВНИИ ВОДГЕО

Рекомендации

по проектировани и строи грунтовых материалов для производственного и пи евого ловиях Крайнего Севера и вечной мерзлоты

Редакция инструкти норм
Зав. редакцией Г. А Жиг
Редактор Л. Н. Ку
Мл. редактор Л. М.
Техн. редактор Н. Г. Бо
Корректоры В. И. Га

Сдано в набор ечати 14/X 1976 г. Т 13992
Формат издан № 1 5,88 усл. печ. л.
(7,65 уч.-изд. л —6233 Зак. № 898 Цена 41 к.

Стройиздат
103006, Москва вская, 2

Московская ти фия № 4 Со
при Государственном комитете Сове
по делам издательств, полиграфии и книжной т
Москва, И-41, Б. Переяславская, д. 46.

ПРЕДИСЛОВИЕ

В Рекомендациях рассмотрены вопросы возведения постоянных грунтовых плотин гидроузлов, возводимых для питьевого и производственного водоснабжения, т. е. мерзлых плотин, предназначенных к эксплуатации при постоянном поддержании противофильтрационного элемента плотины и его основания в мерзлом состоянии, а также специфические вопросы возведения на Крайнем Севере плотин талого типа.

Крупные гидроузлы энергетического назначения и временные и периодически действующие плотины (дамбы), предназначенные для лиманного орошения, затопления дражных полигонов и временных водозаборов, не рассматриваются.

Рекомендации разработаны лабораторией гидротехнических сооружений института ВОДГЕО (кандидаты техн. наук В. И. Титова, Ю. И. Сватеев, инженеры И. С. Клейн, М. С. Родованская, ст. техн. Л. М. Журкова) при участии мерзлотной геотехнической лаборатории Красноярского политехнического института (канд. техн. наук Г. И. Кузнецов).

Рекомендации составлены с учетом опыта проектирования, возведения и эксплуатации плотин в районах Крайнего Севера, накопленного проектными, строительными и научно-исследовательскими организациями (Гидропроектом, его Ленинградским отделением, Дальстройпроектом, Якутнипроалмазом, Вилюйгэсстроем, Хантайгэсстроем, Норильским комбинатом, ВНИИГом им. Б. Е. Веденеева и его Сибирским филиалом, Институтом Мерзлотоведения СО АН СССР, Горьковским и Московским инженерно-строительными институтами, Северо-Восточным комплексным НИИ АН СССР, Красноярским Промстройниипроектом и др.), и итогов шести Всесоюзных конференций и совещаний по гидротехнике Крайнего Севера и II Международной конференции по мерзлотоведению (Якутск — 1973).

Многие положения рекомендаций основываются на достижениях в области инженерного мерзлотоведения и меха-

ники мерзлых грунтов, изложенных в трудах чл.-корр. Академии наук СССР Н. А. Цытовича.

При составлении Рекомендаций использованы результаты натурного обследования строящихся и эксплуатируемых плотин для водоснабжения в различных районах Севера — на Чукотке, в Магаданской области, Якутской АССР, в районе г. Норильска, а также крупных плотин Вилюйской и Хантайской ГЭС.

Учтены также результаты работ ведущих специалистов по северному плотиностроению тт. Г. Ф. Биянова, проф. П. А. Богословского, Л. Е. Ведерникова, В. Г. Гольдтмана, В. Н. Грандилевского, В. В. Знаменского, Р. М. Каменского, Г. И. Коненкова, А. Л. Кузнецова, Н. Н. Петруничева, Б. С. Суворова, С. Г. Цветковой, Г. С. Шадрина, Г. Я. Яппу и др.

При составлении Рекомендаций использован опыт исследований переработки берегов северных озер и водохранилищ (С. В. Томирдиаро), морозного пучения (Я. А. Кроник), морозобойного трещинообразования (С. Е. Гречищев) и разработки, хранения, укладки грунтов в плотину (Ю. Н. Мызников).

Рекомендации по расчету теплофизических характеристик грунтов составлены по материалам Л. Т. Роман.

Составители с благодарностью приняли и учли замечания и пожелания, поступившие от следующих специалистов: И. А. Васильевой (ВНИИГиМ), С. Е. Гречищева (Всегингео), П. И. Дулинца (Промэнергопроект, Иркутск), проф. К. А. Михайлова, С. И. Мигина, А. И. Пилюгина (ВНИИ ВОДГЕО), В. А. Сорокина (Дальстройпроект, Магадан), В. С. Тимофейчука (ВНИИПрозолото), С. В. Томирдиаро (СВКНИИ СО АН СССР, Магадан), С. В. Борткевича и Н. А. Красильникова (НИС Гидропроекта им. С. Я. Жука).

Все замечания институт просит направлять по адресу: 119048, Москва, Комсомольский проспект, 42 ВНИИ ВОДГЕО.

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. Настоящие Рекомендации предназначены для использования при проектировании и строительстве земляных и каменно-земляных плотин с напором до 25 м, входящих в состав гидроузлов производственного и питьевого водоснабжения районов Крайнего Севера.

1.2. При проектировании плотин на севере следует учитывать требования следующих глав СНиП:

«Инженерные изыскания для строительства. Основные положения»;

«Гидротехнические сооружения речные. Основные положения проектирования»;

«Плотины из грунтовых материалов»;

«Земляные сооружения».

1.3. Инженерно-геологические изыскания и геотехконтроль должны производиться с учетом:

а) Рекомендаций по методике изучения подземных льдов и криогенного строения многолетнемерзлых грунтов, ПНИИИС, М., 1969.

б) Рекомендаций по методике изучения солифлюкционных процессов при инженерных изысканиях, ПНИИИС, М., 1969.

в) Рекомендаций по методике изучения термокарстовых процессов при инженерных изысканиях в области многолетнемерзлых горных пород. ПНИИИС, М., 1969.

г) Руководства по определению физических, теплофизических и механических характеристик мерзлых грунтов. М., Стройиздат, 1973.

1.4. В настоящих Рекомендациях рассматриваются конструктивные, технологические особенности и расчеты плотин из грунта и камня, обусловленные климатическими, гидрогеологическими и мерзлотными особенностями районов Крайнего Севера, которые характеризуются отрицательной среднегодовой температурой воздуха и вечномерзлыми грунтами в основании.

1.5. Районы распространения вечномерзлых грунтов могут быть охарактеризованы следующими особенностями:

длительной суровой зимой; большим разнообразием мерзлотных явлений, включающих: насыщенность грунтов текстурообразующим льдом, часто с крупными ледяными включениями; термокарст; наледи; морозобойные трещины и морозное пучение; солифлюкцию, термопросадочность и термоабразию; большим диапазоном глубин слоя сезонного оттаивания (от 0,3—0,5 м при наличии мохорастительного покрова до 3 м и более в грунтах, не прикрытых снегом или растительностью); значительной скоростью ветра в сочетании с большим количеством снега и частой сменой погодных условий в прибрежных районах Крайнего Севера.

1.6. Гидрологический режим рек и ручьев, используемых для создания водохранилищ на Крайнем Севере, отличается следующими особенностями:

преимущественно поверхностным питанием с бурными паводками;

промерзанием до дна рек и ручьев, часто сопровождающимся перемерзанием подруслового талика;

значительными потерями объема водохранилища на льдообразование в период наибольшего дефицита воды (толщина льда достигает 2 м).

1.7. Создание водохранилищ вносит существенные изменения в природные мерзлотные условия дна водохранилища, его берегов и нижнего бьефа. Эти изменения могут сопровождаться нарушением устойчивости оттаивающих берегов водохранилища, вытаиванием погребенных льдов, всплыванием затопленных участков растительного слоя и торфов и др.

1.8. При проектировании грунтовых плотин следует учитывать, что длительное воздействие низких отрицательных температур угрожает пучением грунтов основания у примыканий плотины к бортам и у ее подошвы, образованием морозобойных трещин в плотине и в береговых примыканиях, лишенных растительного покрова, образованием наледей в местах выхода на поверхность воды, фильтрующейся через сооружения и в обход их.

2. ТРЕБОВАНИЯ К ИЗЫСКАНИЯМ

2.1. Объем изысканий, необходимых для разведки створа, карьеров грунтов и месторождений камня и для обоснования проектного задания, предусмотренный для плотин в районах умеренного климата, должен быть выполнен полностью согласно требованиям глав СНиП, указанных в п. 1.2.

2.2. При изысканиях в северных районах, кроме того, должны быть выявлены:

изменяющиеся формы ландшафта — солифлюкционные склоны и скорости их оползания, а также изменяющиеся очертания берегов термокарстовых озер, направления и скорости их миграции;

режим грунтовых вод — подмерзлотных, межмерзлотных, надмерзлотных и особенности наледеобразования;

разделение годового слоя осадков на выпадающие в виде дождя и снега, розы ветров для теплого и холодного периодов года, продолжительность и повторяемость пурги, температура воздуха и скорости ветра в пургу, продолжительность морозных периодов и скорости ветра в эти периоды.

2.3. В створе плотины и на прилегающей территории должны быть определены:

а) мощность и характер распространения вечной мерзлоты, температура грунтов основания до глубины не менее двух напоров, глубина зоны сезонных колебаний температуры и глубины сезонного оттаивания в разных грунтах и условиях;

б) максимальная глубина залегания погребенных льдов, их виды (клиновидный, пластовый), размеры и ориентация наиболее крупных из них в плане и в разрезе вдоль напорного фронта гидроузла и в береговых примыканиях;

в) размеры и очертания подруслового талика и их сезонные изменения;

г) степень трещиноватости коренных скальных пород, ее изменения по глубине, характер напластования, углы падения и направления простирания пластов, размеры трещин, их направления и состав заполнителя;

д) льдистость и суммарная влажность (п. 1.3г) рыхлых пород основания;

е) мощность и характер распространения растительного слоя и других растительных остатков; размеры и характер распространения неперегнивших органических включений;

ж) проявления пучения и морозобойного трещинообразования в грунтах основания вблизи створа и береговых примыканий проектируемой плотины;

з) температурный и ледовый режим в водотоке, а также воды и дна близлежащих озер, их сезонные изменения;

и) наличие, особенности эксплуатации и термический режим существующих гидротехнических и других сооружений в районе проектируемого водохранилища и в зоне его гидротермического влияния.

2.4. Материалы изысканий карьеров должны содержать:

а) объем запасов, мощность пласта, глубину залегания и степень неоднородности по высоте слоя каждого из необходимых для плотины видов грунта, изменения степени неоднородности по карьеру в плане и содержание органических веществ;

б) обводненность карьеров, возможность стока и отвода поверхностных вод;

в) глубину сезонного оттаивания грунта под растительным слоем и после его снятия, глубину сезонного промерзания талого грунта в разрыхленном состоянии, под открытой и покрытой естественным слоем снега поверхностью;

г) оценку возможного влияния режима надмерзлотных и межмерзлотных вод на разработку грунтов в карьерах; возможность отвода из карьера их и выделяющейся при оттаивании грунтов воды;

д) наличие и объем запасов талых мелкозернистых грунтов, слагающих дно близлежащих озер и пригодных для разработки и укладки в плотину; возможность их осушения.

2.5. В зоне затопления и на берегах будущего водохранилища изысканиями необходимо оценить:

а) опасность ускорения солифлюкционного оползания берегов вследствие размывающего воздействия водохранилища;

б) опасность вытаивания погребенных включений льда и термопросадочность мерзлых грунтов в основаниях существующих сооружений в зоне теплового воздействия водохранилища;

в) осадку дна будущего водохранилища — на основе сопоставления с измерениями высоты берегов и глубин соседних озер (см. приложение 6);

г) опасность протаивания под действием водохранилища подземных включений льда на водоразделах в пологих долинах и прорыва водохранилища в соседние бассейны.

2.6. Для составления рабочих чертежей в створе плотины необходимо дополнительно определить:

а) физико-механические и теплофизические характеристики грунтов основания в мерзлом и переходном состоянии (угол внутреннего трения, сцепление, сжимаемость, теплоемкость, тепло- и температуропроводность, показатели деформируемости и прочности скальных пород);

б) сдвиговые характеристики талого слоя по мерзлому слою и коренных пород по трещинам и ледяным прослойкам;

в) относительные осадки пород основания после оттаивания, их изменение по глубине и несущая способность грунтов в талом и переходном состоянии.

2.7. Для составления рабочих чертежей по карьерам необходимы следующие дополнительные материалы изысканий:

а) объемные веса, зерновые и минералогические составы грунтов;

б) физико-механические характеристики грунтов нарушенной структуры — углы внутреннего трения, естественного откоса, сцепление и сжимаемость в мерзлом и переходном состоянии, коэффициенты фильтрации в талом состоянии и их изменения как по глубине карьера, так и в плане;

в) влажность и льдистость грунта в естественном состоянии, содержание незамерзшей влаги в связных грунтах при различных отрицательных температурах, способность грунтов отдавать влагу при оттаивании, границы спектра температур фазовых переходов грунтовой влаги, условия возникновения и возможность развития фильтрации в мерзлых и оттаивающих грунтах;

г) способность грунтов в карьерах нести нагрузку от механизмов, используемых в их разработке, в оттаивающем (переходном) и в талом состоянии.

3. ОПЫТНЫЕ РАБОТЫ И ИССЛЕДОВАНИЯ

3.1. В начале строительства плотины на строительной площадке и в карьерах должны проводиться опытные работы по уточнению проекта разработки, укладки грунтов в плотину и хранения их зимой в талом состоянии. Работы выполняются строителями по заданию проектной организации. Стоимость опытных работ включается в смету строительства.

3.2. На опытных забоях карьера рекомендуется производить:

а) выбор рационального способа рыхления мерзлого грунта (взрывание, ударное и тракторное рыхление), определение скорости оттаивания разрыхленного мерзлого грунта;

б) выбор рационального способа оттаивания разных мерзлых грунтов (гидрооттаивание, дождевание, оттаивание под пленкой, выхлопными газами турбинных двигателей, топливными форсунками, электронагревателями, пропусканием электрического тока через грунт и т. д., а также различными их сочетаниями);

в) определение оптимальной сетки скважин и способа взрывания для получения оптимального гранулометрического состава горной массы в каменных карьерах;

г) определение выветриваемости камня из слабых пород в открытой отсыпке и при наличии снегового покрова.

3.3. Вблизи створа плотины опытным путем необходимо произвести:

а) выбор рационального способа складирования талого грунта и хранения его в талом состоянии в течение всего срока строительства (оптимальные размеры буртов, использование искусственных и естественных углублений, засоление и утепление верхнего слоя грунта в буртах);

б) выбор рационального способа подсушивания переувлажненных грунтов (выдерживание в буртах в течение определенного срока, под шатром, добавки реагентов для ускорения водоотдачи, использование электроосмотического эффекта);

3.4. На опытных картах плотины рекомендуется произвести:

а) выбор оптимальных размеров карты и забоя при разработке котлованов в зависимости от сезона;

б) проверку эффективности принятой в проекте технологии транспорта и распределения грунтов по карте в различных погодных условиях;

в) проверку эффективности принятого способа уплотнения грунта (вибрационного, ударного, укатки катками, транспортом, тракторами) исходя из местных условий и возможностей;

г) разработку технологии и приспособлений для укладки и сварки полимерных пленок, образующих противофильтрационные устройства (включая опытную отсыпку подстилающего и защитного слоев);

д) выбор оптимального способа и отработку технологии предпостроечного оттаивания и уплотнения основания;

е) проверку эффективности принятых в проекте способов сохранения мерзлоты в основании мерзлых плотин и переораживания таликов;

ж) определение скорости промерзания уложенного в плотину грунта и проверку эффективности запроектированных способов удаления льда, снега и воды с поверхности уплотненного грунта при возобновлении его укладки после перерыва.

3.5. На основе опытных работ необходимо установить допустимые: температуру воздуха, скорость ветра и интенсивность осадков для производства различных видов работ

в карьере, в местах закладки грунтов на хранение, на опытных картах плотины, а также установление их ориентировочных сроков по сезонам.

3.6. Все виды опытных работ должны сопровождаться регулярным контролем температуры, влажности и плотности грунтов.

3.7. Опытным путем должны быть выработаны наиболее эффективные схемы использования механизмов, разработаны приспособления и технология подготовки дна водохранилища к затоплению.

4. ВЫБОР ТИПА И СТВОРА ПЛОТИНЫ. КОМПОНОВКА ГИДРОУЗЛА

4.1. Выбор типа и створа плотины и компоновка гидроузла определяются мерзлотно-инженерно-гидрогеологическими условиями створа, наличием местных строительных материалов, прогнозом теплового влияния водохранилища на мерзлоту и другими факторами.

4.2. Земляные и каменно-земляные плотины по принципу строительства и температурному режиму тела плотины подразделяются на мерзлые и талые.

В мерзлых плотинах к моменту наполнения водохранилища центральная часть должна находиться в промороженном состоянии. Талая плотина может воспринимать напор воды водохранилища, когда противофильтрационные элементы находятся в талом состоянии. В мерзлых плотинах фильтрация не допускается; талые плотины, кроме плотин с пленочными противофильтрационными устройствами, проектируются фильтрующими.

4.3. Плотины из местных материалов и водосбросы низконапорных гидроузлов систем водоснабжения надлежит проектировать по одному из двух принципов использования основания — с сохранением его в мерзлом состоянии (I принцип) и с допущением оттаивания основания под противофильтрационным устройством плотины (II принцип).

4.4. При строительстве по первому принципу должно быть предусмотрено сохранение отрицательных температур в вечномерзлых грунтах основания мерзлой плотины и водосброса и в береговых примыканиях или понижение температуры мерзлого основания путем дополнительного охлаждения в зоне контакта с наиболее ответственной центральной частью профиля плотины.

При этом неизбежно происходит оттаивание основания верхового клина, деформирование которого вследствие

осадки оттаивающих грунтов не должно приводить к потере общей устойчивости сооружения.

4.5. При строительстве по II принципу допускается:

повышение отрицательных температур вечномерзлых грунтов основания;

оттаивание основания в период эксплуатации под действием тепла водохранилища и фильтрации.

4.6. По инженерно-мерзлотно-геологическим особенностям строения и чувствительности к изменениям природного температурно-влажностного режима в зоне теплового влияния водохранилища можно выделить следующие типы оснований:

а) прочные скальные основания, талые или мерзлые (нарушение первичного криогенного строения мерзлой скалы и происходящих в ней природных мерзлотных процессов не оказывает существенного влияния на прочностные, деформационные и фильтрационные свойства оттаивающего основания);

б) непросадочные нескальные основания (нескальные талые грунты в пределах подруслового талика, сквозного или замкнутого, окруженного плотными, нераспученными льдом, недеформирующимися при оттаивании водоупорными мерзлыми породами);

в) просадочные льдистые скальные основания (мерзлые скальные основания, характеризующиеся значительной трещиноватостью, льдонасыщенностью и пониженной прочностью в верхней выветренной зоне; изменение естественного температурного режима и криогенного строения скалы сопровождается осадкой и увеличением водопроницаемости при оттаивании);

г) мерзлые рыхлые, высокольдистые отложения ограниченной мощности (по сравнению с высотой плотины), подстилаемые водоупорными при оттаивании непросадочными породами;

д) мерзлые рыхлые, льдонасыщенные отложения значительной мощности (часто с крупными включениями подземного льда), характеризующиеся существенной величиной осадки при оттаивании в сочетании с термокарстовыми процессами в зоне теплового влияния водохранилища при резком снижении прочности и несущей способности оттаивающих грунтов.

4.7. Во всех случаях, когда после оттаивания основание остается достаточно надежным, следует проектировать талую плотину. Такая плотина более проста в эксплуатации и,

в отличие от мерзлой, не требует затрат на оборудование и эксплуатацию охлаждающих устройств.

4.8. Талые плотины целесообразно проектировать на основаниях типа «а» и «б» (см. п. 4.6). На основаниях типа «в», «г» и «д» применение талых плотин требует сложного комплекса мероприятий по предварительному оттаиванию и уплотнению или замене термопросадочных льдистых слоев основания.

4.9. При явной технико-экономической нецелесообразности предпостроечного оттаивания льдистого основания, теряющего несущую способность или противофильтрационные свойства при оттаивании, следует проектировать мерзлую плотину по первому принципу строительства (с сохранением мерзлоты в основании).

4.10. Мерзлую плотину следует проектировать на мерзлом основании любого типа при условии, что трещины мерзлой скалы полностью заполнены льдом или нефильтрующим грунтом, при мощности подруслового талика до 10 м и при отсутствии слоев несцементированных льдом сыпучемерзлых рыхлых отложений; предварительное промораживание и последующее поддерживание талика в мерзлом состоянии является обязательным условием устойчивости мерзлой плотины.

4.11. Возведение мерзлых плотин с промораживаемой центральной частью без предварительного промораживания талика допускается при условии, что скорость фильтрации в талике не превышает 0,1 м/ч, что обеспечивает возможность постепенного промораживания плотины и основания замораживающими устройствами после возведения плотины.

4.12. Створ плотины должен выбираться возможно ближе к объекту водоснабжения и на достаточном удалении от источников загрязнения в течение расчетного периода эксплуатации водохранилища и с учетом перспективы хозяйственного освоения района.

4.13. При выборе створа плотины необходимо учитывать, что:

а) солифлюкционные склоны после нарушения их естественого термического состояния характеризуются прогрессирующим течением значительных масс оттаивающего грунта в водохранилище, значительно сокращающих его объем и загрязняющих воду;

б) сооружения, расположенные на берегах водохранилища, могут деформироваться вследствие термоэрозионной переработки берегов, вытаивания погребенного льда, значи-

тельной просадочности грунта при оттаивании и ускорения солифлюкционных процессов после создания водохранилища.

4.14. Сочетание I и II принципов строительства, а также талой и мерзлой конструкций плотины в одном створе не рекомендуется.

4.15. При проектировании талых плотин особых требований к компоновке с другими сооружениями гидроузла не предъявляется.

4.16. При проектировании плотины мерзлого типа необходимо, чтобы водопроводящие устройства не пересекали тела плотины. Водозаборы, водосбросы и водоспуски должны располагаться за пределами тела плотины. При устройстве водосбросных сооружений в обход плотины рекомендуется между ними и плотиной оставлять массив естественного мерзлого грунта длиной не менее 20 м, защитив его от протаивания со стороны водосброса и верхнего бьефа.

4.17. Если мерзлая плотина предназначена для создания пруда-охладителя, следует проектировать сброс горячих вод в хвостовую часть водохранилища, а водозабор располагать не ближе 200 м от плотины.

5. ТРЕБОВАНИЯ К КОНСТРУКЦИЯМ ПЛОТИН

Мерзлые плотины

Специфические особенности плотин мерзлого типа

5.1. Нефильтрующие мерзлые плотины позволяют максимально использовать мерзлотно-грунтовые и климатические особенности районов Крайнего Севера, в частности достаточно высокую несущую способность мерзлых грунтов и их водоупорные свойства. Эксплуатация водохранилищ возможна без потерь воды на фильтрацию, что особенно важно при строительстве плотин на сильнофильтрующих при оттаивании грунтах в районах с низким модулем поверхностного стока, в частности на мелких перемерзающих водотоках.

5.2. Основными конструктивными элементами, определяющими прочность и водонепроницаемость мерзлой плотины, являются искусственно промороженные или сохраняемые в естественном состоянии мерзлые водонепроницаемые грунты, поры которых заполнены льдом. Зона постоянно мерзлого грунта занимает среднюю и низовую часть плотины, а зона постоянно талого грунта — верховую часть. Водонепроницаемой преградой и упором, воспринимающим давление воды, служит мерзлая низовая часть и ядро плоти-

ны. Применение противофильтрационных экранов, располагаемых в теле талого верхового клина или по верховому откосу, нецелесообразно, так как деформации талой зоны при осадке оттаивающего основания верхового клина могут быть причиной опасных деформаций экрана. Верховую призму следует рассматривать как теплоизоляцию, предохраняющую центральную мерзлую зону от оттаивания.

5.3. Мерзлое водонепроницаемое тело плотины может быть создано различными способами:

а) искусственным промораживанием центральной части (ядра) и подруслового талика после возведения плотины на полную высоту перед заполнением водохранилища или в первые годы его эксплуатации с помощью принудительного охлаждения воздушной (реже рассольной) замораживающей системой или термосваями;

б) послойным промораживанием талого грунта, укладываемого в период низких отрицательных температур воздуха или уложенного в теплое время, но промораживаемого в зимний период;

в) комбинированным способом — послойным промораживанием тела плотины после предварительного искуственного промораживания таликов;

г) промораживанием низового клина плотины в зимнее время с помощью естественной вентиляции пространства под навесом на низовом откосе, а также в сочетании с промораживанием ядра при помощи морозильной системы; на летний период вентиляционные ходы должны быть перекрыты;

д) путем естественного промерзания плотины из талых грунтов под действием отрицательных среднегодовых температур наружного воздуха и вечной мерзлоты основания при достаточной водоупорности противофильтрационного элемента.

Каждому из этих способов создания мерзлого тела плотины должны отвечать свои конструктивные особенности.

Наиболее распространенным в настоящее время является способ промораживания центральных зон плотин в зимнее время с помощью воздушных замораживающих систем. Он является достаточно производительным и простым в устройстве и эксплуатации. В наиболее тяжелых условиях применяются рассольные постоянно действующие замораживающие системы. В последнее время усиленно развиваются автономно и автоматически действующие паро-конденсирующие охлаждающие установки, но для гидротехнического строительства необходимы еще значительные иссле-

дования по созданию простых, надежных и достаточно производительных установок такого типа.

5.4. Постоянно действующая замораживающая установка с принудительной циркуляцией жидкого хладоносителя (рассола) по трубам замораживающих колонок является достаточно надежным способом промораживания плотины.

При проектировании следует учитывать, что она является сложной по устройству, требует тщательного профилактического контроля, чтобы не допустить утечки рассола. Попадание рассола в грунт делает невозможным его замораживание.

Эта система может найти ограниченное применение в случае необходимости промораживания фильтрующих таликов, для ускорения промерзания плотины, для локального термического укрепления мерзлой зоны в случае аварийного оттаивания на отдельных участках напорного фронта.

Применение сложных холодильных установок с жидкими хладоагентами следует допускать только при соответствующем технико-экономическом обосновании.

Применение термосвай рекомендуется только после опытной проверки в натурных условиях холодопроизводительности и параметров мерзлого грунтового цилиндра (радиус, температура, скорость промерзания).

5.5. При возведении мерзлой плотины с послойным естественным промораживанием до значений температур в центральной части профиля, близких к расчетным предельным (стационарным), оттаивание верхового клина не распространяется за пределы вертикали, проведенной из точки уреза воды на профиле верхового откоса из слабофильтрующего грунта. Эту вертикаль можно принять за условную границу талой и мерзлой зон профиля промороженной плотины при среднегодовой температуре наружного воздуха, не превышающей минус 8° С, и температуре воды не выше плюс 4° С.

5.6. Талик, развивающийся в ложе водохранилища при длительной его эксплуатации (25 лет и более), при отсутствии фильтрации и термокарста в породах, слагающих береговые склоны, как правило, не распространяется за урез воды.

5.7. Эффект естественного охлаждения плотины мерзлого типа усиливается:

при северной ориентации низового откоса;

при проведении в конце зимнего периода и весной мероприятий по снегозадержанию на поверхности откосов и гребня. Максимальная эффективность снегозадержания до-

стигается в том случае, если медленное таяние снежного слоя завершается к концу лета, а грунт под снегом не успевает оттаять;

удалением снега с поверхности промерзающего низового откоса и гребня в период устойчивых отрицательных температур наружного воздуха;

устройством сезонных (на весенне-летний период) покрытий поверхности гребня и низового откоса из эффективных теплоизоляторов, например из быстротвердеющей пены (БТП) любого состава и прочности, без предъявления требований по долговечности и влагостойкости (перед наступлением устойчивых морозов такое покрытие должно быть снято);

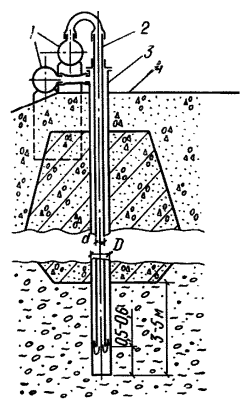


Рис. 1. Схема воздушной замораживающей системы

1 — воздуховоды; *2* — внутренняя труба колонки; *3* — внешняя труба колонки; *4* — гребень плотины

устройством временных или постоянных покрытий — навесов, вентилируемых в течение всего периода устойчивых отрицательных температур воздуха; рекомендуется предусматривать регулирующие щиты, прекращающие доступ воздуха в теплое время года и в периоды метелей; конструкция покрытий-навесов должна обладать теплогидроизоляционными качествами для предотвращения летнего прогрева воздуха под навесом и попадания дождевых и талых вод на поверхность гребня и низового откоса;

5.8. Наибольшую эффективность воздушных морозильных систем могут обеспечить следующие конструктивные особенности (рис. 1):

диаметр внутренней трубы колонки должен быть вдвое меньше внутреннего диаметра внешней трубы колонки, небольшие отклонения допустимы лишь в сторону уменьшения диаметра внутренней трубы

$$\left(\frac{D_{\text{нар}}}{d_{\text{внутр}}} = 2-3\right);$$

внутренняя труба должна подвешиваться на фланце на край внешней трубы колонки с зазором не менее 50 см над дном герметичной внешней трубы;

вход и выход воздуха из колонок должен осуществляться по подводящему и отводящему воздуховодам;

внутренняя труба и межтрубное пространство должны герметично соединяться с воздуховодами гибкими патрубками;

входное и выпускное отверстия воздуховодов должны оборудоваться клапанами, прекращающими доступ воздуха в систему сразу после выключения вентилятора;

для консервации воздушной морозильной системы на теплое время года следует предусмотреть герметизацию воздуховодов и патрубков отключаемых колонок металлическими заглушками на мягких уплотнителях;

каждую воздушную систему следует оборудовать автоматическим выключением при превышении температуры наружного воздуха над температурой поверхности внешней трубы колонки;

при ручном управлении охлаждающей системой подачу воздуха следует производить при температурах его ниже минус 10° С;

для уменьшения нагревания наружных элементов воздушной системы солнечными лучами оголовки морозильных колонок и воздуховоды должны окрашиваться в белый цвет или затеняться навесами, покрываться теплоизолирующей обмоткой;

на случай недостаточного охлаждающего действия системы на отдельных участках плотины со сложным геологическим строением основания следует предусмотреть возможность установки и подключения к воздуховодам дополнительных колонок в период эксплуатации;

для компенсации обрастания морозильных колонок инеем мощность вентиляторов должна не менее чем вдвое превышать расчетную величину мощности, определенную для нормальных условий эксплуатации;

в районах с сильными зимними ветрами входное отверстие распределительного воздуховода следует оборудовать легким фильтром и пространственным лабиринтом, доступным для регулярной очистки его от снежной пыли, которая проникла через фильтр;

вентилятор может быть установлен как на выпускном отверстии отводящего воздуховода, так и на входном отверстии подводящего; выбор режима работы вентилятора (нагнетание или всасывание) осуществляется расчетом на наибольшую хладопроизводительность системы;

нагнетание холодного наружного воздуха в замораживающую колонку рекомендуется осуществлять по внутрен-

ней трубе, а отвод — по кольцевому зазору между внешней и внутренней трубами колонки, если наибольшей льдистостью обладают грунты основания. Если наибольшая льдистость в грунте ядра плотины, то нагнетать лучше по межтрубному пространству с выходом по внутренней трубе;

внешнюю трубу колонки рекомендуется выполнять из стальных или алюминиевых труб, а внутреннюю — из пластмассовых или фанерных (для уменьшения теплообмена между восходящим и нисходящим потоками воздуха и для максимальной холодоотдачи от колонки в грунт); при этом необходимо учитывать принятый способ прогревания колонок при ликвидации ледяных пробок;

рекомендуется устройство термоизоляционной обсыпки вокруг замораживающих колонок (шлак, опилки) в пределах сезонноотаивающего (деятельного) слоя грунта на гребне плотины, для уменьшения прогрева и оттаивания грунта на контакте с прогревающимся летом металлом;

каждая колонка должна оборудоваться люком для ввода приборов, измеряющих скорость потока и температуру воздуха.

5.9. Прогноз предельного температурного состояния мерзлой плотины и дна водохранилища рекомендуется выполнять методом гидроэлектротепловых аналогий или по приближенным формулам в соответствии с рекомендациями приложения 2.

5.10. Рекомендуемые конструктивные схемы мерзлых плотин и пояснения к ним приводятся на рис. 2.

Схема плотины с охлаждающим воздухопроницаемым слоем (рис. 2, *е*) (авторское свидетельство № 383775; бюлл. № 24, 1973 г.) еще не осуществлена. Конструкция позволяет поднимать напор на плотину постепенно и применима для напоров до 10 м.

Требования к конструкциям плотин мерзлого типа

5.11. Центральную часть мерзлых плотин рекомендуется возводить из плотно уложенного талого связного грунта (суглинка или супеси), способного удерживать в порах воду, необходимую для образования водонепроницаемого льдогрунтового ядра.

5.12. Для усиления теплоизолирующего влияния верховой призмы мерзлое ядро плотины рекомендуется располагать на достаточном удалении от верхнего бьефа. Для увеличения объема (толщины) верховой призмы следует

устраивать широкие бермы или уполаживать верховой откос. Уширением верховой призмы обеспечивается и устойчивость плотины при неизбежном оттаивании термопросадочного основания под верховым клином.

5.13. Естественные талики под средней частью профиля мерзлой плотины и низовой упорной призмой должны быть предварительно, до заполнения водохранилища, промороженны. Талик под верховой призмой, учитывая его неизбежное оттаивание в период эксплуатации, желательно сохранить.

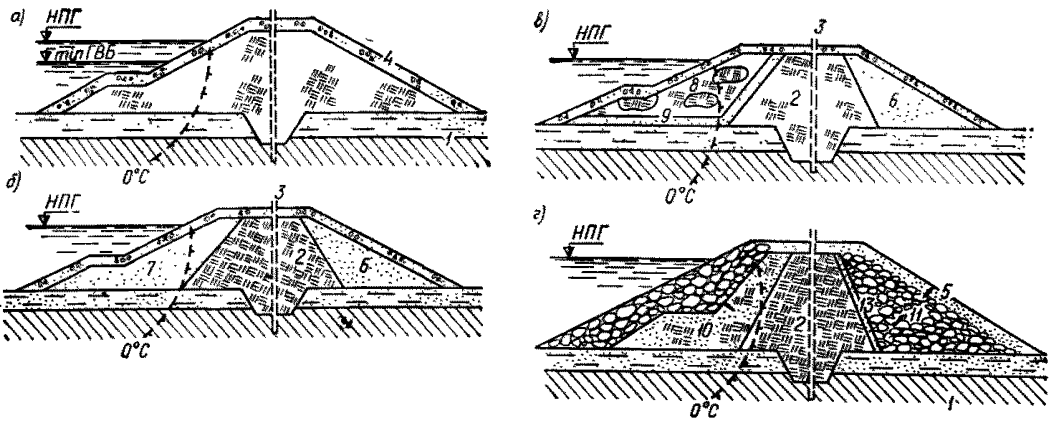


Рис. 2. Рекомендуемые конструктивные схемы мерзлых плотин

а — однородная плотина из связного грунта, отсыпаемого в талом состоянии, без включений торфа и мерзлых комьев; *б* — плотина с мерзлым ядром из связного грунта с верховой и низовой упорными призмами из любых талых грунтов; *в* — то же, с включениями мерзлых комьев в теле верхового клина; *г* — каменно-земляная плотина с мерзлым ядром из связного грунта и верховой теплоизолирующей призмой; *д* — каменно-земляная плотина с мерзлым ядром из связного грунта, верховой призмой из любых местных грунтов и с низовой набросной призмой (стрелками показано направление естественной зимней конвекции воздуха в наброске); *е* — плотина с воздухопроницаемым охлаждающим слоем, стрелками показано направление принудительной фильтрации холодного зимнего воздуха в порах однородного крупнозернистого слоя; *1* — вечномерзлое основание (верхний слой — просадочный льдонасыщенный грунт); *2* — мерзлое ядро из связного грунта; *3* — замораживающие колонки мерзлотной завесы (показаны условно); *4* — защитный слой из песка, песчано-гравелистого или дресвяно-щебенистого грунта; *5* — выравнивающий слой, снижающий естественную конвекцию в наброске; *6* — низовая упорная призма; *7* — верховая упорная призма; *8* — включения мерзлых комьев; *9* — дренирующая переходная зона; *10* — верховая теплоизолирующая призма; *11* — низовая набросная призма; *12* — верховая призма; *13* — переходная зона; *14* — перфорированная труба (галерея, канал) для нагнетания холодного воздуха; *15* — сборный железобетонный коробчатый воздухосборник; *16* — крупнозернистый охлаждающий слой; *17* — границы зоны промораживания

5.14. В однородную плотину и в мерзлое ядро неоднородной плотины допускается укладывать мерзлый грунт в количестве до 15%. В верховую призму допускается укладка до 30% мерзлых комьев и до 10% торфа. При возможности оттаивания низового клина мерзлой плотины включения торфа и мерзлых комьев ограничиваются так же, как и для верховой призмы. При обеспечении внутренних зон от оттаивания как при возведении, так и во время эксплуатации мерзлой плотины содержание мерзлых комьев в низовом клине не ограничивается, торфа даже в мерзлом состоянии не допускается более 20%. Включения торфа и мерзлых комьев должны быть равномерно распределены по объему вмещающего их грунта, а не сосредоточены в отдельных местах и слоях.

5.15. Грунты, укладываемые в верховой клин мерзлой плотины, который в условиях эксплуатации будет талым, должны обладать достаточной сопротивляемостью сдвигу после оттаивания и консолидации, а деформируемость этих грунтов должна находиться в пределах, обеспечивающих монолитность талой части профиля плотины при оттаивании и просадках грунтов основания.

5.16. Для обеспечения водонепроницаемости мерзлых зон и термической устойчивости плотины средняя температура мерзлого ядра и охлаждаемых вечномерзлых грунтов основания и береговых примыканий к моменту заполнения водохранилища должна быть на 1,5° С ниже температуры фазовых переходов влаги в этих грунтах.

5.17. Центральная промороженная зона мерзлой плотины должна быть полностью монолитной и водонепроницаемой; наличие в ней трещин и пустот, а также зон сыпучемерзлых грунтов с неполным заполнением пор текстурообразующим льдом недопустимо. Этим требованиям отвечает грунт с влажностью, близкой к 0,9 полной его влагоемкости $W_п$ при проектной плотности укладки $\gamma_{опт}$.

5.18. Мерзлое ядро должно постоянно составлять сплошную противофильтрационную преграду, смыкающуюся с вечномерзлым основанием. Производительность охлаждающих систем и расстояния между замораживающими колонками, создающими за время их работы необходимый запас холода в плотине, следует рассчитывать по приложению 2.

5.19. К моменту наполнения водохранилища и в первые годы эксплуатации размеры мерзлой зоны могут быть несколько меньше предельных при наличии системы принудительного охлаждения плотины, обеспечивающей ее полную водонепроницаемость. Достаточная для восприятия

напора толщина мерзлого ядра может быть приближенно определена в соответствии с приложением 5.

5.20. Примыкание мерзлой плотины к бортам долины должно осуществляться так, чтобы мерзлая зона тела плотины смыкалась с вечномерзлыми грунтами бортов. Для этого мерзлотная завеса должна быть продолжена в борт долины на величину, определяемую результатами теплотехнического решения задачи оттаивания грунтов на участке примыкания (приложение 2).

5.21. Вытаивание подземных льдов следует считать одной из главных причин разрушающей сосредоточенной фильтрации по термокарстовым полостям и опасных деформаций мерзлых плотин. При проектировании и строительстве мерзлых плотин на рыхлых отложениях, вмешающих ледяные линзы и клиновидные льды, следует учитывать процессы вытаивания крупных ледяных включений в основании и в береговых примыканиях талого верхового клина плотины, а также в пределах теплового влияния водохранилища.

Сопряжение противофильтрационных элементов мерзлой плотины (ядра, диафрагмы, мерзлотной завесы) с высокольдистыми грунтами береговых склонов следует осуществлять путем врезки этих элементов до малопросадочных водоупорных вечномерзлых пород. В берегах противофильтрационный элемент либо должен быть продолжен за прогнозируемую границу переработки льдонасыщенных берегов, либо эти берега конструктивными мероприятиями следует защитить от переработки (приложение 6).

5.22. Льдонасыщенные берега с крупными ледяными включениями в примыканиях к сооружениям напорного фронта могут быть защищены от оттаивания слоем водонепроницаемого грунта (или фильтрующего с пленочным экраном), прикрытого обратным фильтром и камнем или валунами от волнового воздействия водохранилища.

5.23. Для уменьшения осадок и деформаций верховой призмы мерзлой плотины высокольдистые отложения вблизи подошвы верхового откоса рекомендуется предварительно оттаивать или заменять талыми уплотненными грунтами в зоне расчетного оттаивания. Наиболее эффективной такая замена будет при сравнительно неглубоком (до 10 м) залегании кровли малопросадочных вечномерзлых пород.

5.24. Низовую призму мерзлой плотины допускается возводить на льдистых вечномерзлых грунтах основания без их специальной подготовки (предпостроечное оттаивание,

дополнительное промораживание и др.) со снятием растительного слоя.

5.25. Заполненные водой понижения в нижнем бьефе вблизи подошвы низового откоса мерзлой плотины не допустимы. Появляющуюся здесь вследствие фильтрации из берегов или таяния снега и наледей воду необходимо удалять от подошвы плотины.

5.26. При проектировании мерзлой плотины следует учитывать, что в районах распространения клиновидных льдов и других форм подземного льда может происходить сквозное протаивание вечной мерзлоты под дном водохранилища.

5.27. Гребень, низовой откос и надводная часть верхового откоса мерзлой плотины подвержены попеременному замерзанию и оттаиванию. Для предотвращения пучения, морозобойного трещинообразования и солифлюкционных сплывов на низовом откосе слой сезонного промерзания и оттаивания должен отсыпаться из песчаных, гравелистых и щебенистых грунтов без пылеватых и глинистых примесей (прилож. 7).

5.28. Крутизна верхового откоса мерзлой плотины должна назначаться в расчете на полную величину осадки основания верхового клина, т. е. с запасом, обеспечивающим устойчивость верхового откоса в процессе и после оттаивания основания под верховым клином плотины от воздействия тепла водохранилища.

5.29. Принудительное охлаждение плотины системой воздушных замораживающих колонок следует предусматривать на период стабилизации расчетного температурного режима мерзлой части плотины, после чего должны быть предусмотрены возможности прекращения принудительного охлаждения и консервации замораживающей системы, обеспечивающей ее работоспособность в аварийных ситуациях.

5.30. При устройстве низовой упорной призмы из пористого крупнозернистого материала (каменной наброски, гальки или валунов) ядро мерзлой плотины должно отсыпаться из суглинка с содержанием пылеватых и глинистых частиц не менее 40%.

Талые плотины

5.31. Все требования, предъявляемые действующими нормативными документами к плотинам из грунтовых материалов в зоне умеренного климата (п. 1.2), являются обязательными и для талых плотин в условиях Крайнего Севера.

5.32. При проектировании могут применяться следующие конструктивные схемы талых плотин:

а) однородные фильтрующие плотины из связного или несвязного грунта, с обязательным устройством внутреннего утепленного дренажа и защитного слоя, предотвра-

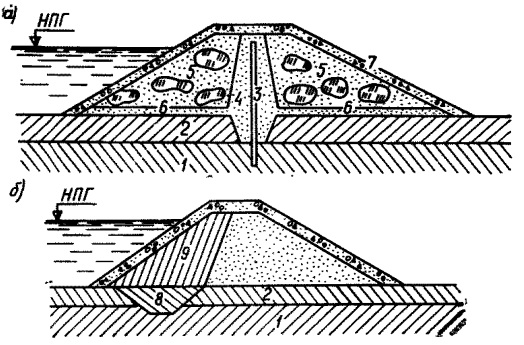


Рис. 3. Схемы талых плотин с жесткой диафрагмой (*а*) и с верховой водоупорной призмой или экраном (*б*)

1 — мерзлый водоупор, непросадочный при оттаивании; *2*—слой высокольдистого грунта, просадочного при оттаивании; *3* — жесткая диафрагма; *4* — песчаная обсыпка; *5* — упорные призмы из любых местных грунтов; *6* — дренирующий слой из местного фильтрующего грунта; *7* — защитный слой из непучинистого грунта; *8* — зуб из глинистого грунта; *9* — верховая водоупорная призма или экран из глинистого грунта.

щающего морозное пучение, трещинообразование и солифлюкционно-оползневые явления в слое сезонного промерзания — оттаивания на гребне, низовом откосе и надводной части верхового откоса. Этот тип плотины рекомендуется применять при непросадочных основаниях типа «а» и «б» (см. п. 4,6), достаточно водоупорных после оттаивания;

б) плотины с глинистым центральным ядром (рис. 4), с экраном или верховой призмой из глинистого грунта (рис. 3б) и упорными призмами из несвязных грунтов или каменной наброски; возведение таких плотин допускается на непросадочных основаниях и на просадочных основаниях ограниченной мощности при обязательном выполнении предпостроечного оттаивания термопросадочного слоя под подошвой плотины;

в) плотины с жесткой центральной диафрагмой, которая прочно заделана в основание, не испытывающее деформаций и обладающее свойствами водоупора после оттаивания; необходимым конструктивным элементом такой плотины следует считать песчаное ядро, предохраняющее диафрагму от повреждения при осадках упорных призм (рис. 3, *а*);

г) каменно-земляные плотины с ядром или экраном из связного грунта, с обязательным устройством теплозащитных слоев из любых местных непучинистых грунтов (кроме торфа), предохраняющих верхнюю часть ядра (экрана)

от глубокого сезонного промерзания, пучения и морозобойного трещинообразования и обеспечивающих нормальную работу внутреннего дренажа при охлаждении низовой каменно-набросной призмы вследствие естественной конвекции холодного воздуха в зимнее время (рис. 4);

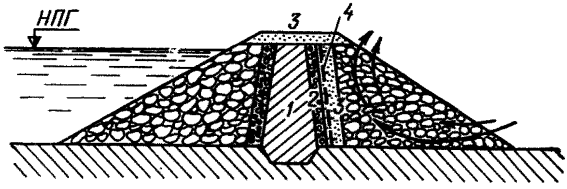


Рис. 4. Принципиальная схема теплозащитного слоя в талой каменно-набросной плотине с ядром

1 — талое ядро; *2* — дренаж; *3* — теплозащитный слой; *4* — граница максимального промерзания теплозащитного слоя (стрелками показано направление естественной зимней конвекции в низовой призме)

д) плотины с гибкими противофильтрационными устройствами из полимерных материалов, защищенных от резких колебаний температур теплоизолирующей пригрузкой гребня непучинистыми грунтами (рис. 5 и прилож. 7).

Примечание. Приведенные на рис. 5 конструктивные схемы плотин с гибкой волнистой диафрагмой, внутренним экраном и понуром разработаны с учетом опыта применения пленочных экранов на временных низконапорных плотинах высотой до 8 м в районах Крайнего Севера и с учетом результатов специальных исследований, выполненных на моделях в Красноярском Промстройниипроекте в 1965—1967 гг.

5.33. Применение гибких противофильтрационных элементов из полимерных пленок рекомендуется в плотинах на основаниях типа «а», «б», «в», «г» (п. 4.6), при обязательном оттаивании грунтов или удалении поверхностного слоя льдонасыщенного грунта в основании диафрагмы и понура. Допускается естественное оттаивание этого слоя в основании верхового и низового клина в процессе эксплуатации плотины; при этом для восприятия осадок оттаивающего основания и защиты диафрагмы от деформаций верховой и низовой призм рекомендуется отсыпка песчаных зон около гибких вертикальных противофильтрационных элементов.

5.34. Из полимерных материалов для устройства постоянных противофильтрационных устройств на Севере наиболее подходящей является полиэтиленовая рулонная пленка толщиной 0,2—0,4 мм, стабилизированная добавкой 2% сажи. Морозостойкость такой пленки до минус 70° С (203К), предельная растяжимость при разрыве 600—800%, прочность на разрыв около 120 кгс/см^2 (12МПа). Эта пленка

не изменяет своих свойств в течение многих лет в водной и грунтовой среде и незначительно изменяет их, находясь в течение нескольких суток на открытом воздухе и под действием солнечной радиации.

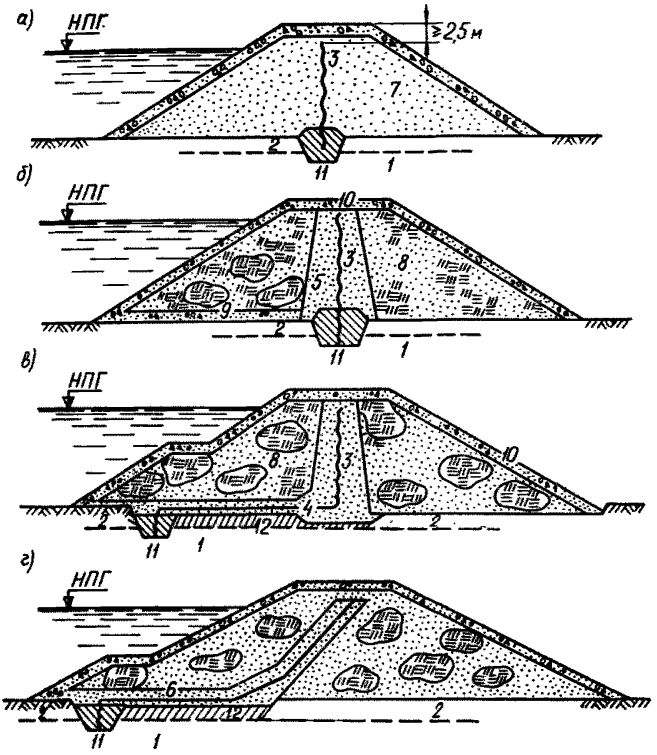


Рис. 5. Рекомендуемые конструктивные схемы нефильтрующих плотин талого типа с гибкими противофильтрационными элементами из полимерных пленок

а — однородная плотина с центральной диафрагмой; *б* — плотина с центральной диафрагмой, располагаемой в защитном песчаном ядре; *в* — плотина с центральной диафрагмой и внутренним понуром: *г* — плотина с внутренним наклонным экраном и понуром; *1* — вечномерзлый водоупор, непросадочный при оттаивании; *2* — льдонасыщенный просадочный при оттаивании слой основания; *3* — гибкая волнистая диафрагма из полимерной пленки; *4* — гибкий понур; *5* — защитное ядро из песка или песчано-гравийной смеси с окатанными зернами; *6* — защитный слой из песчаного или песчано-гравелистого грунта; *7* — тело плотины из песчаного (песчано-гравелистого) грунта; *8* — верховая и низовая упорные призмы; *9* — дренирующий слой из крупнозернистых грунтов; *10* — защитный слой из разнозернистого несвязного грунта; *11* — зуб из суглинка; *12* — зона предпостроечного оттаивания слоя высокольдистого грунта

Наилучшим способом соединения полиэтиленовых полотнищ является сварка. Прочность сварного шва составляет 50—100% прочности пленки. При отсутствии сварочного оборудования или при невозможности качественного выполнения сварки из-за неблагоприятных условий допускается соединение полотнищ путем 3—5-кратного перегиба краев пленки и проклейки их липкой полимерной лентой.

Края полотнищ можно соединять также морозостойкой мастикой.

Временные противофильтрационные устройства, предназначенные для работы в течение 1 года — 3 лет, могут изготавливаться из полимерных материалов других видов. Выбор их может производиться по технико-экономическим соображениям и местным условиям.

5.35. Применение плотин с гибкими полимерными противофильтрационными элементами наиболее целесообразно при отсутствии качественных глинистых грунтов вблизи створа, а также при наличии таких грунтов, когда их переход из льдонасыщенного в переувлажненное талое состояние существенно осложняет технологию их заготовки, отсыпки и уплотнения, особенно в условиях дождливого лета.

5.36. Для защиты от повреждений пленочного противофильтрационного устройства рекомендуется укладывать подстилающий слой толщиной не менее 0,3 м и защитный слой — не менее 0,5 м из песка или из песчано-гравийной смеси. В подстилающий слой допускается укладывать грунт из окатанных частиц не крупнее 6 мм, а в защитный — не крупнее 40 мм. Надежной работе пленочной диафрагмы способствует свободная, без натяжения, укладка пленки на горизонтальные и пологие подстилающие слои и волнистость вертикальных и крутых наклонных противофильтрационных устройств (рис. 5, *а, б, в*). На низовом контакте с пленкой недопустимо наличие смерзшихся комьев и скоплений крупных частиц.

5.37. Противофильтрационные устройства не должны попадать в зону знакопеременных температур. Сезонное промерзание-оттаивание допускается только в пределах теплозащитного слоя на гребне и низовом откосе, предохраняющего противофильтрационные устройства и другие элементы тела плотины от возникновения опасных криогенных процессов — пучения, морозобойных трещин и солифлюкционно-оползневых явлений.

5.38. В упорные призмы допускается укладка практически любых грунтов, однако количество неперегнивших растительных остатков должно быть не более 10%, а мерзлых комьев — не более 30% общего объема грунта. Мерзлые комья могут укладываться в количестве до 15% даже в грунтовые противофильтрационные устройства плотин. Необходимо лишь следить за тем, чтобы мерзлые включения не сосредоточивались в одном месте, а были распределены по объему равномерно.

5.39. Сопряжение с основанием противофильтрационных устройств из глинистых грунтов может быть выполнено с помощью глинистого зуба, составляющего нижнюю часть ядра, экрана или верховой водоупорной призмы, а также с помощью инъекционной завесы; для сопряжения с основанием жесткой диафрагмы, гибкой центральной диафрагмы и внутреннего понура из полимерной пленки следует устраивать зуб из плотно уложенных суглинка или глины (см. рис. 3, 4, 5). Глубина заделки глинистого зуба (замка завесы) в плотную скалу или непросадочный водоупорный слой должна быть не менее 1 м.

5.40. Для уменьшения деформаций талой плотины рекомендуется:

предварительное оттаивание и уплотнение термопросадочного льдонасыщенного слоя основания в период строительства плотины;

комбинированное оттаивание, включающее период интенсивного предпостроечного оттаивания и естественное завершение процесса оттаивания после заполнения водохранилища и первые годы эксплуатации плотины тепловым воздействием воды и фильтрацией.

5.41. При проектировании плотин на мощной толще рыхлых грунтов или трещиноватой скалы, водопроницаемость которых резко возрастает при оттаивании, рекомендуется устройство противофильтрационной завесы, осуществляемой после искусственного предварительного оттаивания основания зуба до расчетной глубины протаивания основания. Допускается постепенная (послойная) инъекция основания по мере его естественного оттаивания в первые несколько лет эксплуатации водохранилища. Для этого необходимы постоянные наблюдения за температурами пород основания и их оттаиванием.

5.42. Зуб и инъекционная завеса должны перерезать все породы основания, включающие просадочные грунты, скальные и полускальные породы с трещинами, заполненными фильтрующим материалом или льдом, а также нескальные грунты, включающие прожилки льда и неперегнившие органические остатки.

5.43. Толщина ядра, возводимого из щебенистого суглинка со значительным содержанием пылеватых частиц, должна приниматься не менее $0{,}25H$ (H — максимальный расчетный напор воды на плотину); для более однородного суглинка, включающего до 30% крупных частиц $d \geqslant 2$ мм, минимальная толщина ядра может быть принята равной $0{,}1H$.

5.44. Использование в качестве водоупора мерзлой трещиноватой скалы без специальной подготовки основания допускается в том случае, если трещины ее заполнены глинистым грунтом или объем трещин настолько мал, что при вытаивании трещинного льда водопроницаемость породы возрастает незначительно и нет опасности размыва грунтового противофильтрационного элемента по контакту с трещиной. Если это требование не выполняется, необходимо предусмотреть цементацию или другое инъекционное противофильтрационное уплотнение оттаивающей зоны основания.

5.45. Если система трещин скального основания непосредственно соединяется с верхним бьефом, то для уменьшения фильтрации после заполнения водохранилища можно применить отсыпку в воду суглинка, включая и мерзлый, для образования понура при частичной кольматации поверхностной трещиноватой зоны. Выходы трещин на поверхность в пределах низовой призмы рекомендуется защитить слоем обратного фильтра для предотвращения выноса кольматирующего грунта фильтрационным потоком в оттаивающем основании.

5.46. Гребень экрана (ядра) плотины должен быть защищен от образования морозобойных трещин слоем песчано-гравийного или щебенистого грунта. Минимальная толщина этого слоя должна равняться глубине его сезонного промерзания. При проектировании плотин с напором выше 10 м необходимая толщина и конструкция защитного слоя должны быть уточнены на опытных площадках.

5.47. Длина, глубина врезки и конструкции берегового сопрягающего противофильтрационного устройства определяются прогнозом оттаивания берегового склона (теплотехническим расчетом), прогнозом развития обходной фильтрации, а также прогнозом развития термокарста и береговой термоабразии на льдистых участках бортов долины вблизи примыкания плотины и других напорных сооружений гидроузла.

При соответствующем технико-экономическом обосновании допускается предпостроечное оттаивание и уплотнение или замена неустойчивых при оттаивании льдонасыщенных грунтов на участках береговых примыканий.

5.48. При проектировании талой плотины на основаниях, характеризующихся значительной величиной осадки при оттаивании, рекомендуется предварительное оттаивание с уплотнением или замена грунта в верхнем, наиболее льдонасыщенном слое. При естественном оттаивании высокольди-

стого основания конструкция профиля плотины должна быть приспособлена к восприятию медленно развивающихся деформаций оттаивающего основания. Этому требованию отвечают призмы из разнозернистых сыпучих грунтов с пологими откосами.

5.49. При проектировании талой плотины на мерзлых основаниях, не испытывающих значительной осадки при оттаивании, следует ориентироваться на естественное оттаивание вечномерзлых грунтов, обычно завершающееся в начальный период эксплуатации плотины (не более 10—12 лет).

5.50 Предварительное оттаивание просадочного основания ограниченной мощности может быть выполнено путем временного заполнения водохранилища при недостроенной плотине, но полностью завершенных водосбросных сооружениях. После затухания осадки оттаивающего основания водохранилище опорожняется, производится заделка деформированных участков тела плотины и завершается отсыпка ее полного профиля.

5.51. Следует предусматривать своевременную заделку двух основных систем трещин, которые могут возникать в теле талой плотины в начальный период эксплуатации вследствие осадки оттаивающих грунтов основания типа «в», «г» (п. 4.6). Особое внимание следует обращать на продольные трещины в теле верхового откоса вдоль уреза воды и поперечные к оси сооружения трещины в примыканиях талого тела плотины к мерзлым грунтам в бортах долины.

5.52. Превышение гребня плотины над НПГ должно назначаться с учетом осадки оттаивающего основания, если не предусматривается предварительное оттаивание или замена льдонасыщенного слоя основания уплотненным глинистым грунтом.

5.53. Недостаточная изученность фильтрационных свойств грунтов в большинстве районов Севера и изменение этих свойств, связанное с процессами оттаивания и промерзания, позволяет рекомендовать применение общепринятых способов проверки фильтрационной устойчивости и подбора обратных фильтров только для плотины высотой не более 6—8 м. Для более ответственных сооружений необходимо специальное фильтрационное моделирование на образцах грунта с первичной криогенной текстурой, изменяющейся в процессе оттаиваиня.

5.54. Термопросадочные мерзлые грунты, слабо фильтрующие после оттаивания, могут быть оставлены в основа-

нии талой плотины. Для повышения несущей способности и ускорения консолидации оттаивающего грунта можно применять вертикальные песчаные сваи-дрены, вода из которых должна отводиться в утепленный дренаж, расположенный в теле низовой призмы.

5.55. Для предотвращения образования наледей не допускается свободное высачивание воды на низовой откос, на береговые склоны в зоне примыкания к бортам долины и в тело неутепленной низовой упорной призмы из каменной наброски.

5.56. Организованный отвод дренажных вод в нижний бьеф должен быть защищен от замерзания; при отсутствии воды в нижнем бьефе или полном его промерзании в течение зимы рекомендуется устройство утепленного каптажного колодца, из которого дренажные воды должны поступать в водозабор или автоматически перекачиваться в верхний бьеф.

5.57. Внутренний дренаж земляной плотины следует располагать в постоянно талой части ее профиля на таком расстоянии от низового откоса, при котором промерзающая часть низовой упорной призмы сохраняет устойчивость при передаче на нее полного гидростатического давления со стороны верхнего бьефа в случае аварийного замерзания дренажа. В наибольшей степени этому требованию удовлетворяет размещение дренажа на контакте низовой грани противофильтрационного элемента с основанием.

5.58. В плотинах высотой от 15 до 25 м нижняя треть низового откоса на случай аварийного перемерзания внутреннего дренажа при значительном содержании мелочи ($d<2$ мм) в низовой призме (20% по массе и более) должна оборудоваться наслонным дренажом для защиты низового откоса от размыва дренажными водами, прорвавшимися в обход внутреннего дренажа. Толщина крупнозернистой части фильтра ($d\geqslant 2$ мм) должна превосходить глубину его сезонного промерзания (порядка 3—3,5 м). Если устройство столь мощного фильтра неэкономично или невозможно из-за отсутствия местных материалов, толщина слоев фильтра подбирается без учета его сезонного промерзания; при этом следует считать обязательным устройство теплозащитного слоя из любых местных грунтов, не подверженных морозному пучению, для предотвращения замерзания дренажа.

5.59. В целях замедления промерзания и уменьшения сезонных колебаний температуры вследствие конвекции внутри низовой призмы из крупной гальки или наброски рекомендуется отсыпать по низовому откосу слой карьерной

мелочи или песчано-гравелистого грунта и оставлять в теле призмы прослойки мелочи. Этим предотвращаются конвекция воздуха в пустотах наброски, обмен его с атмосферой и образование внутренних наледей.

5.60. Толщина теплозащитного слоя, предотвращающего промерзание внутреннего дренажа плотины с низовой призмой из каменной наброски и внешнего (аварийного) наслонного дренажа земляной плотины, должна назначаться такой, чтобы вода, высачивающаяся в дренаж, не могла замерзнуть при зимнем охлаждении откоса плотины и низовой призмы. В теплозащитном слое должна постоянно сохраняться талая зона толщиной не менее 0,5 м, прилегающая к дренажу и препятствующая контакту фильтрующейся воды и промерзающей зоны теплозащитного слоя.

5.61. Подбор материалов для защиты плотины и береговых примыканий от волнового воздействия, а также подбор фильтров для предотвращения выноса частиц и агрегатов связного грунта в наброску следует осуществлять по главе СНиП «Плотины из грунтовых материалов».

6. ТРЕБОВАНИЯ К ВОДОСБРОСНЫМ СООРУЖЕНИЯМ

6.1. Водосбросные и водозаборные сооружения в составе гидроузла, включающего в себя мерзлую плотину, как правило, следует располагать за пределами плотины (см. п. 4.16).

6.2. Особенно неблагоприятными для устройства обходных водосбросов по типу открытого саморегулирующегося водосбросного канала следует считать береговые террасы, сложенные высокольдистыми просадочными грунтами, включающими клиновидные или пластовые льды. В этом случае не рекомендуется устройство обходного водосбросного канала. Для небольших расходов может быть устроен сифонный водосброс, а для значительных паводковых расходов — лотковый водосброс, опирающийся с помощью свай на мерзлое тело плотины.

6.3. Водосбросы, пересекающие тело мерзлой плотины или опирающиеся на поверхность ее промороженной части, следует теплоизолировать таким образом, чтобы в периоды пропуска воды их местное отепляющее воздействие на плотину было минимальным; нулевая изотерма не должна выходить за пределы материала водосброса или теплоизоляции; местные утечки и фильтрация через тело водосброса не допускаются. Толщина теплозащитного слоя определяется теплотехническим расчетом. Ориентировочная тол-

щина слоя мелкозернистого грунта 2—2,5 м для постоянно действующего водосброса.

6.4. Если трасса водосбросного канала проходит в пучинистых грунтах, под днищем и стенками канала следует укладывать теплозащитный слой непучинистого грунта толщиной от 1,0 до 2,5 м.

6.5. Если трасса водосброса на значительные расходы воды может быть проложена только по сильнольдистому вечномерзлому основанию с крупными включениями чисто-

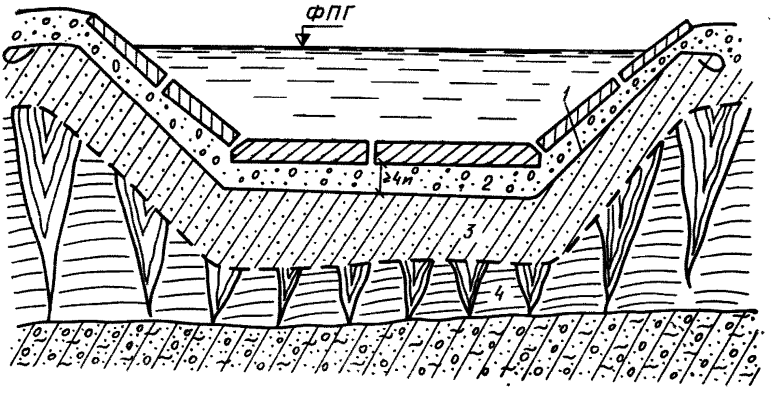


Рис. 6. Защита льдистого основания берегового водосброса от оттаивания

1 — пленочный экран; *2* — защитно-дренажный гравийно-галечниковый слой; *3* — теплозащитный слой непучинистого грунта; *4* — льдистый грунт основания

го льда, его стенки и дно должны быть тепло- и гидроизолированы. Одна из возможных конструкций водосбросного канала представлена на рис. 6. Экран из полиэтиленовой пленки *1* (пп. 5.34 и 5.36) является надежной гидроизоляцией льдистого основания. Толщина дренажно-защитного слоя *2* должна быть не менее 0,5 м. Для защиты льдистого основания от сезонного оттаивания предусматривается слой непучинистого грунта *3* с глинистым заполнителем. Толщина этого слоя, определяемая теплотехническим расчетом, не должна быть менее 1 м. Дренажный слой после окончания сброса воды необходимо осушать.

6.6. Пленочный экран или диафрагма плотины, пересекаемые водосбросом или водоспуском, должны быть тщательно приклеены к ним по всему контуру до форсированного подпорного горизонта (ФПГ). При конструировании сопряжения пленки и сооружения следует предусматривать возможность относительных смещений сооружения и грунта.

6.7. Наиболее перспективными затворами в условиях Крайнего Севера являются сегментные. Они имеют незатопляемые опоры и легко могут быть оборудованы обогревателями.

7. ПРОИЗВОДСТВО РАБОТ

Подготовительные работы

7.1. Максимально возможное сохранение природных условий является важнейшей задачей при подготовке и проведении строительных работ. В районах распространения погребенных льдов и сильнопросадочных при оттаивании льдонасыщенных грунтов следует избегать нарушения поверхностного мохорастительного слоя у примыканий к берегам сооружений напорного фронта и уреза будущего водохранилища.

7.2. Изыскания и строительные работы должны проводиться с минимальными повреждениями мохорастительного слоя, с движением механизмов преимущественно на затопляемых отметках или по непросадочным грунтам.

7.3. При подготовке ложа водохранилища к затоплению должен убираться мохорастительный слой и неперегнивший всплывающий торф. Убранный материал должен складироваться в валках выше уреза будущего водохранилища. При этом должно учитываться изменение отметок поверхности вследствие вытаивания погребенного льда и просадок льдистых грунтов после заполнения водохранилища. Валки следует защищать от размыва поверхностными водами.

7.4. На солифлюкционных берегах водохранилища валки из материала, снятого с поверхности ложа водохранилища, рекомендуется располагать на склоне поперек направления солифлюкционного течения грунта. Эти валки не должны препятствовать поверхностному водоотводу, т. е. не должны образовывать прудков застоя воды. После их естественного промерзания и смыкания с толщей вечномерзлых грунтов берегового склона давление при солифлюкционном сползании слоя грунта будет восприниматься мерзлыми валками.

Подготовка основания

7.5. Основание под талые плотины готовится с учетом всех требований, предъявляемых к основаниям в условиях умеренного климата, но отличается рядом особенностей.

Специфические работы, необходимые при подготовке основания для каждого типа плотин, приведены в разделе V. В настоящем разделе рассматриваются возможные способы их производства.

7.6. Цементация мерзлой скалы в основании противофильтрационного элемента (под зубом ядра или экрана) с трещинами, заполненными фильтрующим материалом и льдом, должна производиться после предварительного оттаивания.

7.7. Оттаивание мерзлого скального основания может производиться либо гидравлическим способом (нагнетание воды в скважину с подъемом воды сначала по затрубному пространству, а затем с растеканием ее по оттаявшим трещинам), либо с помощью паропрогрева, когда при конденсации пара в скважине выделяется значительное количество тепла.

Льдонасыщенные нескальные основания, содержащие значительное количество глинистых и пылеватых частиц (20% и более частиц $d<0{,}05$ мм), могут оттаиваться только способами, сохраняющими или уменьшающими их естественную влажность, — действием солнечной радиации под прозрачной полимерной пленкой, электропрогревом переменным током, электропрогревом постоянным током с использованием электроосмотического эффекта для частичного обезвоживания переувлажненных грунтов, выхлопными газами реактивного двигателя и паропрогревом с герметичными замкнутыми паропроводами.

7.8. Временное дренирование территории строительства и отвод сезонноталых вод при вскрытии дренажными канавами льдонасыщенных грунтов следует осуществлять только путем устройства тщательной двухслойной теплогидроизоляции этих канав из глинистых грунтов, мха, торфа или шлака, а также с применением полимерной пленки.

7.9. Подготовка основания под мерзлую плотину во многом определяется технологией ее возведения. Если плотина предназначена к промораживанию после окончания ее отсыпки из талых грунтов, то подготовка основания должна проводиться как под талую плотину.

Под низовым клином послойно намораживаемой плотины достаточно убрать только мохорастительный слой. Выемка под зуб такой плотины должна перерезать все сильнофильтрующие породы основания (гравийно-галечниковые грунты и скалу с трещинами значительного раскрытия) и крупные ледяные включения (жилы и линзы). Слои зуба и тела плотины на толщину слоя летнего протаивания долж-

ны быть наморожены до наступления положительных среднесуточных температур, чтобы предотвратить оттаивание льдистого основания.

Разработка карьеров и подготовка грунта к укладке

Связные грунты

7.10. Разработка связного грунта в зоне вечной мерзлоты производится срезанием верхнего оттаявшего слоя скреперами, бульдозерами или с помощью грейдеров с последующим сбором грунта в бурты. При этом скреперами могут разрабатываться грунты с влажностью не выше оптимальной (чтобы не было налипания на ковш), с последующей укладкой в тело плотины без промежуточного складирования.

7.11. Для ускорения оттаивания вечномерзлого связного грунта полезно верхний его слой обработать тракторным рыхлителем.

7.12. Электроосмос и сопровождающий его электропрогрев грунта также могут быть использованы для ускорения процесса оттаивания грунта в карьере. Для начала процесса мерзлый грунт с поверхности между разноименными электродами должен быть подсолен, поскольку мерзлый грунт является изолятором. Доза соли подбирается опытным путем. Для грунта, укладываемого в талую плотину, она должна обеспечивать максимальную скорость процесса оттаивания и подсушивания, а для укладываемого в мерзлую плотину доза должна быть минимальной, вызывающей лишь начало процесса, который в дальнейшем пойдет за счет естественного содержания солей в оттаивающем грунте. Температура наружного воздуха, при которой такой способ прогрева и подсушивания связного грунта в карьере является эффективным, также определяется опытом (см. разд. III).

7.13. К другим способам, пригодным для оттаивания связного грунта в карьере, можно отнести пароотаивание при герметичной системе паровых скважин, оттаивание с помощью тепла выхлопных газов реактивных двигателей, электрооттаивание переменным током, оттаивание с помощью солнечной радиации под пленочными покрытиями, потоком горячего воздуха из калорифера с топливной фор-

сункой, т. е. такие, которые не увеличивают влажность грунта.

7.14. Засоление грунта также способствует ускорению процесса оттаивания мерзлых связных грунтов и понижению температуры его перехода в мерзлое состояние. Однако применять засоление связного грунта можно только для плотины талого типа.

7.15. Все способы ускорения оттаивания мерзлых связных грунтов позволяют не только повысить интенсивность работы, но и продлить сезон работ. Выбор способа оттаивания грунта определяется технико-экономическим расчетом и местными условиями, а эффективность и параметры воздействия — пробным оттаиванием.

7.16. Переувлажненный связный грунт перед укладкой в плотину должен подсушиваться либо в буртах на месте заготовки талых грунтов для зимней укладки, либо на бровке карты на плотине, если соседние с картой зоны не пропускают воду на поверхность ранее уложенного в плотину связного грунта.

7.17. Для увеличения сезона разработки и для уменьшения влияния атмосферных факторов на температурно-влажностное состояние разрабатываемого грунта могут применяться надувные, каркасные шатры или пленочные покрытия.

7.18. Для ускорения процесса подсушивания грунта в буртах может быть использовано явление электроосмоса. Размещение электродов, напряжение, сила тока и способы отвода воды должны быть подобраны опытом.

7.19. Во избежание переувлажнения поверхностными водами бурты связного грунта располагаются по уклону местности. Для удаления избыточной влаги из складируемого грунта на основание полезно уложить тонкий (от 0,3 до 0,5 м) слой фильтрующего грунта.

7.20. Бурты связного грунта, во избежание промерзания их значительного объема, должны быть высотой не менее 10 м. При отсыпке буртов следует избегать технологических приемов, способствующих уплотнению связного грунта. Для уменьшения глубины промерзания с наступлением отрицательных температур бурт полезно покрыть необходимым по расчету слоем пенольда. Весной до наступления положительных температур он должен быть убран с поверхности бурта. Для этой же цели может быть применена и быстро твердеющая пена (БТП), которая может убираться с бурта непосредственно перед его разработкой.

Примечание. Пенолед — теплоизоляционный материал, получаемый из воздуха, воды и 2—3% пенообразователя на пожарных или специальных установках. Пенолед наносится послойно на защищаемую поверхность при t° воздуха минус 10 — минус 15° С (258—263К). Хождение по нему не допускается.

7.21. Для сокращения поверхности охлаждения связный грунт может быть на зиму уложен в отработанный сухой забой скального карьера. Для улучшения условий дренирования переувлажненного связного грунта на дно забоя также полезно уложить тонкий слой дренирующего грунта с обязательным отводом вод из него.

7.22. При заготовке связного грунта в буртах для зимней укладки в противофильтрационный элемент плотины необходимо рассчитать и проверить на опытной карте минимальную температуру грунта при укладке в бурт, чтобы грунт имел запас тепла, необходимый для сохранения талого состояния на время разработки бурта, транспортировки, распределения по карте отсыпки и уплотнения.

7.23. В карьере для того, чтобы техника не тонула в оттаивающем разжиженном грунте, заранее должен быть заготовлен крупнозернистый грунт (рваный камень или галька), способный создать жесткий скелет на путях движения и на стоянках машин и механизмов. Поэтому экскаваторы и транспорт в карьере целесообразно сразу ставить на подошву разрабатываемого слоя грунта.

7.24. Переувлажненный, разжиженный после оттаивания связный грунт может быть доведен до состояния удобоукладываемости добавкой к нему сухого рыхлого грунта либо прямо в карьере, либо в бурте промежуточного складирования. Необходимо только, чтобы смесь после этого была достаточно водоупорной.

Фильтрующие грунты

7.25. Сухие гравийно-галечниковые и дресвяно-щебенистые грунты, сохранящие сыпучее состояние при отрицательных температурах, разрабатываются и укладываются в плотину круглый год.

7.26. Такие же грунты из водонасыщенных подрусловых таликов всегда готовы к разработке, но требуют некоторого подсушивания перед укладкой в плотину. Температура наружного воздуха, при которой не происходит смерзание вынутого из-под воды грунта, зависит от свойств грунта и местных условий и устанавливается опытом. При наружной

температуре ниже этого предела выемка фильтрующего грунта из-под воды прекращается.

7.27. Разработка льдистого грунта, фильтрующего в талом состоянии, требует предварительного оттаивания любым из следующих наиболее эффективных способов: гидрооттаиванием, парооттаиванием, оттаиванием с помощью солнечной радиации под прозрачной полимерной пленкой в сочетании с дождеванием. После выемки такой грунт требует подсушивания. Для обеспечения непрерывности работ фильтрующие грунты заготавливаются на зиму в буртах на незаливаемых площадках.

Скальные и полускальные грунты

7.28. Разработка скальных и полускальных грунтов должна производиться с учетом всех требований к ней в зоне умеренного климата. Вечная мерзлота влияет на выбор режимов бурения и способа удаления разрушенных частиц породы из забоя скважины. Сильно разрушенная скала может распадаться при оттаивании.

7.29. Если разработка идет более успешно в сухом забое и при сохранении массива, окружающего скважину, в мерзлом состоянии, скорость вращения коронки должна быть небольшой, а очистка забоя должна производиться продувкой.

7.30. Если более производительной оказывается разработка с бурением оттаявшей скалы, скорость вращения коронки не ограничивается, а промывающий раствор подается на забой при положительной температуре, с запасом тепла на незамерзаемость. При необходимости раствор подогревается с помощью электробойлера (электронагревателя, охватывающего часть трубы, по которой промывочный раствор подается в скважину).

7.31. Во всех случаях выбор способа и машин для разработки скалы определяется технико-экономическим расчетом и местными условиями. Эффективность принятого способа и технология разработки проверяются опытом. Размеры площадок и размещение путей должны соответствовать требованиям главы СНиП «Земляные сооружения».

Укладка грунта в плотину

7.32. При строительстве на Крайнем Севере талых плотин и плотин, возводимых по талому типу, но предназначенных к промораживанию после их завершения, необходимо

выполнять все требования, предъявляемые к плотинам в условиях умеренного климата. Однако суровые климатические условия и наличие вечной мерзлоты в основании накладывают ряд дополнительных требований.

7.33. Во избежание оплывания мерзлых нескальных стенок котлована под зуб плотины его лучше заполнять грунтом, пока стенки не начали таять. Для этого вскрытие котлована в мерзлом грунте следует производить при наступлении отрицательных среднесуточных температур осенью или после спада морозов, не допускающих укладку талого грунта, в конце зимы. Котлован зуба плотины в пределах мерзлого нескального и распученного льдом скального основания должен быть заполнен грунтом до наступления положительных температур.

7.34. Отрицательная температура воздуха, допускающая укладку заготовленного грунта в противофильтрационный элемент плотины, определяется опытом. Например, консервация поверхности ядра талой плотины на период сильных морозов при дальности возки до 3 км и при засолении 20 кг NaCl на 1 м³ грунта должна производиться при температуре ниже минус 20° С (253К).

7.35. Время пребывания рыхлого грунта на карте отсыпки при отрицательных температурах воздуха также должно устанавливаться опытом. В условиях предыдущего примера время пребывания грунта до окончания уплотнения при t° минус 20° С (253К) не должно превышать 15—20 мин.

7.36. Для удлинения сезона укладки связного грунта можно применять следующие методы:

засоление грунта, понижающее температуру замерзания и допускаемое только для талых плотин;

утепление кузовов крышками, откидывающимися в момент загрузки;

обогревание кузовов выхлопными газами;

устройство шатров над буртом грунта и над картой отсыпки грунта в плотину;

укладка грунта в прудок с подогреваемой водой.

7.37. Категорически запрещается в противофильтрационных устройствах талых и мерзлых плотин оставлять между слоями грунта прослойки льда, снега и комьев мерзлого грунта. Снег может быть удален сдуванием с помощью компрессорного шланга. Лед, если его нельзя удалить механическим путем, может быть выплавлен с помощью топливной форсунки или потоком выхлопных газов реактивного двигателя.

7.38. Во избежание появления сквозной прослойки недоуплотненного грунта края слоя, идущие поперек плотины, должны раскатываться уплотняющими механизмами до уклона не круче 1 : 10.

7.39. Укладка талого грунта на талые участки основания производится в соответствии с обычными требованиями к возведению плотин в умеренной зоне.

7.40. При укладке талого грунта в зимний пероид для предупреждения опасного льдообразования вследствие миграции влаги при промерзании переувлажненного грунта влажность его должна быть не более 0,9 $W_р$, где $W_р$ — влажность грунта на границе раскатывания.

7.41. При возведении из талого грунта противофильтрационных устройств и переходных зон плотин талого и мерзлого типов допускается укладка мерзлых комьев разрозненно и в количестве не более 15%. Влажность грунта в комьях не должна превышать $W_р$.

7.42. При невозможности осушить котлован любой грунт (включая и связный) может укладываться в воду как в майну со льда, так и пионерным способом. Обязательным является отсутствие под водой ледяных линз и прослоек. Оттаивание их может быть достигнуто пропусканием воды котлована через нагреватели. Минимальное превышение высоты отсыпного слоя над поверхностью воды в котловане — 0,5 м, оптимальное — 0,8—1 м. Толщина отсыпаемого в воду слоя моренного грунта допускается в 5—7 м при достаточной плотности, определяемой контрольным бурением после укладки.

7.43. В зимний период для значительного уменьшения теплопотерь поверхность прудка целесообразно покрывать теплоизоляцией. Хорошо зарекомендовали себя плиты из пенополистирола. Плотнее всего могут укрыть поверхность прудка свободно плавающие плоские плиты правильной шестиугольной формы.

7.44. Уплотнение крупнозернистого и крупнообломочного грунта с поливом водой допускается только в период положительных температур на непросадочном основании и с выходом воды только в сторону, противоположную противофильтрационному устройству (в верховом клине — в сторону верхнего бьефа, в низовом — нижнего). Переходные зоны для получения максимальной плотности связного грунта в противофильтрационном элементе следует отсыпать с опережением.

7.45. В связи с невозможностью обеспечения малых гидростроек достаточным количеством специалистов необходимой квалификации для каждого вновь осваиваемого района следует разрабатывать перспективные планы гидротехнического строительства, которые будут выполнять специализированные тресты, укомплектованные необходимым штатом специалистов и парком машин и механизмов. По завершении цикла специальных работ на одном гидроузле специалисты и оборудование перемещаются на следующий, для которого уже подготовлены все проектные материалы и проведены предшествующие этому циклу специальные работы.

7.46. Специализированные тресты гидротехнического строительства должны быть укомплектованы машинами, приспособленными для работы в условиях Крайнего Севера (автосамосвалами с утепленными кузовами, мобильными установками для оттаивания и промораживания грунтов, передвижными электростанциями для электрооттаивания и электроосмотического обезвоживания грунтов, комплектами для устройства шатров и экранов из полимерных пленок, лебедочными скребками для очистки откосов от снега и т. д.). Все машины должны быть приспособлены к перевозке воздушным транспортом.

7.47. Специализированный трест, укомплектованный парком мобильных машин, может выполнять также ремонтные и аварийные работы на всех гидроузлах района.

8. ГЕОТЕХНИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ

8.1. Лаборатория строительства должна создаваться одновременно с началом разработки карьеров и подготовки основания. Все виды геотехнического контроля, необходимого при строительстве плотин в зоне умеренного климата, выполняются и на строительстве плотин в Северной зоне.

8.2. Лабораторией строительства выполняются следующие работы, вытекающие из специфики возведения грунтовых плотин в условиях Крайнего Севера:

определение теплоемкости, коэффициентов теплопроводности и температуропроводности всех грунтов плотины при плотности и влажности, достигнутых при укладке, в талом, мерзлом и переходном состоянии в различных диапазонах температур;

определение прочностных и деформативных характеристик всех грунтов плотины (угла внутреннего трения φ, сцепления C, модуля деформации E и коэффициента Пуассона μ) в талом, пластично-мерзлом и твердомерзлом состоянии при плотностях и влажностях, полученных при укладке в плотину;

определение объемной льдистости мерзлого грунта в плотине.

8.3. Нормы отбора проб грунта при возведении плотины талого типа и оттаивающих элементов мерзлых плотин ориентировочно могут быть приняты следующими:

для определения плотности и влажности грунта в противофильтрационном элементе (ядре или экране) и в переходной зоне одна проба на 200—400 м^3 уложенного грунта;

для определения плотности, прочностных, деформативных характеристик и зернового состава каменного (наброски, валунов, гальки) и другого материала, уложенного в упорные призмы, — одна проба на 10 000 м^3;

для определения зернового состава, фильтрационных, прочностных и деформативных характеристик грунтов, уложенных в ядро и переходные зоны, — одна проба на 5—10 тыс. м^3.

Время взятия проб грунта, температура и влажность воздуха, скорость ветра, интенсивность атмосферных осадков, состояние образцов и положение точек отбора проб по высоте плотины и в плане должны фиксироваться в журналах геотехнических испытаний.

8.4. В грунтах мерзлых зон плотины необходимо определять льдистость, содержание незамерзшей воды, убедиться в отсутствии прослоек чистого льда.

8.5. При укладке мелкозернистых песчаных и глинистых грунтов зимой периодически необходимо измерять температуру в середине слоя в момент окончания уплотнения. Эти измерения должны выполняться при изменении качества грунта в карьере, высоты забоя, технологии укладки, размеров карты и резком изменении температуры воздуха или скорости ветра. Цель этих измерений — убедиться в том, что все операции по укладке и уплотнению выполнены с талым грунтом.

8.6. После вскрытия карьеров и котлованов основных сооружений существенные отклонения от результатов изысканий должны фиксироваться. Если эти отклонения могут повлиять на конструкции плотины и других сооружений, рабочие чертежи их должны быть скорректированы.

8.7. При наличии в карьерах слоев и пачек грунта, резко отличающихся по свойствам от требуемых по проекту, следует наладить тщательный контроль за перемешиванием грунта в карьере до получения однородной, отвечающей требованиям проекта смеси и за расслоением грунта при отсыпке в тело плотины.

8.8. По завершении строительства плотины следует проводить контрольные определения плотности, влажности, прочности, деформируемости, коэффициентов фильтрации и зернового состава всех грунтов, слагающих плотину и приконтактную зону основания. Для этого целесообразно производить контрольное бурение не менее чем в трех поперечных створах и отбирать пробы не реже чем через каждый метр скважины.

Подобный цикл контрольных исследований должен проводиться для вновь отсыпанных объемов при строительстве плотины в несколько очередей.

8.9. Распределение характеристик грунта по всему телу плотины, определенных лабораторией в процессе строительства и при контрольном бурении тела построенной плотины, должно быть приложено вместе с исполнительными чертежами к акту о приемке плотины в эксплуатацию и храниться у начальника службы эксплуатации.

9. СОСТАВ И ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТОВ

9.1. При проектировании талых плотин, возводимых на Крайнем Севере, должны выполняться все расчеты, предусмотренные для плотин в условиях умеренного климата, т. е. расчеты устойчивости, фильтрации в теле плотины, в основании и в обход сооружений напорного фронта, осадки тела и основания плотины в период строительства и эксплуатации; комплекс гидрологических и водохозяйственных расчетов.

9.2. Расчеты температурного режима талой плотины должны включать: расчет гидрооттаивания основания при фильтрации из водохранилища; расчет глубины и скорости сезонного и многолетнего промерзания низового откоса и гребня плотины с учетом фильтрации в теле и в оттаивающем основании плотины; расчеты толщины теплозащитных слоев; расчеты температурного режима противофильтрационных и дренажных устройств с учетом и без учета эффекта теплозащитных слоев; прогноз изменения мерзлотных условий в результате теплового влияния водохранилища на вечномерзлые грунты его дна и берегов.

Примечание. Точные аналитические и численные методы расчета на ЭВМ температурного режима фильтрующих земляных плотин весьма сложны; приближенные практические методы расчета находятся в начальной стадии разработки. Комплекс расчетов, перечисленных в п. 9.2, предполагается подробно рассмотреть при дальнейшей работе по совершенствованию настоящих Рекомендаций. Результаты расчета температурного режима талой и мерзлой однородной плотины см. в приложении 4.

9.3. На основании расчетов, перечисленных в п. 9,2, должен составляться многолетний прогноз температурного режима плотины и определяться срок его стабилизации. Вблизи сооружений гидроузла и других капитальных сооружений необходимо устанавливать динамику и предельное (стационарное) положение уреза воды в сильнольдистых берегах (приложение 6).

9.4. Расчеты устойчивости откосов талых плотин, мерзлых, возводимых из талых грунтов с последущим промораживанием, и верховых откосов мерзлых плотин, возводимых послойным намораживанием, следует выполнять по общей методике с учетом осадок при оттаивании льдистых оснований. Крутизна низового откоса послойно намораживаемой плотины должна назначаться из условия устойчивости сезонно оттаивающего теплозащитного слоя.

9.5. Теплотехнические расчеты мерзлых плотин рекомендуется выполнять в соответствии с приложениями 2 и 3, назначая расчетные характеристики грунтов, воды, льда и воздуха по приложению 1.

9.6. При оценке результатов расчетов температурного режима и при анализе устойчивости мерзлой плотины следует учитывать ежегодное понижение уровня водохранилища в ходе его зимней сработки, приводящее к промерзанию поверхности грунта подо льдом на мелководных участках вблизи уреза воды. На этих участках глубина и скорость оттаивания будут меньше соответствующих величин, вычисленных при постоянном нормальном подпорном горизонте воды в водохранилище.

9.7. Расчет термического режима мерзлой плотины должен выполняться с тщательным учетом последствий вытаивания крупных ледяных включений в береговых примыканиях, не защищенных теплоизолирующим слоем от отепляющего влияния верхнего бьефа.

9.8. В предварительных приближенных расчетах предельного оттаивания дна и бортов водохранилища допускается принимать, что нулевая изотерма стационарного температурного поля (граница чаши оттаивания) при стабиль-

ном очертании контура дна и берегов не выходит за пределы вертикальной поверхности, определяемой в плане линией уреза воды.

9.9. Для плотин с мерзлотной завесой необходимо выполнить расчеты устойчивости в начальный период создания мерзлого ядра, воспринимающего напор до завершения промерзания низовой призмы (см. приложение 5).

9.10 Проверка устойчивости верхового и низового откосов мерзлой плотины должна выполняться с учетом зависимости механических характеристик грунтов от температуры; форма расчетных кривых скольжения должна учитывать наибольшую вероятность оползания верхового откоса в пределах талой зоны тела и основания плотины; необходима проверка на сдвиг оттаявшего массива по мерзлому с учетом резкого уменьшения сопротивляемости сдвигу оттаявшего льдонасыщенного грунта основания и береговых склонов. Расчет устойчивости низового откоса необходимо выполнять для периода максимального сезонного оттаивания при наивысших расчетных температурах мерзлого грунта, слагающего откос.

9.11. Для расчетов устойчивости, деформаций и термического режима плотин при проектировании необходимо иметь данные о прочностных, деформативных и теплофизических характеристиках мерзлых, промерзающих и оттаивающих грунтов. Для плотин III и IV классов, а также для предварительных расчетов плотин I и II классов эти данные могут быть приняты по приложению 1.

9.12. При оценке осадки вследствие оттаивания льдонасыщенного основания, содержащего льды с различным залеганием и распределением в объеме оттаивающей толщи, следует учитывать, что определяющими факторами при вытаивании подземных льдов являются:

уменьшение объема (до 10%) при фазовом переходе льда в воду;

сток части объема воды, превышающего величину полной влагоемкости оттаивающих пород.

9.13. Приближенный расчет осадки льдонасыщенного грунтового массива при оттаивании дна водохранилища до глубины внедрения полигонально-жильных льдов может выполняться по формуле

$$\Delta h_{\text{сум}} = \frac{\Delta V_{\text{к}}}{S} + \frac{\Delta V_{\text{сегр}}}{S_{\text{п}}} K, \qquad (1)$$

где $\Delta V_к$ — объемная осадка одного полигона за счет вытаивания полигонально-жильных льдов на глубину h, м^3;

S — средняя площадь одного полигона, ограниченного осями ледяных жил, м^2;

$\Delta V_{сегр}$ — объемная осадка грунта, заключенного между жилами одного полигона, за счет вытаивания сегрегационного льда, образующего текстуру этого грунта, м^3;

$S_п$ — средняя площадь полигона за вычетом площади ледяных жил, его образующих, м^2;

K — коэффициент, учитывающий неполное смыкание полостей после вытаивания ледяных включений ($0{,}2<K<0{,}9$) и зависящий от литологии, размера и количества ледяных прослоек.

Примечание. Если размеры водохранилища в плане превышают 300 м, то под его поверхностью на глубинах более 1,5 м все погребенные льды вытаивают и осадка будет максимальной и равной $\Delta h_{сум}$.

9.14. Осредненная величина относительной осадки оттаивающего высокольдистого грунта приближенно (без учета консолидации) может быть определена по формуле

$$\Delta h_{отн} = \frac{Л_с + W_н - W_п}{100}, \qquad (2)$$

где $Л_с = Л_в + Л_ц$ — суммарная льдистость;

$W_н$ — влажность за счет незамерзшей воды;

$W_п$ — полная влагоемкость оттаявшего грунта;

$Л_в$ — льдистость за счет ледяных включений;

$Л_ц$ — льдистость за счет льда-цемента.

Все величины, входящие в формулу (2), определяются в процентах к общему объему рассматриваемого мерзлого массива.

9.15. После завершения строительства плотин все расчеты должны быть повторены по исполнительным чертежам с учетом механических и теплофизических характеристик грунтов, полученных при геотехническом контроле в процессе строительства. На основании этих расчетов должно быть проверено соответствие принятых в проекте характеристик материалов натурным, соответствие измеренных в процессе строительства деформаций и температур в плотине рассчитанным для этого периода при проектировании и должен быть уточнен прогноз дальнейшего поведения плотины в эксплуатации.

10. НАТУРНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ

10.1 Комплекс натурных наблюдений за гидроузлами, предусмотренный для грунтовых плотин в зоне умеренного климата, должен полностью выполняться и на плотинах Крайнего Севера (наблюдения за уровнями воды в бьефах, толщиной льда, расходами, содержанием минеральных и органических веществ в воде, фильтрацией, осадками, поперечными и продольными смещениями, состоянием откосов плотин и т. д.).

10.2. Конструкция пьезометра должна позволять измерение напора в нескольких точках по высоте плотины. Для измерения напоров в частично промерзающих зонах плотины следует применять пьезометры, заполняемые антифризом в оболочках из морозостойкой резины.

10.3. Фундаменты марок для наблюдения за осадками и смещениями плотины из грунта с заметным содержанием мелких частиц следует целиком закладывать ниже зоны сезонного промерзания — оттаивания и сами марки защищать от смерзания с сезонноотаивающим грунтом.

10.4. Особенности Крайнего Севера вызывают необходимость проведения специальных наблюдений:

измерение температуры тела плотины и основания до глубины, равной двум напорам на плотину;

измерение температуры грунтов дна и берегов водохранилища до расчетной глубины его теплового влияния на вечномерзлые породы;

измерение температуры воды по глубине водохранилища (температурные скважины не доводятся до нижней кромки льда и оборудуются гибким шлангом с герметичной заглушкой и поплавком; для наблюдений в зимнее время над скважиной поддерживается прорубь).

10.5. Створы температурных скважин в количестве не менее трех, пересекающих плотину, и не менее двух в примыканиях должны охватывать всю плотину и прилегающие зоны основания не менее чем на 25 м выше и ниже оси плотины и в сторону от береговых примыканий. Граница зоны наблюдений должна превышать расчетные очертания зоны теплового влияния водохранилища и сооружений.

10.6. Температурными наблюдениями по проекту должны охватываться также основания и примыкания всех остальных сооружений напорного фронта гидроузла (водозаборы, водосбросы, водоспуски).

10.7. Визуальному осмотру регулярно должны подвер-

гаться верховой, низовой откосы, гребень плотины и все сооружения напорного фронта, а также основание вблизи подошвы низового откоса плотины.

10.8. Места высачивания небольшого количества воды в нижнем бьефе должны быть оборудованы утепленными коробами и низковольтной осветительной арматурой для круглогодичных наблюдений.

10.9. Выходы сосредоточенной фильтрации также необходимо утеплять. Должна определяться температура, мутность профильтровавшейся воды, ее расход и химический состав. Результаты этих определений должны давать возможность установить, фильтрует ли эта вода из водохранилища или является межмерзлотной, стекающей по водоносным пластам с берегов. Отвод ее за пределы гидроузла во избежание наледей должен осуществляться либо в верхний бьеф, либо в приемный колодец водозабора. Если эта вода непригодна для использования, она сбрасывается по утепленному каналу за пределы гидроузла.

10.10. Во время первого наполнения водохранилища, а также в периоды паводков и резкого изменения температурного и фильтрационного режимов плотины и основания весь цикл названных выше натурных наблюдений следует проводить ежедневно. Не реже двух раз в неделю следует составлять графики изменения измеряемых величин в точках, где они изменяются наиболее интенсивно.

Во время стабильной работы гидроузла все эти наблюдения могут проводиться еженедельно.

10.11. На гребне противофильтрационного элемента плотины и на всех элементах других сооружений гидроузла, выполненных из связного грунта, должны устанавливаться пучиномеры до глубины, не менее чем в 1,5 раза превышающей глубину сезонного промерзания-оттаивания. Наблюдения по ним проводятся не реже одного раза в месяц. Для контроля за сезонным промерзанием-оттаиванием рекомендуется установка электромерзлотомеров, указывающих на мерзлое или талое состояние грунта по его сопротивлению между электродами.

10.12. Для того чтобы убедиться в отсутствии трещин на гребне ядра (экрана) в зонах продольного растяжения (береговых примыканий, над выступами и изломами в основании) в первые годы эксплуатации до полного затухания осадок плотины, перед каждым заполнением водохранилища в защитном песчано-гравийном слое следует пройти контрольные траншеи до поверхности гребня ядра или экрана.

Убедиться в отсутствии щелей между стенками бетонных или деревянных сооружений напорного фронта и грунтом плотины и в береговых примыканиях можно отрывкой шурфов в защитном слое на контакте. При появлении поперечных трещин на поверхности защитного слоя с помощью шурфов необходимо установить, не доходят ли эти трещины до уровня предстоящего заполнения водохранилища.

10.13. Все результаты осмотров и измерений заносятся в журнал. Перед каждым наступлением паводка и перед заполнением водохранилища на зиму необходимо производить анализ результатов натурных наблюдений, в котором по изменениям пьезометрических напоров, температур, деформаций, фильтрационных расходов и замеченных дефектов делается вывод о готовности плотины к поднятию напора.

10.14. Результаты натурных наблюдений направляются в проектную организацию и в научно-исследовательскую организацию, осуществляющую надзор.

10.15. Методика и техника натурных измерений и исследований должны предусматриваться проектом размещения контрольно-измерительной аппаратуры (КИА) и инструкцией по производству натурных наблюдений за плотиной и другими сооружениями гидроузла.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

ПРОЧНОСТНЫЕ, ДЕФОРМАТИВНЫЕ И ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕРЗЛЫХ, ПРОМЕРЗАЮЩИХ И ОТТАИВАЮЩИХ ГРУНТОВ

Полевые и лабораторные методы определения прочностных, деформативных и теплофизических свойств грунтов сложны, требуют больших затрат времени, специального нестандартного оборудования и поэтому не всегда доступны проектным организациям.

Установлено, что физико-механические характеристики талых и мерзлых грунтов зависят: от влажности, объемного веса и от ряда других физических свойств, экспериментальное определение которых не вызывает больших затруднений. Поэтому параллельно с методами непосредственного определения показателей физических свойств грунтов (полевыми и лабораторными исследованиями) могут быть использованы косвенные методы их определения.

В соответствии с главой СНиП «Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах» прочностные свойства мерзлых грунтов определяются в зависимости от объемного веса и суммарной влажности грунта, что, по существу, является также косвенным методом определения.

Косвенные способы не подменяют, а дополняют полевые и лабораторные методы исследований и могут быть рекомендованы для определения исходных данных при расчете сооружений на предварительном этапе проектирования — стадии технического проекта — или при проектировании временных сооружений.

Исходные характеристики физических свойств мерзлых, промерзающих и оттаивающих грунтов, определяемые экспериментальным путем, позволяют определить другие характеристики грунтов расчетным путем. Для этого необходимо знать вид грунта, его зерновой состав и характеристику ледовых включений (криогенная текстура), а также:

W_c — суммарная влажность, доли единицы;

$W_в$ — влажность за счет ледяных включений, доли единицы;

γ — объемная масса грунта, г/см^3;

$\gamma_{уд}$ — плотность грунта, г/см^3;

t_0 — естественная температура вечномерзлой толщи на глубине 10 м (нулевых амплитуд), °С.

Производные характеристики физических свойств грунтов, определяемые расчетным путем:

$\varepsilon_н$ — начальный коэффициент пористости, доли единицы;

$\gamma_{ск}$ — объемная масса скелета, г/см^3;

G — коэффициент водонасыщения, доли единицы;

$Л_в$ — льдистость за счет ледяных включений, доли единицы;

q — степень заторфованности (отношение массы торфа к массе сухого грунта), доли единицы;

$W_н$ — среднее содержание незамерзшей воды в температурном диапазоне значительных фазовых превращений грунтовой влаги, доли единицы

$$\varepsilon_н = \frac{\gamma_{уд}(1+W_c)}{\gamma} - 1; \qquad (3)$$

$$\gamma_{ск} = \frac{\gamma}{1+W_c}; \qquad (4)$$

$$G=\frac{W_c\,\gamma\gamma_{уд}}{[\gamma_{уд}(1+W_c)-\gamma]\,\gamma_в}; \tag{5}$$

$$Л_в=\frac{\gamma_{уд}\,W_в}{\gamma_л+\gamma_{уд}(W_c-0{,}1W_н)}; \tag{6}$$

где $\gamma_в$ — плотность воды, г/см³;

$\gamma_л$ — плотность льда, г/см³.

Диапазон отрицательных температур, в котором происходят значительные фазовые превращения грунтовой влаги, характеризуется изменением на 1% и выше количества незамерзшей воды при изменении температуры на 1° С.

Среднее содержание незамерзшей воды $W_н$ в этом диапазоне для оттаивающих незасоленных грунтов при повышении температуры мерзлого грунта принимается по табл. 1.

Таблица 1

Вид грунта	Пески	Супеси	Илы	Суглинки	Глины	Торфы
$W_н$	0	0,07	0,08	0,10	0,15	1,0

Для определения количества незамерзшей воды в промерзающих грунтах найденную по таблице величину $W_н$ следует умножить на коэффициент 1,2.

Степень заторфованности грунтов q вычисляется по формуле

$$q=\frac{A}{\gamma_{уд.\,з.г}}-B, \tag{7}$$

где $\gamma_{уд.\,з.\,г.}$ — плотность заторфованного грунта;

A (см³/г) и B (безразмерный) — параметры, зависящие от вида заторфованного грунта, значение которых приведено в табл. 2.

Таблица 2

Вид заторфованного грунта	A	B
Песчанный	3,46	1,30
Глинистый	3,26	1,19

Ниже даны некоторые значения плотности грунта, воды и льда, которые в большинстве случаев допускается принимать:

Наименование	Плотность, г/см³	Наименование	Плотность, г/см³
Песок	2,66	Торф	1,52
Супесь	2,70	Вода	1
Суглинок	2,71	Лед	0,92
Глина	2,74		

Экспериментальными исследованиями установлено, что коэффициент температуропроводности a и коэффициент теплопроводности λ могут быть определены для песков, супесей, суглинков, глин, торфов, а также заторфованных грунтов в зависимости от коэффициента водонасыщения G по графикам рис. 7 и 8.

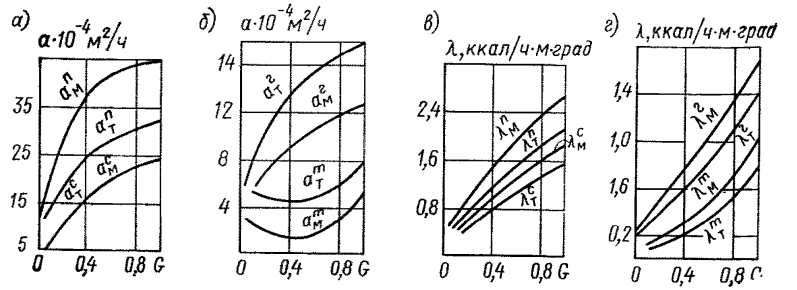


Рис. 7. Графики для определения коэффициентов температуро-($а$) и теплопроводности (λ) грунтов, индексы при которых означают

п — пески; с — супеси; г — суглинки и глины; т — торфы; индексы внизу; т — талые; м — мерзлые; G — коэффициент водонасыщения; $а$, $в$ — для песков и суглинков; $б$, $г$ — для глин и торфов

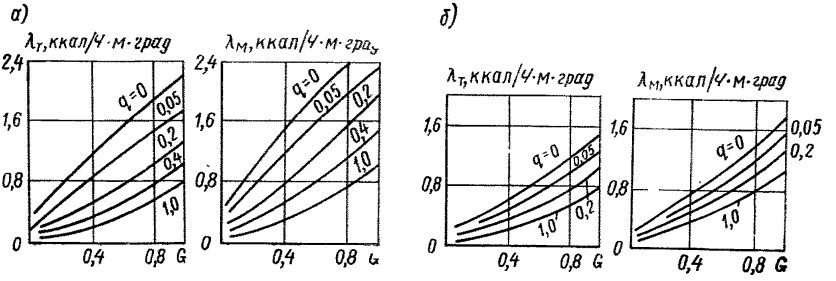


Рис. 8. Графики для определения коэффициента теплопроводности талых $\lambda_т$ и мерзлых $\lambda_м$ заторфованных грунтов ($а$ — песчаных; $б$ — глинистых); q — степень заторфованности; G — коэффициент водонасыщения

Теплофизические характеристики грунтов связаны между собой зависимостью

$$a = \frac{\lambda}{C_о}; \qquad (8)$$

где $C_о$ — объемная теплоемкость;

$C_{уд}$ — удельная теплоемкость.

Коэффициенты теплопроводности талого и полностью мерзлого грунта могут быть определены по табл. 3.

Значения $C_м$ в табл. 4 даны для температуры минус 10° С. В интервале температур от минус 0,5 до минус 10° С определяется в зависимости от количества незамерзшей воды при заданной температуре по формуле

$$C'_м = \frac{1}{W_с}[C_м (W_с - W_н) + C_т W_н]. \qquad (9)$$

В табл. 4 дано сравнение значений коэффициентов теплопроводности мерзлого песка $\lambda_м$, определенных по табл. 3 и по графикам на рис. 7 и 8.

При некоторых теплофизических расчетах нужно знать удельную теплоемкость воды и льда, которые приведены в табл. 5.

Таблица 3

Объемная масса γ, т/м³	Суммарная влажность W_c, доли единицы	Коэффициент теплопроводности грунта												Объемная тепло емкость грунта			
		пески				супеси				суглинки и глины				$C_т$		$C_м$	
		$\lambda_т$		$\lambda_м$		$\lambda_т$		$\lambda_м$		$\lambda_т$		$\lambda_м$		к Дж/м²·К	ккал/м³ × ×град	к Дж/м³·К	ккал/м³× ×град
		Вт/м·К	ккал/ч· ·м·град	Вт/м·К	ккал/ч· м·град	Вт/м·К	ккал/ч· м·град	Вт/м·К	ккал/ч· м·град	Вт/м·К	ккал/ч· м·град	Вт/м·К	ккал/ч· м·град				
1,2	0,05	0,46	0,4	0,60	0,52	—	—	—	—	—	—	—	—	1197	285	1092	260
1,2	0,1	0,72	0,62	0,92	0,79	0,44	0,38	0,52	0,45	—	—	—	—	1344	320	1134	270
1,4	0,05	0,66	0,57	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1386	330	1260	300
1,4	0,1	1,01	0,87	1,25	1,08	0,60	0,52	0,80	0,69	0,51	0,44	0,79	0,68	1554	370	1323	315
1,4	0,15	1,16	1,0	1,45	1,25	0,82	0,71	1,02	0,88	0,65	0,56	0,97	0,84	1722	410	1386	330
1,4	0,20	—	—	—	—	0,97	0,84	1,22	1,05	0,75	0,65	1,09	0,94	1890	450	1449	345
1,4	0,25	—	—	—	—	1,07	0,92	1,35	1,16	0,84	0,72	1,16	1,00	2058	490	1512	260
1,6	0,05	0,87	0,75	1,06	0,91	—	—	—	—	—	—	—	—	1696	380	1428	340
1,6	0,1	1,22	1,05	1,57	1,35	—	—	—	—	—	—	—	—	1806	430	1512	360
1,6	0,15	1,45	1,25	1,86	1,6	1,08	0,93	1,28	1,1	0,84	0,72	1,14	0,98	1974	470	1554	370
1,6	0,2	1,58	1,36	2,01	1,73	1,22	1,05	1,50	1,29	1,02	0,88	1,30	1,12	2183	520	1659	395
1,6	0,25	1,64	1,41	2,11	1,35	1,16	1,67	1,44	1,11	0,96	1,44	1,44	1,24	2373	565	1722	410
1,6	0,3	—	—	2,24	1,93	1,39	1,2	1,80	1,55	1,16	1,00	1,51	1,3	2562	610	1806	430
1,6	0,35	—	—	—	—	1,51	1,3	1,91	1,65	1,22	1,05	1,57	1,35	2730	650	1889	445
1,6	0,4	—	—	—	—	—	—	2,00	1,72	1,28	1,1	1,64	1,41	2940	700	1953	465
1,6	0,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	1,74	1,5	—	—	2100	500
1,8	0,1	1,51	1,3	1,86	1,6	—	—	—	—	—	—	—	—	2016	480	1680	400
1,8	0,15	1,78	1,55	2,20	1,9	1,38	1,19	1,52	1,31	1,16	1,0	1,43	1,23	2226	530	1764	420
1,8	0,2	1,91	1,65	2,44	2,1	1,55	1,34	1,76	1,52	1,30	1,12	1,60	1,38	2436	580	1848	440
1,8	0,25	2,03	1,75	2,59	2,23	1,66	1,43	1,97	1,7	1,44	1,24	1,77	1,53	2688	640	1932	460
1,8	0,3	—	—	2,69	2,32	1,72	1,48	2,11	1,82	1,49	1,28	1,87	1,61	2898	690	2016	480
1,8	0,35	—	—	—	—	1,75	1,51	2,24	1,93	1,54	1,33	1,93	1,66	3108	740	2100	500
1,8	0,4	—	—	—	—	—	—	2,32	2,0	1,62	1,4	1,99	1,72	3339	795	2184	520
1,8	0,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	2,09	1,8	—	—	2352	560
2,0	0,15	2,04	1,76	2,55	2,2	1,62	1,4	1,74	1,5	—	—	—	—	2478	590	1974	470
2,0	0,2	2,32	2,0	2,91	2,42	1,81	1,56	2,03	1,75	1,44	1,24	1,74	1,5	2730	650	2058	490
2,0	0,25	2,62	2,26	3,16	2,72	2,01	1,73	2,24	1,93	1,57	1,35	1,91	1,65	2961	705	2142	510
2,0	0,2	—	—	—	—	2,10	1,8	2,44	2,1	1,67	1,44	2,03	1,75	3234	770	2226	530
2,0	0,35	—	—	—	—	—	—	—	—	1,78	1,53	2,16	1,86	3444	820	2331	555

Таблица 4

Объемная масса грунта γ, кг/м³	Суммарная влажность W_c, %	Коэффициент водонасыщения G	$\lambda_м$ по табл. 3		$\lambda_м$ по графику	
			Вт/м·К	ккал/ч·м·град	Вт/м·К	ккал/ч·м·град
16000	0,10	0,32	1,57	1,35	1,51	1,30
18000	0,15	0,44	1,86	1,60	1,88	1,62
18000	0,10	0,43	1,86	1,60	1,86	1,60
18000	0,15	0,58	2,20	1,90	2,2	1,90
18000	0,20	0,71	2,44	2,10	2,55	2,20

Таблица 5

Температура		Теплоемкость воды $C_{уд}$		Температура		Теплоемкость льда $C_{уд}$	
К	плюс °С	к Дж/кг·К	ккал/кг××град	К	минус °С	к Дж/кг·К	ккал/кг××град
273	0	4,2	1,010	273	0	2,125	0,506
274	1	4,238	1,009	272	1	2,117	0,504
275	2	4,234	1,008	271	2	2,108	0,502
276	3	4,234	1,008	269	3	2,100	0,500
277	4	4,229	1,007	268	4	2,092	0,498
278	5	4,225	1,006	267	5	2,083	0,496
279	6	4,221	1,005	266	6	2,079	0,495
280	7	4,217	1,004	265	7	2,071	0,493
281	8	4,217	1,004	264	8	2,062	0,491
282	9	4,217	1,004	263	9	2,054	0,489
283	10	4,213	1,003	262	10	2,045	0,487
284	11	4,213	1,003	261	11	2,037	0,485
285	12	4,208	1,002	260	12	2,029	0,483
286	13	4,208	1,002	259	13	2,020	0,481
287	14	4,208	1,002	258	14	2,016	0,480
288	15	4,204	1,001	257	15	2,008	0,478
289	16	4,204	1,001	256	16	2,008	0,476
290	17	4,204	1,001	255	17	1,991	0,474
291	18	4,200	1,000	254	18	1,982	0,472
292	19	4,200	1,000	253	19	1,974	0,470
293	20	4,200	1,000	252	20	1,966	0,468
294	21	4,200	1,000	251	21	1,961	0,467
295	22	4,200	1,000	250	22	1,957	0,466
296	23	4,196	0,999	249	23	1,945	0,463
297	24	4,196	0,999	248	24	1,936	0,461
298	25	4,196	0,999	247	25	1,927	0,459
299	26	4,196	0,999	246	26	1,919	0,457
300	27	4,196	0,999	245	27	1,911	0,455
301	28	4,196	0,999	244	28	1,907	0,454
302	29	4,196	0,999	243	29	1,898	0,452

Сопротивление мерзлых грунтов сжатию, растяжению и сдвигу.

В зонах концентрации напряжений на контактах минеральных частиц мерзлого грунта происходит сильное увеличение напряжений, вызывающее таяние льда и перемещение воды в менее напряженные области. Следовательно, под влиянием напряжений изменяется количе-

Таблица 6

Температура грунтов		Нормативные сопротивления мерзлых грунтов нормальному давлению $R_н$											
		крупнообломочные и песчаные, крупные и средней крупности		песчаные мелкие и пылеватые		супеси, включая пылеватые		суглинки и глины, включая пылеватые		торф массивной криогенной текстуры		все виды грунтов с ледяными прослойками и включениями льда при $0,2 \leqslant Л_в \leqslant 0,4$	
К	°С	МПа	кгс/см²	МПа	кгс/см²	МПа	кгс/см²	МПа	кгс/см²	МПа	кгс/см²	МПа	кгс/см²
272,7	—0,5	0,9	9	0,7	7	0,5	5	0,4	4	—	—	0,3	3
272,2	—1,0	1,2	12	0,9	9	0,7	7	0,6	6	—	—	0,4	4
271,7	—1,5	1,4	14	1,1	11	0,9	9	0,7	7	—	—	0,5	5
271,2	—2,0	1,6	16	1,3	13	1,0	10	0,8	8	—	—	0,6	6
270,7	—2,5	1,8	18	1,4	14	1,1	11	0,9	9	—	—	0,7	7
270,2	—3,0	1,9	19	1,6	16	1,3	13	1,0	10	0,8	8	0,8	8
269,7	—3,5	2,1	21	1,7	17	1,4	14	1,1	11	0,9	9	0,8	8
269,2	—4,0 и ниже	2,3	23	1,8	18	1,5	15	1,2	12	1,0	10	0,9	9

Примечания: 1. Значения $R^н$ даны для грунтов, у которых $Л_в < 0,2$.

2. При грунтах, указанных в колонке 7, следует предусматривать устройство песчаных подушек толщиной $h \geqslant 0,2$ м.

3. Нормативные сопротивления грунтов с $Л_в > 0,4$ назначаются по данным специальных исследований.

4. Для кратковременных нагрузок, действующих в течение времени τ, значение $R^н$ могут применяться с коэффициентами 1,5 при τ=0,5 ч; 1,4 при $\tau = 1$ ч; 1,3 при $\tau = 2$ ч; 1,2 при $\tau = 8$ ч 1,1 при $\tau = 2,4$ ч; указанное повышение $R^н$ производится при условии продолжительности перерывов в действии нагрузки не менее времени ее приложения.

5. Допускается корректировать значения $R^н$ по данным опыта строительства или результатам испытания грунта.

6. Нормативные сопротивления $R^н$, приведенные в табл. 6, не распространяются на мерзлые грунты с засоленностью более 25% и должны определяться по данным специальных испытаний.

ство незамерзшей воды в мерзлых грунтах и поэтому изменяется прочность соединения частиц грунта и льда.

Механические свойства промерзающих, мерзлых и протаивающих грунтов зависят от температуры, напряженного состояния в данной зоне грунта и времени действия нагрузки.

В таблицах 6, 7. 8, 9 и 11 приводятся данные:

1) нормативное сопротивление мерзлых грунтов нормальному давлению при различных температурах;

2) сопротивление мерзлых грунтов сдвигу;

3) мгновенное и предельно-длительное сцепление мерзлых грунтов;

4) сопротивление мерзлых грунтов сдвигу по деревянным и бетонным поверхностям;

Таблица 7

Температура грунтов		Нормативные сопротивления сдвигу грунта по грунту $R^{н}_{сд}$			
		песчаные всех разновидностей		глинистые, включая пылеватые	
К	минус °С	МПа	кгс/см²	МПа	кгс/см²
272,7	0,5	0,12	1,2	0,08	0,8
272,3	1	0,17	1,7	0,12	1,2
271,7	1,5	0,21	2,1	0,15	1,5
271,2	2	0,24	2,4	0,17	1,7
270,7	2,5	0,27	2,7	0,19	1,9
270,2	3	0,30	3,0	0,21	2,1
269,7	3,5	0,32	3,2	0,23	2,3
	4 и ниже	0,34	3,4	0,25	2,5

5) значение модуля нормальной упругости и коэффициента Пуассона.

Значение модуля нормальной упругости E для различных грунтов при различных напряжениях (рис. 9 и 10) см. в табл. 11.

Значения коэффициента Пуассона μ для мерзлых грунтов приведены в табл. 10.

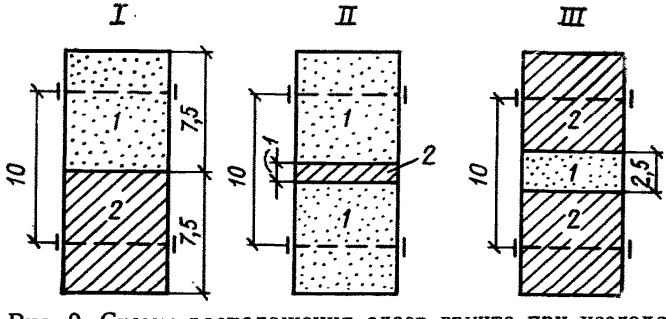


Рис. 9. Схемы расположения слоев грунта при исследовании упругих деформаций образцов мерзлых грунтов

I, II, III — слоистые модели грунтовой толщи; *1* — песок; *2* — глина

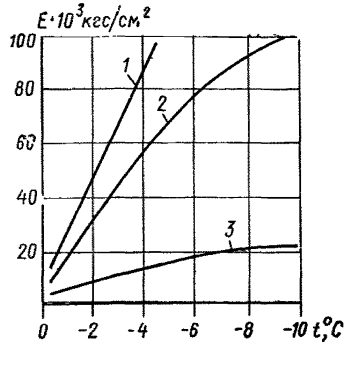


Рис. 10. Зависимость модуля нормальной упругости мерзлых грунтов E от величины отрицательной температуры $t°$ при одном и том же внешнем давлении $\sigma=2$ кгс/см²

1 — мерзлый песок; *2* — мерзлый пылеватый грунт; *3* — мерзлая глина

Таблица 8

Грунты	W_c, %	Мгновенное и предельно-длительное сцепление вечномерзлых грунтов ненарушенной структуры											
		$C_{мгн}$		$C_{дл}$		$C_{мгн}$		$C_{дл}$		$C_{мгн}$		$C_{дл}$	
		МПа	кгс/см²	МПа	кгс/см²	МПа	кгс/см²	МПа	кгс/см²	МПа	кгс/см²	МПа	кгс/см²
		От 272,9 до 272,8				От 272,2 до 272				От 269,2 до 269			
		От —0,3 до —0,4°С				От —1,0 до —1, 2°С				От —4,0 до 4,2°С			
Глина ленточная (минеральные прослойки)	30—40	0,57	5,7	0,18	1,8	—	—	0,26	2,6	1,6	16,0	0,42	4,2
Суглинок тяжелый пылеватый	36	0,43	4,3	0,06	0,6	0,7	7,0	0,1	1,0	1,2	12,0	—	—
Суглинок легкий пылеватый	30	0,41	4,1	0,09	0,9	0,74	7,4	—	—	1,1	11,0	0,2	2,0
Супесь тяжелая пылеватая	28—34	0,4—0,45	4,0—4,5	0,09—1,0	0,9—1,0	0,73	7,3	0,16	1,6	0,8—1,5	8,0—15,0	0,28—0,32	2,8—3,2
То же, сильно влажная	43	0,6	6,0	0,075	0,75	—	—	—	—	1,1	11,0	0,2	2,0
То же, оторфованная	30	—	—	—	—	—	—	—	—	0,9	9,0	0,2	2,0
Песок пылеватый . .	23	1,1	11,0	0,21	2,1	1,4	14,0	0,27	2,7	2,0	20,0	0,37—0,45	3,7—4,5

Таблица 9

Температура грунтов		Нормативное сопротивление мерзлых грунтов сдвигу по бетонным и деревянным поверхностям фундаментов			
		песчаные всех разновидностей		глинистые, включая пылеватые	
К	минус °С	МПа	кгс/см²	МПа	кгс/см²
272,7	0,5	0,08	0,8	0,05	0,5
272,2	1	0,13	1,3	0,1	1,0
271,7	1,5	0,16	1,6	0,13	1,3
271,2	2	0,20	2,0	0,15	1,5
270,7	2,5	0,23	2,3	0,18	1,8
270,2	3	0,26	2,6	0,2	2,0
269,7	3,5	0,29	2,9	0,23	2,3
269,2	4 и ниже	0,33	3,3	0,25	2,5

Примечания: 1. Значения $R^{н}_{сд}$ при смерзании грунтов с металлическими поверхностями, если эти поверхности специально не обработаны, принимаются с коэффициентом 0,7.

2. Допускается корректировать $R^{н}_{сд}$ по данным опыта строительства или результатам испытания грунта.

3. Нормативные сопротивления $R^{н}_{сд}$, приведенные в табл. 9, не распространяются на мерзлые грунты с засоленностью более 0,25% и должны определяться по данным специальных испытаний.

Значения коэффициента Пуассона μ для мерзлых грунтов приведены в табл. 10.

Таблица 10

Грунт	W_c, %	Температура		Давление		Коэффициент Пуассона μ
		К	минус °С	МПа	кгс/см²	
Мерзлый песок	19	273,0	0,2	0,2	2	0,4
	19	272,3	0,8	0,6	6	0,13
Мерзлый пылеватый суглинок	28	272,9	0,3	0,15	1,5	0,35
	28	272,4	0,8	0,2	2	0,18
	25,3	271,5	1,5	0,2	2	0,14
	28,7	269,2	4,0	0,6	6	0,13
Мерзлая глина	50,1	272,7	0,5	0,2	2	0,45
	53,4	271,5	1,7	0,4	4	0,35
	54,8	268,2	5,0	1,2	12	0,26

Значение модуля нормальной упругости E для различных грунтов при различных напряжениях (рис. 9 и 10) см. в табл. 11.

Таблица 11

№ схемы	Физическая модель грунтовой толщи	Напряжение											
		0,1 МПа (1 кгс/см²)				0,2 МПа (2 кгс/см²)				0,3 МПа (3 кгс/см²)			
		t		E		t		E		t		E	
		К	°С минус	МПа	кгс/см²	К	°С минус	МПа	кгс/см²	К	°С минус	МПа	кгс/см²
I	Слоистая	271,8	1,4	1430	14300	271,8	1,4	1270	12700	—	—	—	—
II	»	271,5	1,7	3350	33500	271,5	1,7	3010	30100	271,5	1,7	2930	29300
III	»	271,6	1,6	850	8500	271,6	1,6	820	8200	—	—	—	—
	Однородная:												
IV	песок	—	—	—	—	271,5	1,7	4080	40700	—	—	—	—
V	глина	—	—	—	—	271,5	1,7	890	8900	—	—	—	—

ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ ТЕЛА ПЛОТИНЫ, ОСНОВАНИЯ И ДНА ВОДОХРАНИЛИЩА

Важнейшим элементом проектирования гидротехнических сооружений водохозяйственных комплексов в условиях Крайнего Севера являются расчеты температурного режима плотин и водосбросных сооружений на вечномерзлых основаниях.

Расчеты температурного режима имеют очень важное значение для обоснования типа сооружения, расчетов устойчивости и прочности сооружения в целом и отдельных его элементов.

В настоящее время наиболее полно разработаны методы тепловых расчетов нефильтрующих земляных плотин мерзлого типа с промороженной центральной частью. Ведутся исследования температурного режима фильтрующих талых плотин на мерзлых основаниях, оттаивающих под воздействием фильтрации. В меньшей степени получили развитие методы расчета температурного режима каменно-набросных плотин.

На основе теоретических и экспериментальных исследований советских ученых разработаны и широко используются в практике проектирования инженерные методы прогноза температурного режима мерзлых и талых плотин и водосбросных сооружений. Для ряда важнейших расчетных схем получены точные аналитические решения, позволяющие прогнозировать предельное (стационарное) температурное состояние нефильтрующей земляной плотины, а также решать задачу о формировании нестационарного температурного режима фильтрующей плотины. Советскими учеными также предложены методы приближенных тепловых расчетов земляных плотин талого и мерзлого типов на основе конечно-разностной аппроксимации дифференциальных уравнений теплообмена в фильтрующем грунте (уравнение Фурье—Кирхгофа) и в нефильтрующем грунте (уравнение Фурье). Некоторые теоретические положения получили развитие в работах по численным методам решения задач нестационарного температурного режима земляных плотин и грунтовых оснований с использованием ЭВМ.

Предлагаемые в данном приложении практические способы приближенных теплотехнических расчетов земляных гидротехнических сооружений и их вечномерзлых оснований не исключают использование в необходимых случаях более точных и сложных решений, а также расчетов на ЭВМ и АВМ.

Независимо от высоты плотины и мерзлотно-геологических условий ее основания необходимо выполнить комплекс теплотехнических расчетов, включающих:

1) анализ динамики оттаивания дна водохранилища;

2) построение контура предельной чаши оттаивания вечномерзлых пород, слагающих дно водохранилища; анализ стационарного (предельного) температурного состояния вечномерзлых пород дна в зоне теплового влияния водохранилища и сооружений гидроузла;

3) анализ динамики оттаивания промороженного тела плотины мерзлого типа и вечномерзлых грунтов береговых склонов после заполнения водохранилища водой;

4) расчет стационарного (предельного) температурного режима мерзлой плотины, в частности определение положения нулевой изотермы — границы раздела талой (деформирующейся) и мерзлой (устойчивой) зон профиля плотины;

5) расчет динамики роста мерзлотной завесы в плотине с замораживающими колонками, включающий определение средней температуры мерзлотной завесы конечной толщины, скорости движения воздуха в колонках и производительности вентиляторов.

Ниже приводятся некоторые приближенные методы теплотехнических расчетов, рекомендуемых для использования в практике проектирования плотин высотой до 25—30 м.

Приводимые в приложении 2 эмпирические зависимости по теплотехническим расчетам тела и основания плотин из грунтовых материалов базируются на экспериментальных и теоретических решениях.

Все приводимые зависимости достаточно просты и хорошо подтверждаются натурными данными.

Пересчет эмпирических зависимостей, приведенных в приложении 2, путем замены значений физических величин, входящих в эти зависимости, на единицы СИ не представляется возможным, так как после такой замены результаты, получаемые по приводимым зависимостям, не имеют практического значения и формулы становятся неприемлемыми для использования. Значения величин, найденные в окончательном виде по эмпирическим зависимостям, можно перевести в систему СИ.

1. Динамика оттаивания вечной мерзлоты под дном водохранилища (одномерная задача)

При устройстве водохранилищ в районе вечномерзлых грунтов важно знать, на какую глубину и с какой скоростью произойдет оттаивание грунтов под дном водохранилища. Размеры оттаявшей зоны под водохранилищем дают возможность определить параметры фильтрационного потока, формирующегося в оттаивающих слоях основания. Для определения динамики передвижения границы оттаивания дна водохранилища (без учета фильтрации в период оттаивания) следует использовать формулу (10).

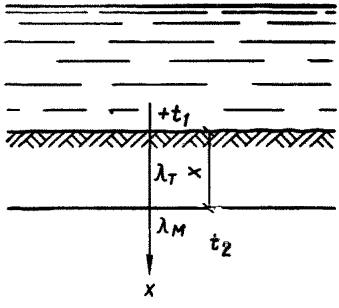


Рис. 11. Определение границы оттаивания мерзлого грунта под дном водохранилища

Предполагается, что рассматриваемый участок водохранилища находится на значительном расстоянии от тела плотины и берегов водохранилища. Поэтому допускается, что температура воздуха не оказывает прямого влияния на режим грунтов рассматриваемого участка, а оттаивание дна происходит в вертикальном направлении (одномерная задача).

После наполнения водохранилища за время τ (ч) грунт оттаивает на величину x, равную:

$$x = \sqrt{\frac{2\lambda_т t_1 \tau}{0{,}9\rho W_с + C_м t_2}}, \qquad (10)$$

где x — глубина от поверхности дна водохранилища до границы оттаивания мерзлого грунта (нулевой изотермы), м (рис. 11);

$\lambda_т$ — коэффициент теплопроводности талого грунта, ккал/(ч·м·град);

t_1 — температура воды в водохранилище на уровне поверхности грунта, °С;

t_2 — средняя начальная температура мерзлого грунта перед заполнением водохранилища, [°С];

ρ — скрытая теплота фазового перехода влаги грунта 80 000 ккал/т;

W_c — суммарная влажность или льдистость, доли единицы;

$C_м$ — объемная теплоемкость мерзлого грунта, ккал/(м³·град);

τ — время от заполнения водохранилища до рассматриваемого момента, ч.

Количество тепла, необходимое для таяния грунта, ккал/м³, можно определить по формуле

$$Q=0{,}9\rho W_c+C_м t_2. \tag{11}$$

Пример расчета по определению границы оттаивания дна водохранилища по формуле (10) дан в приложении 3.

Предельная глубина оттаивания дна в центре водохранилища шириной B, м, может быть также определена с достаточной для практических целей точностью по формуле

$$x=0{,}5B\operatorname{ctg}\frac{\pi}{2}\frac{\lambda_т t_0}{\lambda_т t_0-\lambda_м t_1}, \tag{12}$$

где x — искомая глубина оттаивания, м;

B — ширина водохранилища в зоне его предполагаемого теплового влияния на плотину, м;

t_0 — температура вечномерзлого грунта на глубине нулевых амплитуд (начальная температура грунта);

t_1 — температура воды, °С.

Соотношение между длиной водохранилища L и его шириной B несущественно влияет на величину x, найденную по формуле (12) (см. приложение 3, пример 1).

2. Стационарное температурное состояние грунтов дна водохранилища и основания плотины

Аналитический расчет пространственного стационарного температурного состояния дна водохранилища и основания промороженной плотины следует выполнять по формуле (13)

$$u=\frac{1}{\pi}\left\{\operatorname{arctg}\times\right.$$

$$\times\frac{x^2+(y-0{,}5B)^2+(x-y+0{,}5B)\left[z+\sqrt{x^2+(y-0{,}5B)^2+z^2}\right]}{\left[z+\sqrt{x^2+(y-0{,}5B)^2+z^2}\right]^2+(x-y+0{,}5B)\left[z+\sqrt{x^2+(y-0{,}5B)^2+z^2}\right]}+$$

$$+\operatorname{arctg}\times$$

$$\times\frac{x^2+(y+0{,}5B)^2+(x+y+0{,}5B)\left[z+\sqrt{x^2+(y+0{,}5B)^2+z^2}\right]}{\left[z+\sqrt{x^2+(y+0{,}5B)^2+z^2}\right]^2+(x+y+0{,}5B)\left[z+\sqrt{x^2+(y+0{,}5B)^2+z^2}\right]}-$$

$$\left.-\operatorname{arctg}\frac{x}{z}\right\}. \tag{13}$$

Обозначения, входящие в формулу (13), показаны на рис. 12.

В формуле (13) относительная (безразмерная) температура u связана с действительными значениями температуры t следующими зависимостями, учитывающими разные теплофизические характеристики грунта в талом и мерзлом состоянии:

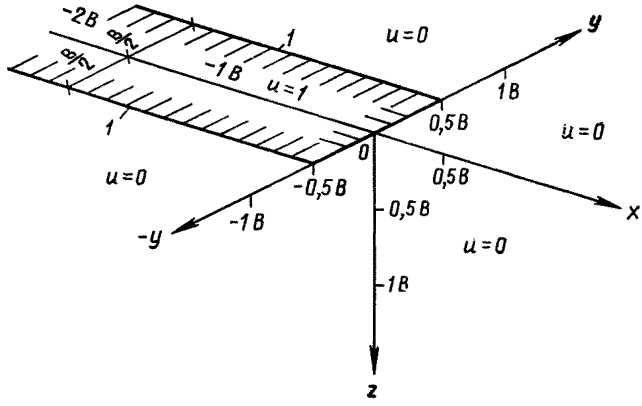


Рис. 12. Схема к расчету предельного оттаивания дна водохранилища и основания промороженной плотины

B — ширина плотины; u — относительная (безразмерная) температура; 1 — контур водохранилища

а) для отрицательных значений температур $t \leqslant 0$ (зона мерзлого грунта)

$$U = \frac{\lambda_м (t + t_2)}{\lambda_м t_2 + \lambda_т t_1}; \qquad (14)$$

б) для положительных значений температур $t \geqslant 0$ (зона талого грунта)

$$U = \frac{\lambda_м t_2 + \lambda_т t}{\lambda_м t_2 + \lambda_т t_1}, \qquad (15)$$

где $\lambda_м$, $\lambda_т$ — соответственно теплопроводность мерзлого и талого грунта, ккал/(ч·м·град);

t_1 — постоянная среднемноголетняя температура воды в придонных слоях водохранилища;

t_2 — абсолютное значение среднегодовой отрицательной температуры поверхности грунта, соприкасающейся с воздухом, °С.

Ширина водохранилища B принимается за единицу длины, благодаря чему достигается компактность температурного разреза и упрощаются вычисления. Относительная температура подводной поверхности грунта $u_в = 1$; температура «сухой» поверхности $u_н = 0$.

Относительная шкала температур u построена от условного нуля, равного температуре поверхности грунта, соприкасающегося с воздухом.

Граничные условия для расчетной схемы записываются в следующем виде:

$$U=1 \text{ при } x \leqslant 0 \text{ и } -\frac{B}{2} \leqslant y \leqslant \frac{B}{2};$$

$$U=0 \text{ при } -\infty < x < \infty \text{ и } -\frac{B}{2} \geqslant y \geqslant \frac{B}{2};$$

$$U=0 \text{ при } x \geqslant 0 \text{ и } -\infty < y < +\infty.$$

Формула (13) получена при следующих дополнительных условиях, которые необходимо учитывать в практических расчетах конкретных задач:

уровень воды принят постоянным, средним за год;

температуры смоченной и сухой поверхности также постоянны и равны их среднегодовым значениям;

ширина водохранилища B постоянна по его длине, намного превышающей ширину;

грунты тела плотины и ложа водохранилища однородны и одинаковы по своим теплофизическим свойствам;

ширина долины реки намного превышает поперечные размеры (ширину профиля) плотины; рельеф долины очень пологий и слабовыраженный; профиль плотины весьма распластанный; особенности рельефа, высота и очертание профиля плотины формулой (13) не учитываются;

вода в нижнем бьефе отсутствует;

влияние тепла недр земли формулой (13) не учитывается.

Отмеченные обстоятельства, не снижая ценности теоретического решения по формуле (13), несколько ограничивают возможности его практического применения. В частности, при осреднении теплофизических свойств многослойной грунтовой толщи и приведении ее к условно однородному грунту неизбежно вносится погрешность, снижающая точность вычислений по формуле (13) для реальных мерзлотно-грунтовых условий.

Очертания изотерм в реальном профиле плотины также будут отличаться от расчетных, построенных на полуплоскости при нулевой высоте плотины. Остальные допущения в меньшей степени влияют на точность расчета по формуле (13). Зависимость (13) в настоящее время является единственным точным аналитическим решением пространственной задачи о стационарном распределении температур в основании комплекса «плотина-водохранилище». На основе формулы (13) могут быть получены приближенные методы расчета, учитывающие геометрические параметры плотины и рельеф местности.

Расчет двухмерной задачи построения плоского стационарного температурного поля под водохранилищем на вечномерзлом основании может быть выполнен по формуле

$$t(x, y)=\frac{1}{\pi}\left(\frac{\lambda_т}{\lambda_м} t_в - t_г\right)\left(\operatorname{arctg}\frac{\frac{B}{2}-x}{y}+\operatorname{arctg}\frac{\frac{B}{2}+x}{y}\right)+t_г+G_y^г, \tag{16}$$

где $t(x, y)$ — искомая температура в любой точке таломерзлой грунтовой области дна водохранилища;

$t_в$ — заданная среднегодовая температура подводной поверхности грунта, °С;

$t_г$ — среднемноголетняя естественная температура мерзлоты, осредненная по глубине от подошвы деятельного слоя до горизонта нулевых амплитуд (обычно до глубины 15—20 м);

$G^г_y$ — геотермический градиент, град/м, принимаемый по справочным данным для района проектируемой плотины (в большинстве районов вечной мерзлоты G=0,02—0,03 град/м, а в расчетах оттаивания дна до глубины 10—15 м может не учитываться).

Расчетная схема и положение нулевой изотермы, ограничивающей чашу протаивания под водохранилищем, показаны на рис. 13.

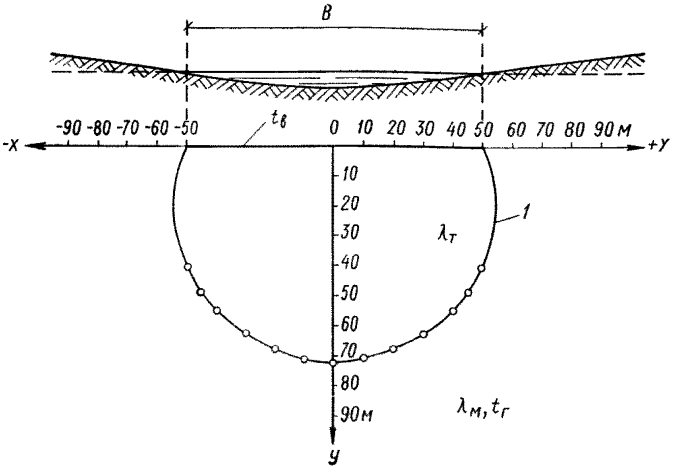


Рис. 13. Расчетная схема для определения предельной чаши протаивания под дном водохранилища при $L \geqslant 2-3B$

1 — расчетный контур оттаивания, $t(x, y)=0$ по формуле (16)

В формуле (16) учет фазовых переходов влаги осуществляется путем приведения разнородной среды из оттаивающего и мерзлого грунта к однородной, так называемой приведенной среде, условно принимаемой и состоящей только из мерзлого грунта. При этом интересующие нас с точки зрения устойчивости плотины и ее основания искомые температуры мерзлого грунта и очертания чаши оттаивания не искажаются. Температура грунта внутри чаши оттаивания уменьшается в $\frac{\lambda_т}{\lambda_м}$ раз при задаваемой по контуру дна водохранилища температуры теплового штампа $t_в$. За тепловой штамп принимается водохранилище шириной B. При определении температуры дна водохранилища по формуле (16) не учитывается очертание естественных подводных бортов водохранилища, а также рельеф «сухой» поверхности. В меньшей степени на точность расчета влияют такие упрощающие допущения, как осреднение грунтов по их теплопроводности, приведение таломерзлой среды к условно однородной мерзлой, прямоугольная форма водохранилища в плане (длина водохранилища L) должна удовлетворять неравенству $L \geqslant (2-3)B$.

Пренебрегая влиянием геотермического градиента и принимая ширину водохранилища вблизи плотины постоянной и равной B, при длине водохранилища $L \gg B$ температуру в любой точке области стационарного температурного поля прогрева грунтов дна можно определить по графоаналитическому способу построения стационарного температурного поля в основании плоского штампа (двухмерная задача).

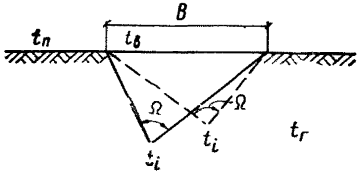


Рис. 14. Расчетная схема для определения предельной зоны оттаивания с использованием углов видимости Ω

Температура в любой точке основания с координатами x, y вычисляется по формуле

$$t(x, y) = \left(\frac{\lambda_т}{\lambda_м} t_в - t_0 \right) \frac{\Omega}{\pi} + t_0, \qquad (17)$$

где угол видимости $\Omega = \operatorname{arctg} \dfrac{0{,}5B - x}{y} + \operatorname{arctg} \dfrac{0{,}5B + x}{y}$ (в радианах)

может определяться графически (рис. 14);

$t_в$ — температура поверхности дна водохранилища, принимаемая равной температуре воды в придонном слое;

t_0 — средняя температура вечномерзлого грунта на глубине нулевых амплитуд (в обоих слагаемых со знаком минус);

$\dfrac{\lambda_т}{\lambda_м} t_в - t_0$ — полный температурный перепад Δt, в котором за условный ноль принято значение t_0 (например, при $t_0 = -4°$ С и $\dfrac{\lambda_т}{\lambda_м} t_в = \dfrac{1{,}35}{1{,}65} 4 = 3{,}3°$ С перепад Δt равен 7,3° С).

Искомая температура $t(x, y)$ характеризует стационарное (предельное) температурное состояние дна водохранилища.

В центре водохранилища максимальное оттаивание может быть определено по формуле

$$x = 0{,}5B \operatorname{ctg} \left[\frac{\pi}{2} \frac{\lambda_т t_0}{\lambda_т t_0 - \lambda_м t_1} \right]. \qquad (18)$$

3. Динамика оттаивания промороженного берегового склона после заполнения водохранилища

Динамика (скорость и глубина) оттаивания полностью промороженного вечномерзлого массива берегового склона водохранилища, (и приближенно верхового откоса плотины) определяется следующими

формулами (рис. 15):

$$y = x\sqrt{\frac{\lambda_м t_2}{\lambda_т t_1 - \frac{Q}{2\tau}x^2} - 1}\ ; \qquad (19)$$

$$y = -x\sqrt{\frac{\lambda_т t_1}{\lambda_м t_2 + \frac{Q}{2\tau}x^2} - 1}\ . \qquad (20)$$

Если $\lambda_м t_2 \geqslant \lambda_т t_1$, граница мерзлой зоны определяется одним уравнением (19), а при $\lambda_м t_2 < \lambda_т t_1$ — двумя уравнениями; при $x^2 \geqslant \frac{\lambda_т t_1 - \lambda_м t_2}{Q/2\tau}$ уравнением (19), а при $x^2 < \frac{\lambda_т t_1 - \lambda_м t_2}{Q/2\tau}$ уравнением (20).

В формулах (19) и (20) приняты те же обозначения, что в формуле (10) и дополнительно обозначено:

t_2 — среднегодовая температура поверхности грунта тела плотины (в приближенных расчетах она может быть принята равной среднегодовой температуре наружного воздуха).

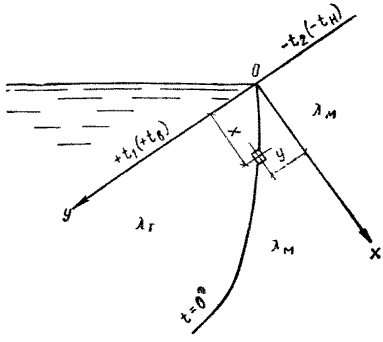


Рис. 15. Расчетная схема оттаивания грунтового массива при наклонном его заложении в зоне водохранилища

При $\tau = \infty$ уравнение (19) примет следующий вид:

$$y = x\sqrt{\frac{\lambda_м t_2}{\lambda_т t_1} - 1}\ , \qquad (21)$$

т. е. граница мерзлой зоны будет представлена прямой линией.

Граница мерзлой зоны под дном водохранилища является частным случаем уравнения (19).

При $y = \infty$ уравнение (19) примет вид

$$x\sqrt{\frac{\lambda_м t_2}{\lambda_т t_1 - \frac{Q}{2\tau}x^2} - 1} = \infty .$$

Величины, входящие в числитель: x, $\lambda_м$, t_2, являются конечными, поэтому необходимым условием соблюдения равенства является

$$\lambda_т t_1 - \frac{Q}{2\tau}x^2 = 0.$$

Решая это уравнение относительно x, получим $x = \sqrt{\frac{2\lambda_т t_1 \tau}{Q}}$.

Пример определения динамики границы оттаивания грунта в промороженном откосе при создании водохранилища дан в приложении 3 (пример 3).

4. Расчет стационарного температурного режима мерзлой плотины, промороженной до заполнения водохранилища, и определение стационарного (предельного) положения нулевой изотермы

Рассматривается земляная плотина неограниченной (рис. 16) высоты (бесконечный клин); на поверхности верхового откоса ниже НПГ задана постоянная среднемноголетняя положительная температура t_1, а выше уреза воды и по низовому откосу — среднемноголетняя отрицательная температура наружного воздуха t_2 (рис. 16).

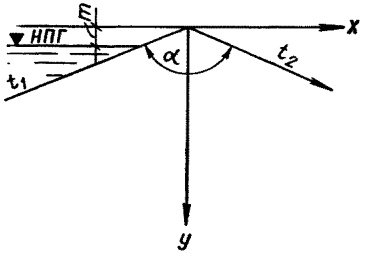


Рис. 16. Расчетная схема определения температурного поля однородной симметричной плотины в условиях стационарного режима

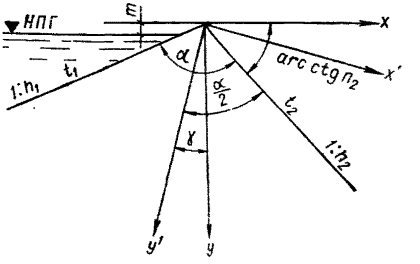


Рис. 17. Расчетная схема определения температурного поля однородной несимметричной плотины в условиях стационарного режима

Задача решена методом конформных отображений.

Для определения температуры в любой точке плотины рекомендуется формула

$$\left.\begin{aligned} t_в &= t_2 + \frac{t_1 - t_2}{\pi}\,\operatorname{arctg}\frac{e^A}{\sqrt{\operatorname{ctg}^2 B + 1} - e^A \operatorname{ctg} B}\,; \\ A &= \frac{\pi}{\alpha}\,\ln\frac{1}{m}\sqrt{\frac{x^2+y^2}{\operatorname{tg}^2\frac{\alpha}{2}+1}}\,; \\ B &= \frac{\pi}{\alpha}\,\operatorname{arctg}\frac{x + y\operatorname{tg}\frac{\alpha}{2}}{y - x\operatorname{tg}\frac{\alpha}{2}}\,. \end{aligned}\right\} \qquad (22)$$

Настоящее решение справедливо как для симметричного, так и для несимметричного очертания профиля плотины.

При различных заложениях откосов решение получается путем поворота осей координат по часовой стрелке на угол γ, равный

$$\gamma = \operatorname{arctg}\frac{1}{n_2} - \frac{\pi - \alpha}{2}\,, \qquad (23)$$

где n_2 — заложение низового откоса (рис. 17).

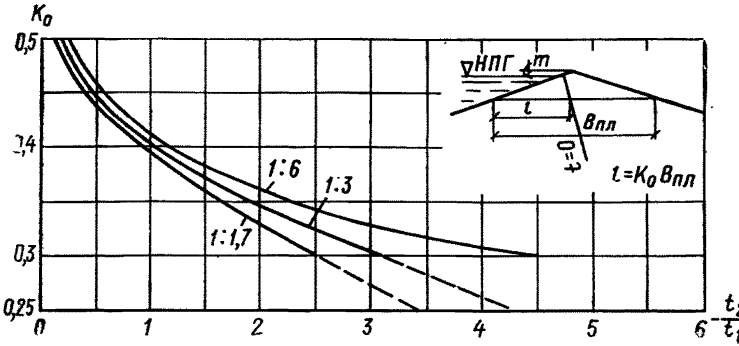


Рис. 18. Определение величины K_0 для нахождения нулевой изотермы в зависимости от отношения среднегодовых температур воды и воздуха для мерзлых земляных плотин с откосами 1:1,7($\alpha=120°$); 1:3($\alpha=140°$); 1:6($\alpha=160°$) при $\frac{m}{H_{пл}}=\frac{1}{4}$; m — превышение гребня плотины над НПГ

Решение получено при предположении, что плотина построена на слое мерзлоты бесконечной глубины.

Для инженерных расчетов используется график для определения ширины талой зоны в основании плотины (рис. 18)

$$l=BK_0, \tag{24}$$

где l — ширина талой зоны в основании плотины;

B — ширина плотины по основанию;

K_0 — критерий предельного оттаивания плотины в условиях стационарного режима.

Определены величины K_0 для заложений откосов 1 : 1,7; 1 : 3; 1 : 6 и построены графики, позволяющие определить величину K_0 для

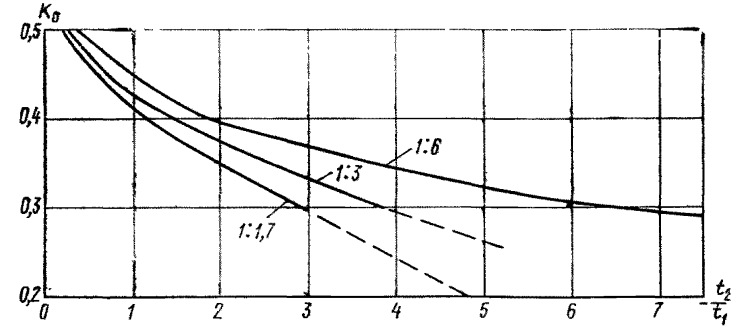


Рис. 19. Определение величины K_0 для нахождения нулевой изотермы от среднегодовых температур воды и воздуха для мерзлых земляных плотин с откосами 1 : 1,7; 1 : 3; 1 : 6 при $\frac{m}{H_{пл}}=\frac{1}{6}$; m — превышение гребня плотины над НПГ

различных заложений откосов плотины как симметричных, так и несимметричных. Профиль плотины характеризуется углом α, при этом ширина по гребню плотины не учитывается (см. рис. 17).

На рис. 18 даны графики для определения K_0 при $\frac{m}{H_{пл}} = \frac{1}{4}$ и на рис. 19 при $\frac{m}{H_{пл}} = \frac{1}{6}$, где m — превышение гребня плотины над НПГ; $H_{пл}$ — высота плотины.

Влияние притока тепла из недр земли на положение нулевой изотермы учитывается критерием K_q, зависящим от мощности мерзлоты h, высоты плотины H, превышения гребня над НПГ, температур воды водохранилища t_1 и наружного воздуха t_2.

Ширина талой зоны с учетом притока тепла снизу в основании плотины будет определяться по зависимости

$$l_q = K_0 K_q B. \qquad (25)$$

Величина K_q определяется по графику рис. 20. Исследования нестационарного температурного режима ряда мерзлых плотин показали, что при высоте плотины до 20 м и разнообразных сочетаниях мерзлотно-грунтовых условий и внешних температур тепловое влияние водохранилища на температурное поле природного массива под плотиной ощутимо сказывается до глубины 25—35 м. Поэтому естественная температура мерзлоты на глубине 35—40 м может быть принята в качестве нижнего граничного условия. При использовании графика рис. 20 для определения величины K_q для плотин высотой 20—30 м расчетная мощность мерзлоты основания может быть принята не более 30—40 м.

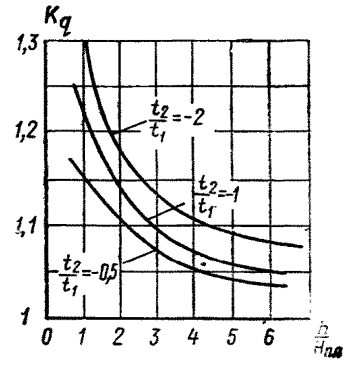


Рис. 20. Графики для определения величины K_q (притока тепла из недр земли для однородной плотины)

5. Теплотехнический расчет мерзлотной завесы в однородной земляной плотине без учета взаимного влияния колонок

Расчет динамики роста цилиндра мерзлого грунта вокруг воздушной замораживающей колонки основан на следующих допущениях:

плотина отсыпана из однородного грунта. Начальная положительная температура грунта, его влажность, плотность и теплофизические свойства осредняются по высоте, длине и ширине плотины;

средняя по высоте плотины температура наружной поверхности замораживающей колонки постоянна в течение периода зимнего охлаждения;

процессы теплообмена колонки и грунта рассматриваются только в горизонтальной плоскости; тепловые потоки направлены по радиусу колонки и образуемого ею мерзлотного цилиндра;

температура замерзания грунта принимается равной 0° С. Незамерзшей воды в грунте не остается;

фильтрация и обусловленный ею конвективный теплообмен в пределах мерзлотной завесы отсутствуют;

все 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 в мерзлотной завесе и их взаимное тепловое влияние не учитываются (что уменьшит время промораживания).

а) Промораживание в течение одного зимнего периода

При выполнении расчета по формуле (26), применяемой для практических целей, находим радиус мерзлотного цилиндра

$$R_1 = \sqrt[3]{\frac{3\tau_1 t_к r_к \lambda_м}{q}} + 0{,}5 r_к, \qquad (26)$$

где R_1 — радиус мерзлотного цилиндра за первый зимний период охлаждения, м;

τ_1 — продолжительность первого зимнего периода охлаждения, ч;

$t_к$ — средняя по высоте плотины температура внешней поверхности колонки за период охлаждения, °С;

$r_к$ — внешний радиус колонки, м;

$\lambda_м$ — коэффициент теплопроводности мерзлого грунта, ккал/(м·ч·град);

q — количество тепла, выделяющееся при замерзании 1 м³ грунта от $t_{нач}$ до $t_{пр}$ и отводимое воздухом, движущимся в колонке, определяется по зависимости

$$q = \rho W_о = 80\,000 W_с \gamma_{ск}. \qquad (27)$$

$W_о$ — объемная влажность $W_о = W_с \gamma_{ск}$.

Здесь $W_с$ — суммарная весовая влажность, доли единицы;

$\gamma_{ск}$ — объемный вес скелета грунта, т/м³;

ρ — скрытая теплота плавления льда, равная 80 ккал/кг.

б) Промораживание в течение двух и более зимних периодов

При длительном промораживании в течение двух и более зимних периодов зависимость между продолжительностью охлаждения, радиусом мерзлого цилиндра и другими данными можно определить по зависимости

$$\left.\begin{aligned} \tau &= \frac{80\,000 W_о + t_{нач} C_т - 0{,}33 t_к C_м}{4 t_к \lambda_м} A; \\ A &= \left(2R_2^2 \ln \frac{R_2}{r_к} - 2R_1^2 \ln \frac{R_1}{r_к} - R_2^2 + R_1^2\right), \end{aligned}\right\} \qquad (28)$$

где W_0 — объемная влажность, доли единицы;

$t_{нач}$ — начальная температура грунта, чаще всего положительная, близкая к нулю ($0° C \leqslant t_{нач} \leqslant 1° C$);

$C_т$, $C_м$ — объемная теплоемкость талого и мерзлого грунта, ккал/(м³·град);

R_1 — радиус мерзлого цилиндра в конце предыдущего периода промораживания, определенный по формуле (26);

R_2 — радиус мерзлотного цилиндра к концу второго периода охлаждения, м. Остальные обозначения см. в формуле (26).

Формула (28) может быть использована при определении радиуса мерзлотного цилиндра при работе охлаждающей установки в течение нескольких зимних периодов охлаждения, когда $\tau = \tau_1 + \tau_2 + ... + \tau_n$.

Величину $t_к$ — расчетную среднюю температуру внешней колонки — рекомендуется определять по формуле

$$t_к = t_н + 4° C, \tag{29}$$

где $t_н$ — средняя температура наружного воздуха за период вентилирования (ноябрь—март).

в) 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 (30), учитывающая взаимное влияние соседних колонок.

Для перехода от трехмерной задачи к двухмерной в плоскости, перпендикулярной оси колонки (рис. 21), принимались:

вертикальный градиент температуры в грунте равен 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 на гидроинтеграторе с их последующим обобщением.

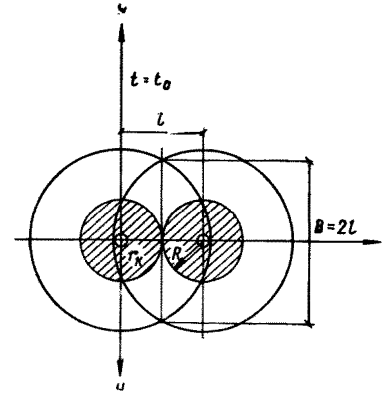


Рис. 21. Расчетная схема для определения размеров мерзлотных цилиндров

В результате получено исходное критериальное уравнение, связывающее в общем виде искомый критерий Fo с определяющими

$$Fo = f\left(Bi,\ Ko\left[\frac{t_в}{t_0}\right],\ \frac{l}{r_к}\right), \tag{30}$$

где $Fo = \frac{\lambda_м \tau}{C_м r^2_к}$ — критерий Фурье (безразмерное время);

$Bi = \frac{\alpha_1 d_к}{\lambda_м}$ — критерий Био;

$Ko = \frac{q}{C_м [t_в]}$ — критерий Коссовича;

$\lambda_м$ — коэффициент теплопроводности мерзлого грунта, ккал/(м·ч·град);

$C_м$ — объемная теплоемкость мерзлого грунта, ккал/(м³·град);

$r_к$, $d_к$ — внешний радиус и диаметр замораживающей колонки, м;

τ — продолжительность работы замораживающей системы, ч;

l — шаг колонок, м;

$t_в$ — 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, которая приводится в примере 5 приложения 3.

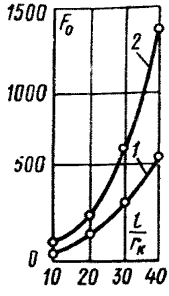


Рис. 22. Зависимость критерия *Fo* от безразмерного шага колонок

1 — момент смыкания мерзлотных цилиндров; *2* — образование льдогрунтовой стенки шириной *2l*

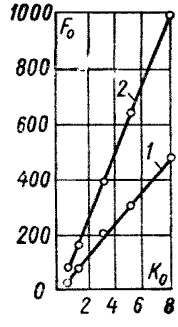


Рис. 23. Зависимость продолжительности работы замораживающей системы до момента смыкания мерзлотных цилиндров от критерия Коссовича

1 — при $\frac{l}{r_к} = 15$; *2* — при $\frac{l}{r_к} = 20$

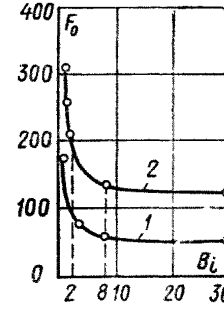


Рис. 24. Зависимость продолжительности работы замораживающей системы до момента смыкания мерзлотных цилиндров от критерия Био

1 — при $\frac{l}{r_к} = 15$; *2* — при $\frac{l}{r_к} = 20$

Если нужно определить только время смыкания льдогрунтовых цилиндров при заданном l или время образования мерзлотной завесы шириной $2l$, можно воспользоваться номограммой, выражающей зависимость $Fo=f\left(\frac{l}{r_к}\right)$ (рис. 22).

При экспериментальных и теоретических исследованиях установлено, что продолжительность работы замораживающей системы до момента смыкания льдогрунтовых цилиндров и образования сплошной льдо-

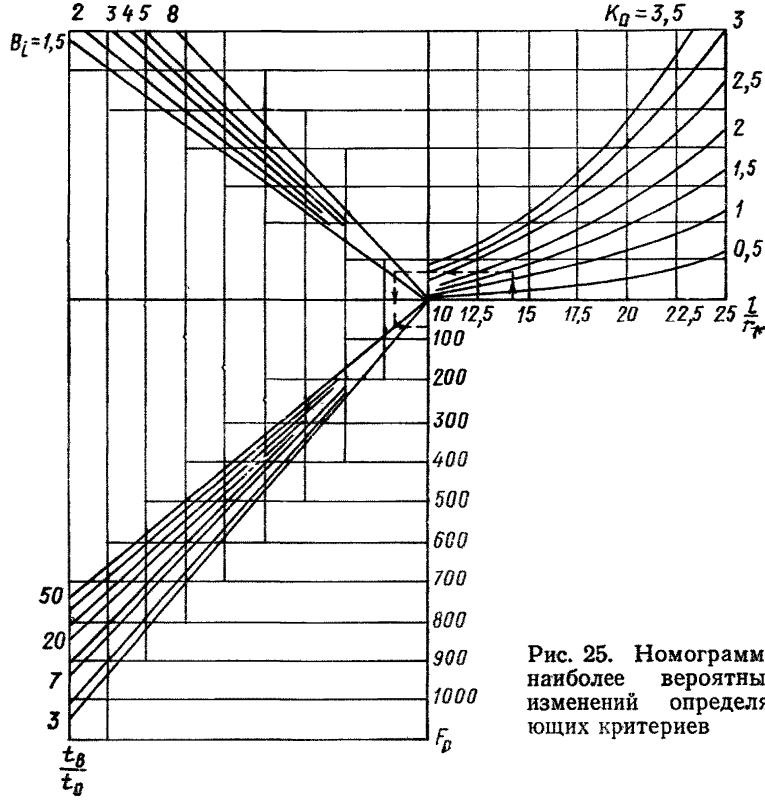


Рис. 25. Номограмма наиболее вероятных изменений определяющих критериев

грунтовой стенки прямо пропорциональна критерию Ko (рис. 23), величина которого определяется затратами тепла на фазовый переход грунтовой влаги, температурой теплоносителя и теплоемкостью грунта.

В результате решения серии задач на гидроинтеграторе найдены функции, аппроксимирующие зависимости безразмерного времени (критерий Fo) от каждого из критериев, определяющих процесс промерзания грунта двумя соседними замораживающими колонками. Получены формулы для определения Fo для момента смыкания мерзлотных цилиндров и для момента образования стенки шириной $2l$.

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

При выборе оптимальных размеров замораживающей системы следует производить проверку по величине критерия *Bi*. При малых значениях *Bi* резко увеличивается продолжительность работы замораживающей системы до момента смыкания льдогрунтовых цилиндров. Увеличение *Bi* более 6—8 не дает практического эффекта (рис. 24).

$$2 < Bi < 8. \tag{31}$$

На изменение величины *Bi* существенное влияние оказывает коэффициент теплоотдачи α_1.

Величина α_1 зависит от скорости теплоносителя (воздуха).

На рис. 25 приведена номограмма в наиболее вероятном диапазоне изменения критериев *Fo*, *Bi*, *Ko*.

При определении критериев *Fo*, *Bi*, *Ko* предполагается, что расчет отдельной замораживающей колонки уже произведен.

Оптимальность принятых параметров воздушной замораживающей колонки может быть проверена по условию С. М. Филипповского

$$\frac{\lambda_м h}{C_в Q \rho_т} < 0{,}3, \tag{32}$$

где $C_в$ — объемная теплоемкость воздуха; Q — расход воздуха; h — длина колонки; $\rho_т$ — термическое сопротивление стенок колонок.

Пример проверки оптимальности параметров замораживающей колонки приведен в примере 5 приложения 3. Пример расчета времени смыкания мерзлотных цилиндров и образования мерзлотной стенки с учетом взаимного влияния колонок дан в примере 6 приложения 3.

6. Определение скорости движения воздуха и производительности вентиляторов

При определении скорости движения воздуха в замораживающих колонках необходимо знать:

а) радиус мерзлотного цилиндра (за период первого зимнего охлаждения τ_1, м;

б) внешний радиус колонки $r_к$, м;

в) среднюю длину колонок $h_к$, м, и их количество n.

Объем мерзлотного цилиндра вокруг каждой колонки будет равен:

$$V_ц = \pi(R_1^2 - r_к^2)\, h_к. \tag{33}$$

Объем мерзлотной стенки, образующийся за период τ_1, при работе системы из n колонок равен:

$$V = V_ц n. \tag{34}$$

Количество тепла, выделяющееся при замораживании грунта в объеме всей мерзлотной стенки при работе всех колонок, определяется формулой

$$q_з = qV = 80\,000 W_0; \tag{35}$$

$$W_0 = W_с \gamma_{ск},$$

где $W_с$ — суммарная влажность грунта, доли единицы;

$\gamma_{ск}$ — объемный вес скелета грунта, т/м³.

Для системы n колонок их суммарная холодоотдача в грунт при движении холодного наружного воздуха в кольцевом пространстве колонки определяется по зависимости

$$Q^* = \Phi \gamma_в C'_в (t_{вх} - t_{вых}), \qquad (36)$$

где Φ — величина общего объема воздуха, прогоняемого через все колонки мерзлотной завесы за период замораживания τ_1;

$\gamma_в$ — объемный вес воздуха, кг/м³ (при $t=0$);

$C'_в$ — удельная теплоемкость воздуха, ккал/(кг·град);

$t_{вх}$, $t_{вых}$ — температура воздуха на входе и выходе из колонок.

При нагнетании холодного воздуха по внутренней трубе, а отводе — по кольцевому зазору между внутренней и внешней трубами колонки связь между температурами входящих и выходящих воздушных потоков и температурой воздуха на дне колонки можно определить по формуле

$$t_{вых} - t_{дн} = (t_{вых} - t_{вх}) \left(1 - \frac{\pi K_1 h_к}{\Phi_1 C_в}\right), \qquad (37)$$

где $t_{вых}$, $t_{вх}$, $t_{дн}$ — соответственно температура воздуха на выходе, входе и на дне замораживающей колонки, °С;

Φ_1 — расход воздуха, м³/ч;

$C_в$ — объемная теплоемкость воздуха (0,325 ккал/(м³××град);

K_1 — линейный коэффициент теплопередачи (ккал/(м³××ч·град);

$h_к$ — длина колонки, м.

Величина K_1 может быть принята равной 1,38; 1,03 и 0,966 соответственно для стальной, фанерной и винипластовой внутренних труб.

Полагая равными значения Q^* и q_3, из уравнений (35) и (36) находим искомую величину Φ.

Для нахождения скорости движения воздуха необходимо задаться производительностью всех вентиляторов; общая производительность всех вентиляторов системы будет равна:

$$P = \frac{\Phi}{\tau_1}, \qquad (38)$$

где τ_1 — продолжительность периода зимнего вентилирования колонок, ч.

Если систему замораживающих колонок разделить на m секций, то производительность каждого отдельного вентилятора, обслуживающего каждую из m секций замораживающей системы, равна:

$$P' = \frac{P}{m}. \qquad (39)$$

При известной площади кольцевого сечения колонки ω (м²) и числе N колонок секции, обслуживаемых одним вентилятором, средняя скорость движения воздуха в кольцевой щели определяется формулой

$$V = \frac{P'}{3600 N \omega}, \qquad (40)$$

где

$$N=\frac{n}{m};\ \omega=\pi\left[\left(\frac{d_2}{2}\right)^2-\left(\frac{d_1}{2}\right)^2\right],\ \text{м};$$

d_2 — внутренний диаметр наружной трубы колонки, м;
d_1 — то же, наружный, м.

На основании натурных данных $V_в$ не должна быть менее 3 м/с. Оптимальная величина $V_в=5$—9 м/с.

Задаваясь величиной $V_в$ в интервале $2\leqslant V_в\leqslant 8$—9 м/с, по формуле (40) можно определить необходимую производительность вентилятора каждой секции.

Ориентировочно средняя скорость движения воздуха в кольцевой щели при заданной производительности вентилятора P' может быть определена также по формуле

$$V_в=\frac{0{,}35P}{d_2^2-d_1^2}. \qquad (41)$$

Примеры определения скорости движения воздуха и производительности вентиляторов даны в приложении 3 (пример 7 и 8).

7. Средняя температура мерзлотной завесы

Определение средней по высоте плотины температуры мерзлотной завесы необходимо для расчетов устойчивости и прочности мерзлого ядра и профиля плотины в целом.

Рассмотренные выше методики расчета мерзлотных завес не содержат рекомендации по определению средних температур мерзлотной завесы.

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

а) средняя температура по объему завесы при полном смыкании мерзлых цилиндров

$$t_{ср}=t_к\left(0{,}32+0{,}8\frac{d}{l}-0{,}2\frac{l}{B}\right); \qquad (42)$$

б) средняя для завесы температура в точке пересечения продольной оси завесы с плоскостью смыкания цилиндров

$$t_{см}=t_к\left(0{,}73-0{,}55\frac{l}{B}+\frac{d}{l}\right), \qquad (43)$$

где d — внешний диаметр колонки, м;
l — расстояние между осями колонок, м;
B — минимальная толщина завесы в плоскости смыкания цилиндров, м;
$t_к$ — расчетная температура внешней поверхности колонки, средняя за период вентилирования.

Расчет по формулам (42) и (43) для Иреляхской плотины и сопоставление с натурными данными (приложение 3, пример 4) показывают удовлетворительное совпадение.

8. Учет конвективного теплообмена между поверхностью грунта и воздухом

При наличии температурного градиента между двумя участками тела плотины теплопередача от одного участка к другому осуществляется: теплопроводностью вдоль отдельных частиц и их контактов, а также молекулярной теплопроводностью в среде, заполняющей промежутки между частицами — воде или воздухе (явление конвекции). Таким образом теплообмен в теле плотины сводится к процессу теплопроводности и конвекции.

В приближенных расчетах температурного режима тела и основания плотины обычно исходят только из уравнения теплопроводности, полагая, что конвекция существенного значения не имеет.

Однако, как показали экспериментальные и теоретические исследования последнего времени, конвекцию в теле каменно-земляных плотин следует учитывать.

Изменение температуры при постоянных граничных условиях определяется тремя теплофизическими характеристиками: коэффициентом теплопроводности λ, теплоемкостью C и коэффициентом температуропроводности a.

В плотинах, где могут быть использованы крупнозернистые, галечниковые материалы и каменная наброска, теплоперенос происходит не только за счет теплопроводности, но и при определенных условиях за счет конвекции.

Для нефильтрующих плотин существенное значение может иметь естественная конвекция. Учет конвективного теплообмена приближенным способом может быть выполнен путем введения так называемых эффективных теплофизических характеристик материала. Для возникновения движения воздуха в теле плотины необходимо, чтобы подъемная сила — критическая разность температур (вызванная неоднородностью температурного поля) — была бы несколько больше силы сопротивления материала тела плотины движению воздуха.

В низовой призме каменнонабросной плотины формируется поток воздуха переменной температуры, который будет наблюдаться до тех пор, пока температура низовой призмы не станет близка к температуре наружного воздуха.

Коэффициент эффективной теплопроводности определяется по формуле

$$\lambda_э = \varphi \lambda_т, \tag{44}$$

где φ — коэффициент увеличения теплопроводности из-за наличия конвективных токов.

Величина φ для теплопереноса воздуха и воды может быть ориентировочно определена по графику рис. 2, в зависимости от коэффициента фильтрации грунтов тела плотины и высоты плотины для рассматриваемого сечения h.

Влияние конвективного теплообмена, приводящего к увеличению коэффициента теплопроводности для крупнообломочных материалов, поясняется на примере.

Коэффициент фильтрации каменной наброски $K=20$ м/сутки; $h=30$ м (высота плотины на расстоянии 30 м от гребня плотины);

$$\lambda_т = 2{,}8 \text{ ккал/(ч·м·град)} = \frac{2{,}8 \cdot 24}{1000} = 0{,}0672 \text{ мг кал/(сут·м·град)}.$$

По графику рис. 26 по K и h определяем $\lambda_т(\varphi-1)=0{,}02$ мгкал/сут××м·град;

$$\varphi-1=\frac{0{,}02}{0{,}0672}=0{,}296;\quad \varphi=1+0{,}296=1{,}296.$$

$$\lambda_э=\varphi\lambda_т=1{,}296\cdot 0{,}0672=0{,}0874 \text{ мгкал/сут·м·град.}$$

Величину φ в наброске следует учитывать.

Рассмотрим влияния конвективного теплообмена на коэффициент теплопроводности для супесчаных грунтов.

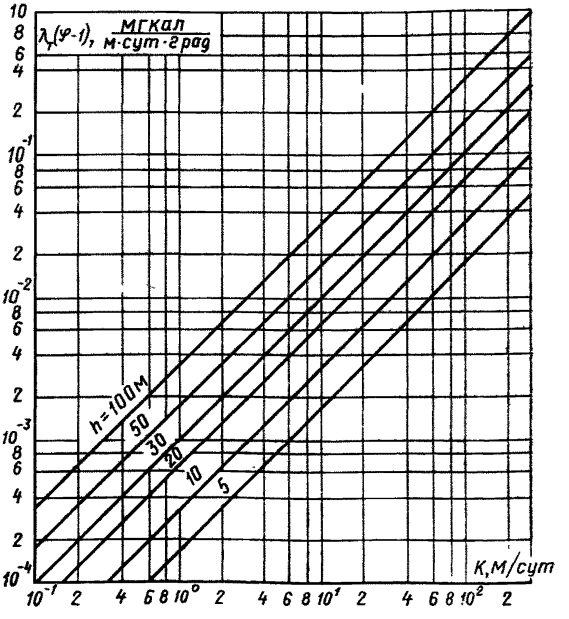


Рис. 26. График зависимости $\lambda_т(\varphi-1)$ от K и h

Коэффициент фильтрации супесчаных грунтов $K=0{,}3$ м/сутки: $\lambda_т=2{,}3$ ккал/м·ч·град; $\lambda_т=0{,}055$ мгкал/сут·м·град; $h=30$ м.

По графику рис. 26 по K и h определяем величину $\lambda(\varphi-1)=3\cdot 10^{-4}$.

$$\varphi-1=\frac{0{,}0003}{0{,}055}=0{,}00545;$$

$$\varphi=1+0{,}005=1{,}005.$$

В данном случае φ можно не учитывать.

Величину φ следует учитывать, если $\varphi\geqslant 1{,}1$.

ПРИМЕРЫ ПРИБЛИЖЕННЫХ РАСЧЕТОВ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ТЕЛА ПЛОТИНЫ, ЕЕ ОСНОВАНИЯ И ДНА ВОДОХРАНИЛИЩА

Пример 1. Определение динамики оттаивания вечной мерзлоты под дном водохранилища (положение нулевой изотермы)

Определяем положение нулевой изотермы при следующих исходных данных:

t_1 — температура воды на дне водохранилища +6° С;

$t_2 = |t_{гр}|$ — температура грунта —4° С;

$C_м$ — объемная теплоемкость мерзлого грунта 400 ккал/(м³·град);

$\lambda_т$ — коэффициент теплопроводности оттаявшего грунта при полном влагонасыщении 1,25 ккал/(м·ч·град);

$W_с$ — суммарная влажность (льдистость) грунта в долях единицы 0,2;

ρ — скрытая теплота фазового перехода влаги грунта 80 000 ккал/т;

τ — время от заполнения водохранилища до рассматриваемого момента (ч).

За время τ грунт оттает на величину x:

$$x = \sqrt{\frac{2\lambda_т t_1 \tau}{0{,}9\rho W_с + C_м t_{гр}}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1{,}25 \cdot 6\tau}{0{,}9 \cdot 80000 \cdot 0{,}2 + 400 \cdot 4}} = \frac{\sqrt{\tau}}{33};$$

$$\tau = 1 \text{ год} = 8750 \text{ ч}; \quad x = \frac{\sqrt{8750}}{33} = 2{,}85 = 2{,}9 \text{ м}.$$

Для различных τ значения x даны в табл. 12.

Таблица 12

τ, год	1	5	10	20	30
x, м	2,85	6,35	8,99	12,6	20

Пример 2. Определение стационарного температурного состояния грунтов дна водохранилища (рис. 27)

Дано:

Теплофизические характеристики дна водохранилища

$\lambda_м = 1{,}8$ ккал/(ч·м·град);

$\lambda_т = 1{,}5$ ккал/(ч·м·град);

$t_в = +4°$ С;

$t_г = t_0 = -2°$ С;

$B = 100$ м.

Найти температуру грунта для точек A и B с координатами

A ($x = 60$ м; $y = 35$ м);

B ($x = 0$; $y = 110$ м);

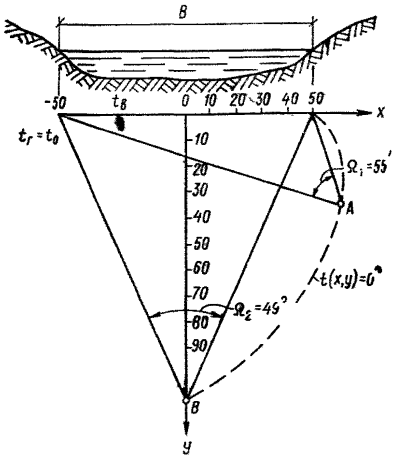


Рис. 27. Углы видимости Ω для точек *A* и *B* при определении предельной зоны оттаивания под дном водохранилища

по формуле (17)

$$t_{(x,y)} = \frac{\frac{\lambda_т}{\lambda_м} t_в - t_0}{\pi} \Omega + t_0,$$

где Ω — угол видимости для точек *A* и *B*, определяется графически (см. рис. 24);

$\alpha_A = 55°$; в радианах $\alpha_A = 55 \times 0{,}0174 = 0{,}955$;

$\alpha_B = 49°$; в радианах $\alpha_B = 49 \times 0{,}0174 = 0{,}85$;

$$t_A = \frac{\frac{1{,}5}{1{,}8} 4 - (-2)}{3{,}14} 0{,}955 - 2{,}0 = -0{,}38° \text{ С};$$

$$t_B = \frac{\frac{1{,}5}{1{,}8} 4 - (-2)}{3{,}14} 0{,}85 - 2 = -0{,}68° \text{ С}.$$

В центре водохранилища максимальное оттаивание определяется по формуле (18):

$$x = 0{,}5B \operatorname{ctg}\left[\frac{\pi}{2} \cdot \frac{\lambda_т t_0}{\lambda_т t_0 - \lambda_м t_1}\right] = 0{,}5 \cdot 100 \operatorname{ctg}\left[\frac{3{,}14}{2} \times \frac{1{,}5(-2)}{1{,}5(-2) - 1{,}8(+4)}\right] = 102 \text{ м}.$$

Пример 3. Определение положения нулевой изотермы в промороженном береговом склоне после заполнения водохранилища в различные периоды времени (рис. 28).

Дано:

t_2 — температура грунта берегового склона выше горизонта воды —5° С;

t_1 — среднегодовая температура воды в водохранилище +4° С;

$t_{гр}$ — начальная температура вечномерзлого грунта —4° С;

$\lambda_т = 1{,}5$ ккал/(ч·м·град);

$\lambda_м = 1{,}8$ ккал/(ч·м·град);

$W_0 = 0{,}2$;

$\rho = 80\,000$ ккал/м³.

Требуется построить нулевые изотермы в различные периоды времени τ : τ = 1; 5; 20 лет.

Границы талой и мерзлой зоны определяются по одному из уравнений (19) или (20):

$$y = x\sqrt{\frac{\lambda_м t_2}{\lambda_т t_1 - \frac{Q}{2\tau}x^2} - 1};$$

$$y = -x\sqrt{\frac{\lambda_г t_1}{\lambda_м t_2 + \frac{Q}{2\tau}x^2} - 1}.$$

Так как $\lambda_м t_2 > \lambda_т t_1$ (1,8·5>1,5·4), то граница мерзлой зоны определяется только одним уравнением (19). Величина Q, входящая в эти уравнения, определяется по зависимости $Q = 0{,}9\rho W_0 + C_м t_{гр} = 0{,}9 \times$ $\times 80\,000 \cdot 0{,}2 + 400 \cdot 4 = 16\,000$ ккал/м³.

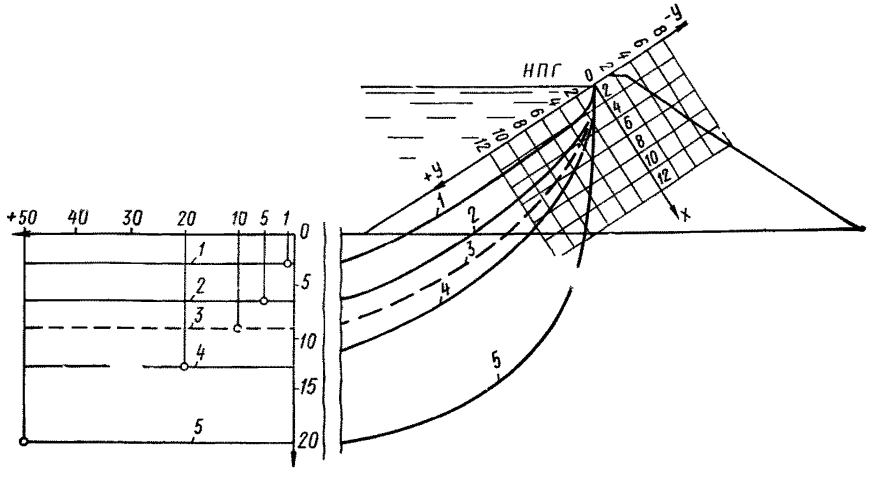


Рис. 28. Положение границ талого и мерзлого грунта в пределах откосной области грунта, прилегающего к водохранилищу и под дном водохранилища при $\lambda_м t_2 > \lambda_т t_1$

1 — при $\tau = 1$ год; $x = 2{,}9$ м; *2* — при $\tau = 5$ лет; $x = 6{,}4$ м; *3* — при $\tau =$ $= 10$ лет; $x = 9$ м; *4* — при $\tau = 20$ лет; $x = 12{,}6$ м; *5* — при $\tau = 50$ лет; $x = 20$ м

В формулах (19) и (20) $t°_1$C, $t°_2$C и $t°_{гр}$.C — абсолютное значение температур (без учета знака).

При $\tau = 1$ год

$$y = x\sqrt{\frac{1{,}8 \cdot 5}{1{,}5 \cdot 4 - \frac{16000}{2 \cdot 8750}x^2} - 1} = x\sqrt{\frac{9}{6 - 0{,}912\,x^2} - 1}.$$

При $\tau=5$ и 20 расчеты ведутся аналогично.

При $\tau=\infty$ $y=x\sqrt{\frac{9}{6}-1}=x\cdot 0{,}71$.

Значения y при различных x даны в табл. 13 для различного времени τ.

Таблица 13

x	Значение y при $\lambda_м t_2 > \lambda_т t_1$			
	1 год	5 лет	20 лет	∞
1	0,877	0,739	0,715	—
1,5	1,697	—	—	—
2	3,362	1,628	1,478	—
3	—	3,102	2,346	2,13
3,5	—	4,134	—	—
4	—	—	3,372	—
5	—	11,53	4,625	—
6	—	—	6,210	4,26
9	—	—	15,48	—

Направление координатных осей x и y показано на рис. 28.

Пример 4. Теплотехнический расчет динамики роста мерзлотной завесы в земляной плотине

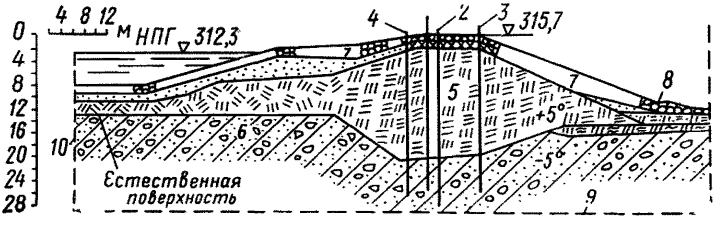


Рис. 29. Расчетное сечение плотины на р. Ирелях

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

Определить радиусы мерзлотных цилиндров в различные периоды зимнего охлаждения для плотины на р. Ирелях (высота плотины 10 м). Поперечный профиль плотины дан на рис. 29; там же показано расположение замораживающей колонки и температурных скважин.

Дано:

l — расстояние между центрами колонок 1,5 м;

h — высота колонки 20 м (средняя высота);

$t_к$ — средняя температура внешней поверхности колонки —20°+ +4°=—16° (расчетная температура наружного воздуха в период вентилирования —20° $t_к$ в предварительных расчетах допускается определять по формуле $t_к=t_{нач}+4°$ С);

$r_к$ — внешний радиус колонки 0,11 м;

$\lambda_м$ — коэффициент теплопроводности мерзлого грунта 1,8 ккал/(м·ч·град);

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

$t_{нач}$ — начальная положительная средняя температура грунта +1° С (принята по местным условиям);

$t_{пр}$ — предельная температура, до которой следует охладить центральную часть плотины минус 1° С;

$W_о$ — объемная влажность грунта 0,15;

$\gamma_{ск}$ — 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 (26):

$$R_1 = \sqrt[3]{\frac{3\tau_1 t_к r_к \lambda_м}{q}} + 0{,}5 r_к,$$

где $q = 80\,000 W_с \gamma_{ск}$, ккал/м³.

Так как в уравнении (26) два неизвестных R_1 и τ_1, то одной из неизвестных величин следует задаваться.

Задаемся $\tau_1 = 1000$ ч $\approx$ 42 сут. τ_1 = 1 месяц 12 дней. Тогда радиус мерзлотного цилиндра будет равен:

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

где $q = 80\,000 \cdot 0{,}15 \cdot 1{,}7 = 20\,400$ ккал/м³.

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 (28)

$$\tau_2 = \frac{80\,000 W_0 + t_{нач} C_т - 0{,}33 t_к C_м}{-4 t_к \lambda_м} \times$$

$$\times \left(2R_2^2 \ln \frac{R_2}{r_к} - 2R_1^2 \ln \frac{R_1}{r_к} - R_2^2 + R_1^2 \right). \qquad (45)$$

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; $t_к = -20°$ С (принимаем для 2-й зимы и последующих охлаждений); $t_{нач} = +1°$ С.

$C_т$, $C_м$ — осредненные объемные теплоемкости талого и мерзлого грунта;

$C_т$ — 700 ккал/м³·град;

$C_м$ — 456 ккал/м³·град;

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

$$\tau_2=\frac{80\,000\cdot 0{,}15+(+1)\,700-0{,}33\,(-20)\,465}{-4\,(-20)\,1{,}8}\left(2\cdot 36\ln\frac{6}{0{,}11}-\right.$$

$$\left.-2\cdot 1^2\cdot\ln\frac{1{,}0}{0{,}11}-36+1\right)=\frac{9640}{140}\cdot 244{,}6=16\,400\text{ ч:}$$

$$\tau_2=\frac{16\,400}{24\cdot 30}=22{,}8\text{ месяца.}$$

Тогда полное время охлаждения

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

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

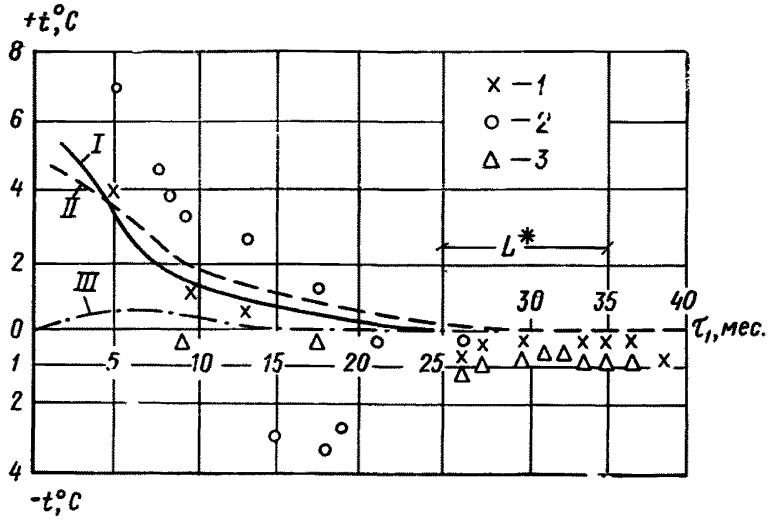


Рис. 30. Графики изменения температуры в теле и основании плотины по результатам расчетов и значения температур в сходственных точках, измеренные в натуре (скв. 5)

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 $\tau=25$—30 месяцам)

Примерно этот же срок был необходим для охлаждения тела и основания плотины до $t_{\text{пр.}}=-1°\text{C}$ (рис. 30) по натурным данным.

На рис. 30 представлено изменение температуры тела и основания плотины по теоретическим решениям на ЭВМ при $t_{\text{пр}}=-0{,}1°\text{C}$ и натурным данным.

На рис. 31 дано распределение температур в поперечном сечении плотины на р. Ирелях после промораживания ее в течение трех зимних периодов по натурным данным и на рис. 32 дано распределение температур в поперечном сечении этой плотины, рассчитанное на ЭВМ.

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

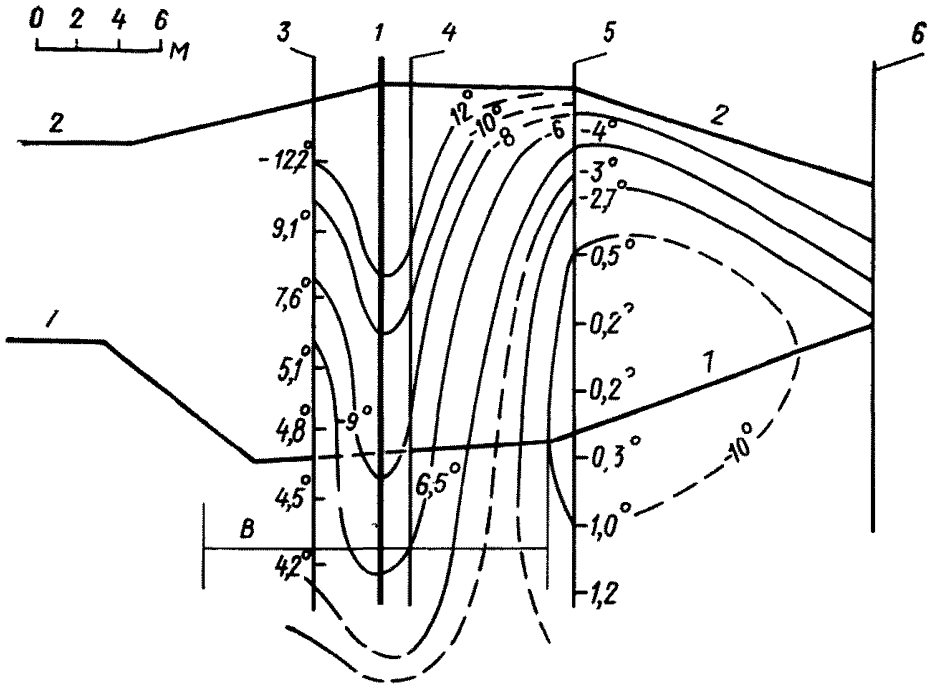


Рис. 31. Температурное поле центральной части плотины и ее основания по натурным данным

B = 16—18 м; *1* — замораживающая колонка; *2* — верхний контур плотины; *3, 4, 5* и *6* — температурные скважины; *7* — естественная поверхность

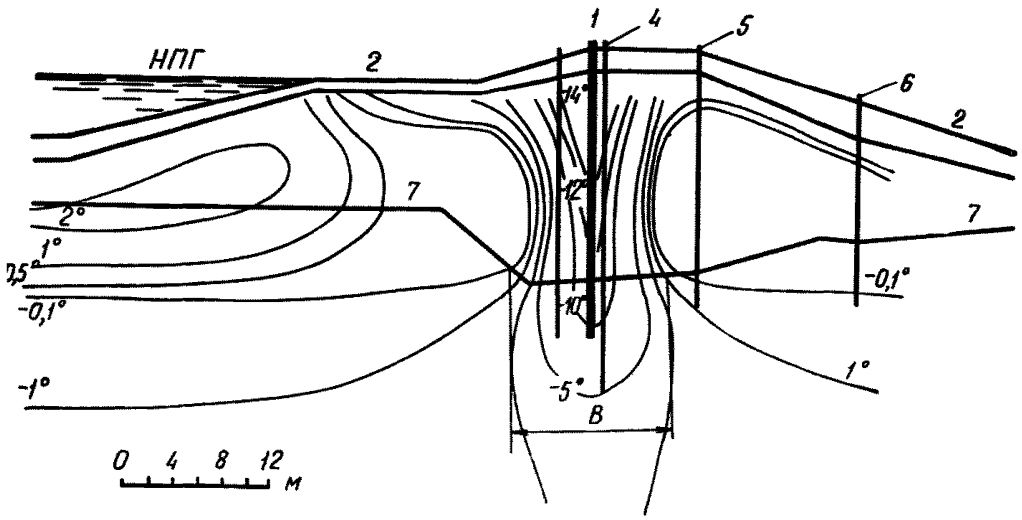


Рис. 32. Температурное поле центральной части плотины и ее основания и части ложа водохранилища на 30 марта 1967 г., построенное по данным расчета ЭВМ

B = 10—12 м; *1* — замораживающая колонка; *2* — верхний контур плотины; *3, 4, 5* и *6* — температурные скважины; *7* — естественная поверхность

Сопоставление данных натурных наблюдений и расчетных решений по образованию мерзлотной завесы в центральной части плотины на р. Ирелях

а) По данным теоретического расчета, выполненного на ЭВМ, для периода начального промораживания плотины при $t_{пр}=-0{,}1°$ С и $t_{нач}=+5°$ С ширина мерзлотной завесы $B=10$ м в центральной части и $B=12$ м в основании плотины (см. рис. 32).

Суммарное время зимнего промораживания при этом $\tau=18$ месяцам.

б) По данным натурных наблюдений. Начальное промерзание центральной части плотины до $t_{пр}=0{,}1°$ и $t_{нач}=+5°$ С происходит за $\tau=10$—12 месяцам (см. рис. 29).

При более стабильном промораживании тела плотины и основания до $\tau_{пр}=-1°$ (см. рис. 30) потребовалось $\tau=25$—35 месяцам зимнего промерзания. Ширина мерзлотной завесы при этом 15—16 м (рис. 31).

в) По теоретическим расчетам с использованием формул (26), (27) и (28).

Для промораживания тела и основания плотины, принимая $t_{пр}=-1°$ С и $t_{нач}=+5°$ С, 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.

Пример 5. Определение оптимальности параметров замораживающей колонки

Для примера принят проектный вариант плотины на р. Сытыкан. Дано:

Параметры системы колонок в русловой части плотин

$r_к$ — 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;
$r_{экв}=r_к-r_1=0{,}106-0{,}0665=0{,}0395$ м.

Параметры грунта в центральной части тела плотины (ядра) суглинок

W — влажность 20%;
γ — объемная масса 2 т/м^3;
$\lambda_м$ — коэффициент теплопроводности мерзлого грунта 2 ккал/м·ч·град;
$C_м$ — объемная теплоемкость мерзлого грунта 480 ккал/м^3·град;
t_0 — начальная температура грунта 4° С;
$t_{гр}$ — средняя расчетная температура охлаждения грунта —8° С.

Параметры воздуха

Q — расход воздуха 558 м^3/ч;
V_1 — скорость в кольцевом пространстве колонки 8,9 м/с;
V_2 — скорость в питающей трубе 12,6 м/с;
$t_в$ — температура воздуха —31° С;
$C_в$ — теплоемкость 0,3393 ккал/м^3·град;
$\lambda_в$ — теплопроводность 0,01915 ккал/м·ч·град;
ν — кинематическая вязкость $0{,}9494\cdot10^{-5}$ м^2/с;
Pr — критерий Прандтля 0,722 (четыре последние характеристики определяются при $t=t_в$).

Условия оптимальности параметров замораживающей колонки определяются по формуле:

$$\frac{\lambda_м h}{C_в Q \rho_т} < 0{,}3.$$

$$\rho_т = \frac{\lambda_м}{\lambda} \ln \frac{r_1}{r_1 - \delta_2} + \frac{\lambda_м}{\alpha_2 (r_1 - \delta_2)} + \frac{\lambda_м}{\alpha_1 r_1};$$

$$\alpha_1 = 0{,}015 \frac{\lambda_в}{2 r_{экв}} \cdot Pr^{0,4} \cdot Re^{0,8} \left(\frac{r_к}{r_1} \right)^{0,25};$$

$$r_{экв} = r_к - r_1;$$

$$R_e = \frac{2 V_1 r_{экв}}{\nu_в};$$

$$\alpha_2 = 0{,}023 \frac{\lambda_в}{2 r_1} Pr^{0,4} Re^{0,8},$$

где $S_т$ — термическое сопротивление стенки колонки.

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

$$\alpha_2 = 0{,}023 \frac{\lambda_в}{2 r_1} Pr^{0,4} Re^{0,8} = 0{,}023 \frac{0{,}01915}{2 \cdot 0{,}0665} 0{,}722^{0,4} \cdot 78122^{0,8} =$$

$$= 0{,}023 \cdot 0{,}144 \cdot 0{,}877 \cdot 8210{,}0 = 23{,}85;$$

$$\alpha_1 = 0{,}015 \frac{\lambda_в}{2 r_{экв}} Pr^{0,4} Re^{0,8} \left(\frac{r_к}{r_1} \right)^{0,25} = 0{,}015 \frac{0{,}01915}{2 \cdot 0{,}0395} \times$$

$$\times 0{,}722^{0,4} \cdot 78122{,}2^{0,8} \left(\frac{0{,}106}{0{,}0665} \right)^{0,25} = 0{,}015 \cdot 0{,}2424 \cdot 0{,}877 \times$$

$$\times 8210{,}0 \cdot 1{,}124 = 29{,}42;$$

$$\rho_т = \frac{\lambda_м}{\lambda} \ln \frac{r_1}{r_1 - \rho_2} + \frac{\lambda_м}{\alpha_2 (r_1 - \delta_2)} + \frac{\lambda_м}{\alpha_1 r_1} = \frac{2{,}0}{40{,}0} \ln \frac{0{,}0665}{0{,}0665 - 0{,}004} +$$

$$+ \frac{2{,}0}{23{,}85 (0{,}0665 - 0{,}004)} + \frac{2{,}0}{29{,}42 \cdot 0{,}0665} = 0{,}05 \times$$

$$\times 0{,}0583 + 1{,}34 + 1{,}02 = 2{,}36;$$

$$\frac{\lambda_м h_1}{C_в Q \rho_т} < 0{,}3; \quad \frac{2{,}0 \cdot 31{,}0}{0{,}94 \cdot 558 \cdot 2{,}36} = 0{,}138 < 0{,}3.$$

$\rho_т$ — термическое сопротивление стенки колонки, поэтому режим работы колонки может быть принят.

Пример 6. Определение времени смыкания мерзлотных цилиндров или образование мерзлотных стенок с учетом взаимного влияния замораживающих колонок.

Дано:

$r = 0{,}106$ м;

$\lambda_т = 2$ ккал/(м·ч·град);

$C_м = 480$ ккал/(м³·град);

$l = 1{,}5$ м (шаг колонок);

$2l = 3$ м — толщина мерзлотной стенки (обозначение величин дано в примере 5).

Для определения времени смыкания мерзлотных цилиндров и образования мерзлотной стенки используем критерий Фурье [формула (29)] (безразмерное время) равный:

$$Fo=\frac{\lambda_т \tau}{C_м r_к^2} \text{ или } \tau=\frac{Fo\, C_м r_к^2}{\lambda_т}.$$

По номограмме рис. 22 для значения $\frac{h}{r}=\frac{1,5}{0,106}=14,1$ находим Fo для условия смыкания мерзлотных цилиндров и образования мерзлотной стенки:

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

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

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

Время, необходимое для смыкания льдогрунтовых цилиндров без учета взаимного влияния замораживающей колонки, определяем по формуле (26):

$$R_1=\sqrt[3]{\frac{3\tau_1 t_к r_к \lambda_м}{q}}+0,5\, r_к,$$

где $q=80\,000\cdot W_0=80\,000\cdot 0,2\cdot 1,6=25\,600$;

$$W_0=W_с\cdot \gamma_{ск}$$

$t_к=-31°+4°=-27°$ С;

$\lambda_м=2,4$ ккал/(м·ч·град).

Задаемся $\tau_1=400$ ч

$$R_1=\sqrt[3]{\frac{3\cdot 400\cdot(-27)\,0,106\cdot 2,4}{25\,600}}+0,5\cdot 0,11=\sqrt[3]{\frac{8250}{25600}}+$$
$$+0,05=0,75 \text{ м}.$$

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.

Пример 7. Определение скорости движения воздуха в замораживающих колонках и производительности вентиляторов

(Расчеты сделаны применительно к плотине на р. Ирелях)

Дано:

R_1 — радиус мерзлотного цилиндра за период τ_1.

Определим объем мерзлотного цилиндра вокруг замораживающей колонки

$$V_{\text{ц}}=\pi\,(R_1^2-r_{\text{к}}^2)\,h_{\text{к.ср}};\ R_1=0{,}75\text{ м};\ r_{\text{к}}=\frac{d_{\text{к}}}{2}=0{,}11;$$

$h_{\text{к.ср.}}=20$ м (средняя длина колонок);

$V_{\text{ц}}=3{,}14\,(0{,}75^2-0{,}11^2)\,20=34{,}4$ м³.

Длина по гребню плотины $L=320$ м. Расстояние между осями колонок $l=1{,}5$ м. Тогда число колонок будет равно:

$$n=\frac{L}{1{,}5}=\frac{320}{1{,}5}=213\text{ колонок}.$$

Объем мерзлотной завесы, образующийся за период τ_1, равен

$$V=V_{\text{ц}}\,n=34{,}4\cdot 213=7350\text{ м}^3.$$

Количество тепла, выделяющегося при замораживании грунта в объеме всей завесы, определяется формулой

$$q_{\text{м}}=qV,$$

где q — величина, вычисляемая по формуле

$$q=80\,000\,W_0=80\,000\cdot 0{,}15\cdot 1{,}7=20\,400\text{ ккал/м}^3.$$

Тогда $W_0=W_{\text{с}}\gamma_{\text{ск}}=0{,}15\cdot 1{,}7;$

$$q=20\,400\cdot 7350=150\,000\,000\text{ ккал}.$$

Холодоотдача в грунт при движении холодного наружного воздуха в кольцевом пространстве колонки определяется по зависимости

$$q=150\,000\,000=\Phi\gamma_{\text{в}}\,C_{\text{в}}\,(t_{\text{вх}}-t_{\text{вых}}),$$

где Φ — общий объем воздуха, прогоняемый через все колонки за первый период замораживания;

$\gamma_{\text{в}}$ — объемный вес воздуха, кг/м³, при $t=0$; 1,293 кг/м³;

$C_{\text{в}}$ — удельная теплоемкость воздуха 0,24 ккал/(м³·град);

$(t_{\text{вх}}-t_{\text{вых}})$ — температура воздуха на входе и выходе из колонок 20—18=2°.

В данном примере принято несколько заниженное значение $t_{\text{вх}}-t_{\text{вых}}=2°$. Наиболее эффективное замораживание достигается при $t_{\text{вх}}-t_{\text{вых}}=8$ или 9° С.

Если зададим время работы всех вентиляторов $\tau_1=1200$ ч=50 сут, тогда их общая производительность будет равна:

$$P=\frac{\Phi}{\tau_1}=\frac{242\,000\,000}{1200}=201\,000\text{ м}^3/\text{ч}.$$

Если все замораживающие колонки разбиты на семь секций ($m=7$), то производительность каждого отдельного вентилятора из m секций замораживающих систем будет равна:

$$P'=\frac{P}{m}=\frac{201000}{7}=28\,800\text{ м}^3/\text{ч}.$$

При известной площади кольцевого сечения колонки ω м² и числе N колонок секции, обслуживаемых одним вентилятором, средняя скорость движения воздуха в кольцевой щели определяется формулой

$$V=\frac{P}{3600\,N\omega}=\frac{28800}{3600\cdot 31\cdot 0{,}0157}=1{,}64\ \text{м/с}^2;$$

$$N=\frac{n}{m}=\frac{213}{7}=30{,}4=31\ \text{колонка};$$

$$\omega=\pi\left[\left(\frac{d_2}{2}\right)^2-\left(\frac{d_1}{2}\right)^2\right]=3{,}14\,(0{,}1^2-0{,}07^2)=0{,}0157\ \text{м}^2;$$

$d_2=0{,}2$ м внутренний диаметр наружной трубы и $d_1=0{,}14$ м диаметр внутренней трубы.

На основании практических данных $V_в$ не должна быть менее 2 м/с. Так как полученная скорость меньше 2 м³/с, то обратным пересчетом определяем необходимую производительность вентилятора

$$P_x=3600\cdot 31\cdot 0{,}0157=3500\ \text{м}^3/\text{ч}.$$

Следовательно, производительность одного вентилятора для работы n колонки при $V=2$ м/с должна быть 3500 м³/ч.

Пример 8. Определение ориентировочной средней скорости движения воздуха в кольцевой щели при заданной производительности вентилятора

Определяем среднюю скорость движения воздуха при заданной производительности вентилятора $P=3500$ м³/ч.

Средняя скорость движения воздуха будет равна:

$$V=\frac{0{,}35^1}{d_2^2-d_1^2},$$

$$V=\frac{0{,}35\cdot 3500}{0{,}2^2-0{,}14^2}=61\ 250;\quad \frac{61\ 250}{3600}=17{,}01>2\ \text{м/с}.$$

Пример 9. Определение средней температуры мерзлотной завесы

Определим среднюю температуру по объему мерзлотной завесы или плотины на р. Ирелях по формуле (42).

Средняя температура по объему завесы при полном смыкании цилиндров будет равна:

$$t_{ср}=t_щ\left(0{,}32+0{,}8\frac{d}{l}-0{,}2\frac{l}{s}\right)=-15\left(0{,}32+0{,}8\times\right.$$

$$\left.\times\frac{0{,}22}{1{,}5}-0{,}2\frac{1{,}5}{12}\right)=-6{,}2°\text{C},$$

где $t_щ=0{,}84\ t_{н.в}+0{,}09\ h=0{,}84(-20)+0{,}09\cdot 20=-15°$;

$t_{н.в.}$ — средняя за период вентилирования температура наружного воздуха —20° С;

d — внешний диаметр колонки 0,22 м;

h — высота колонки 20 м;

l — шаг завесы 1,5 м;

s — минимальная толщина завесы в плоскости смыкания цилиндров 12 м (по нормали к продольной оси завесы).

ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ НА ЭВМ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ОДНОРОДНОЙ НЕФИЛЬТРУЮЩЕЙ ЗЕМЛЯНОЙ ПЛОТИНЫ В СУРОВЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

1. Задачу о нестационарном температурном поле в нефильтрующей земляной плотине с учетом скрытой теплоты фазовых переходов влаги грунта можно рассматривать как двумерную задачу Стефана. Принимается, что это температурное поле описывается уравнением теплопроводности в области, представляющей профиль плотины с основанием (рис. 33). Именно в мерзлой зоне, где $t<t_ф$,

$$C_м \frac{\partial t}{\partial \tau}=\lambda_м\left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 t}{\partial y^2}\right),$$

а в талой зоне, где $t>t_ф$,

$$C_т \frac{\partial t}{\partial \tau}=\lambda_т\left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 t}{\partial y^2}\right),$$

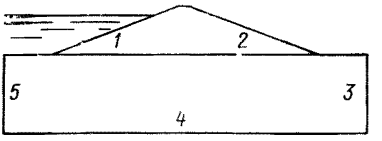


Рис. 33. Расчетный профиль плотины с основанием

где t — температура грунта, °С(К); $c_м$, $\lambda_м$ — соответственно объемная теплоемкость (ккал/м³·град или кДж/(м³·К) и теплопроводность (ккал/ч·м·град или Вт/ч·м·град) мерзлого грунта; $c_т$, $\lambda_т$ — то же, талого; τ — время, ч; $t_ф$ — температура фазовых превращений влаги грунта (°С или К). Граница раздела талых и мерзлых зон изменяется во времени и заранее неизвестна. На этой границе, которая отыскивается в процессе решения задачи, выполняются условия Стефана:

$$t=t_ф;\ \lambda_м \frac{\partial t}{\partial n}\bigg|_м-\lambda_т \frac{\partial t}{\partial n}\bigg|_т=\rho\gamma W \frac{dl}{d\tau},$$

где n — нормаль к границе раздела фаз; ρ — скрытая теплота фазового перехода единицы массы воды, ккал/кг; γ — объемная масса грунта, кг/м³; $W_с$ — суммарная влажность грунта *, доли единицы; $\frac{dl}{d\tau}$ — скорость продвижения границы раздела талой и мерзлой зон, м/ч.

В качестве начального условия должна быть задана температура в теле плотины и в основании. На части *1* верхового откоса (рис. 33) и на дне водохранилища граничное условие имеет вид

$$t=t_1, \tag{46}$$

---

* $W_с$ определяется как отношение массы воды в единице объема грунта к массе единицы объема грунта, включая и воду.

а на поверхности *2* (рис. 33), граничащей с воздухом:

$$t=t_2, \tag{47}$$

где t_2 и t_1 — месячные среднемноголетние температуры воздуха * и воды в водохранилище.

На отрезках *3* и *5* (рис. 33) граничное условие задавали в виде $\frac{\partial t}{\partial x}=0$, что выражает отсутствие тепловых потоков через эти границы.

На границе *4* (рис. 33), на глубине $2h$, где h — высота плотины, граничное условие принимали в виде

$$t=t'=\text{const}.$$

Расчеты температурного режима на ЭВМ проведены по явной шеститочечной разностной схеме, построенной на основании теплового баланса. Предварительно эта методика была опробована в методических расчетах одномерных и двумерных задач Стефана.

Ниже приводятся результаты расчетов температурного режима однородных плотин с симметричными профилями. Высота их принималась 30 м, уровень воды в верхнем бьефе 25 м, ширина гребня 4—5 м. Рассматривался только эксплуатационный период. Предполагалось, что он начинается с октября, что к этому времени водохранилище наполнено и что в нижнем бьефе воды нет в течение всего расчетного периода.

Теплофизические характеристики грунтов тела плотины и основания, а также другие данные, участвующие в расчетах, принимались следующие.

Влажность $W_c=0{,}3$ в теле плотины и в основании; объемный вес грунта в теле плотины $\gamma=1800$ кг/м^3, в основании $\gamma=1600$ кг/м^3.

$\lambda_т$ = 1,5 кал/(м·ч·град) = 1,74 вт/(м·град);

$\lambda_м$ = 1,8 ккал/(м·ч·град) = 2,088 вт/(м·град);

$C_т$ = 690 ккал/(м^3·град) = 2898 кдж/(м^3·град);

$C_м$ = 480 ккал/(м^3·град) = 2016 кдж/(м^3·град).

Эти данные взяты из главы СНиП «Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах» и соответствуют супеси при указанной плотности и влажности.

Скрытая теплота фазовых переходов единицы массы воды $\rho=80$ ккал/кг (336 кДж/кг), температура фазового перехода $t_ф=-0{,}05°$ С (273,1° К).

Месячные среднемноголетние температуры воды и воздуха для района г. Мирного Якутской АССР приведены в табл. 14.

2. Для предварительной оценки температурного режима плотины и основания, для определения начальных и граничных условий в основании решены две одномерные задачи.

а) Одномерная задача Стефана о распределении температуры грунта по глубине. На поверхности грунта, граничащей с воздухом, принимается условие (47), на глубине 200 м условие $\frac{\partial t}{\partial y}=g$, где g — геотер-

* Отепляющее влияние снегового покрова на температурный режим плотины в этих расчетах не учитывалось.

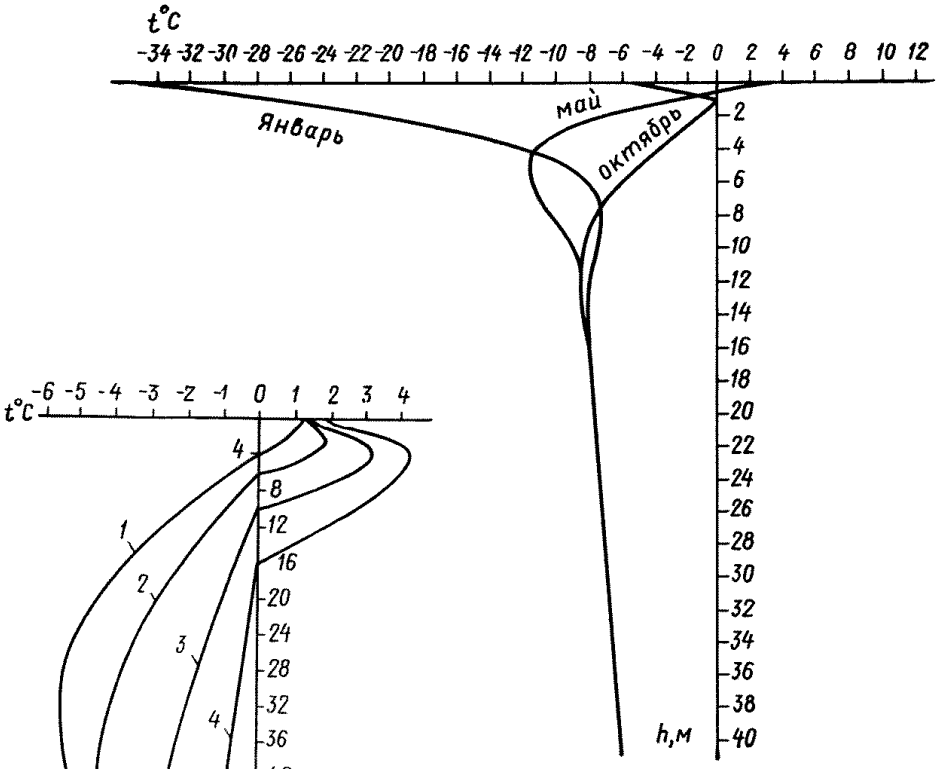


Рис. 34. Распределение температуры по глубине грунта в разные периоды года на основании численного расчета задачи Стефана

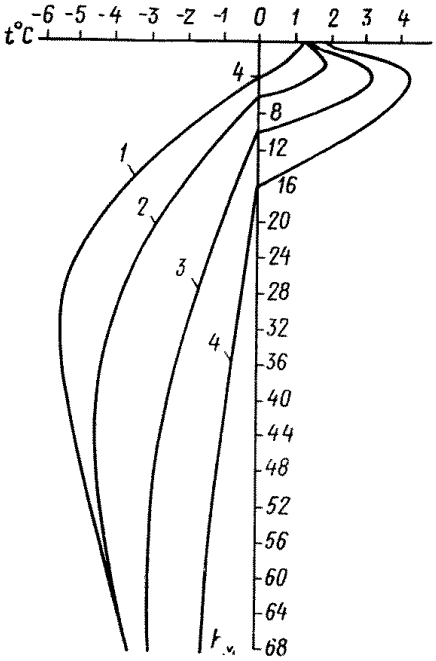


Рис. 35. Распределение температуры под дном водохранилища после заполнения его на основании численного расчета задачи Стефана
1 — 5 лет; *2* — 10 лет; *3* — 25 лет; *4* — 75 лет

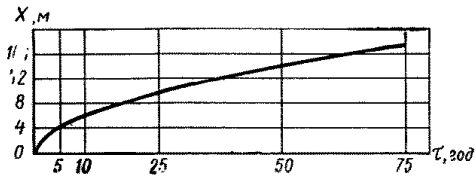


Рис. 36. Зависимость глубины протаивания ложа водохранилища от времени на основании численного расчета задачи Стефана
x — глубина протаивания ложа водохранилища

Таблица 14

Месяц	Температура			
	воздуха		воды	
	К	°С	К	°С
1	238,15	—35	274,4	1,25
2	240,65	—32,5	274,4	1,25
3	255,75	—17,4	273,66	0,51
4	267,95	—5,2	273,9	0,75
5	276,05	2,9	278,25	5,1
6	282,95	9,8	286,25	13,1
7	289,15	16	290,45	17,3
8	287,75	14,6	286,45	13,3
9	277,35	4,2	282,25	9,1
10	267,35	— 5,8	276,65	3,5
11	243,95	—29,2	274,65	1,5
12	237,95	—35,2	274,41	1,26

мический градиент, условно принятый равным 0,03 град/м. Это условие учитывает наличие постоянного теплового потока из недр земли (ось y направлена вниз). Начальное условие $t(y,0)=-2°$ С по всей глубине, продолжительность расчетного периода 100 лет.

После такого длительного срока распределение температур близко к квазистационарному и слабо зависит от начальных данных. Результаты расчета на январь, май, октябрь 100-го года приведены на рис. 34. Сезонные температурные колебания не проникают глубже 12—15 м.

Результаты расчета этой задачи использовались в двумерных задачах для назначения граничного условия на отрезке *4* (рис. 33) и начальных условиях в основании плотины.

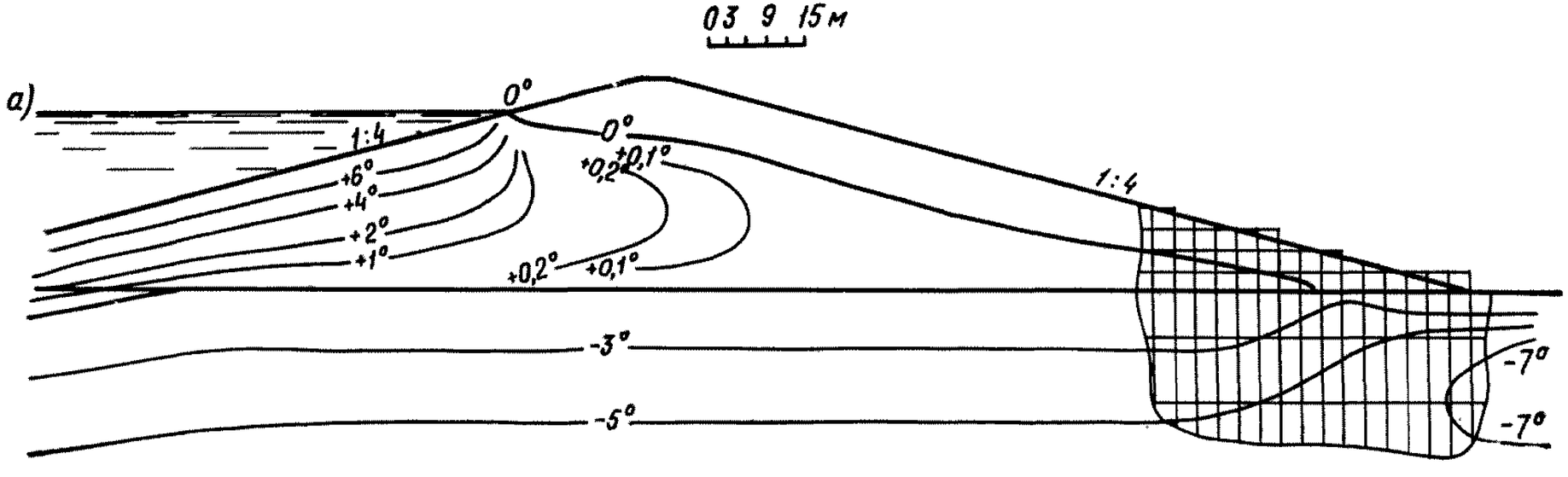
б) Одномерная задача о протаивании ложа водохранилища после его заполнения. В этой задаче на поверхности грунта ложа водохранилища задается условие (46). Начальное условие взято из решения предыдущей задачи. В остальном эта задача аналогична предыдущей. Результаты расчета на 5-, 10-, 25- и 75-й годы представлены на рис. 35. Зависимость глубины протаивания ложа водохранилища от времени изображена на рис. 36. Эту зависимость эмпирически можно описать формулой $\xi=2\sqrt{\tau}$, где ξ — глубина протаивания, м; τ — время, год.

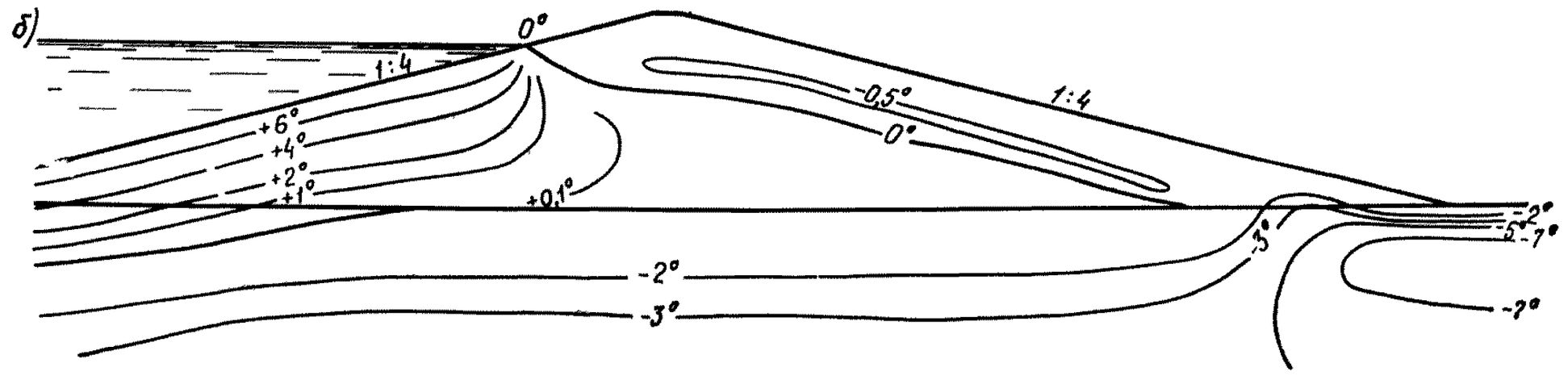
Результаты расчета этой задачи могут служить для назначения граничного условия на отрезке *4* (рис. 33), а также для корректировки решения двумерных задач.

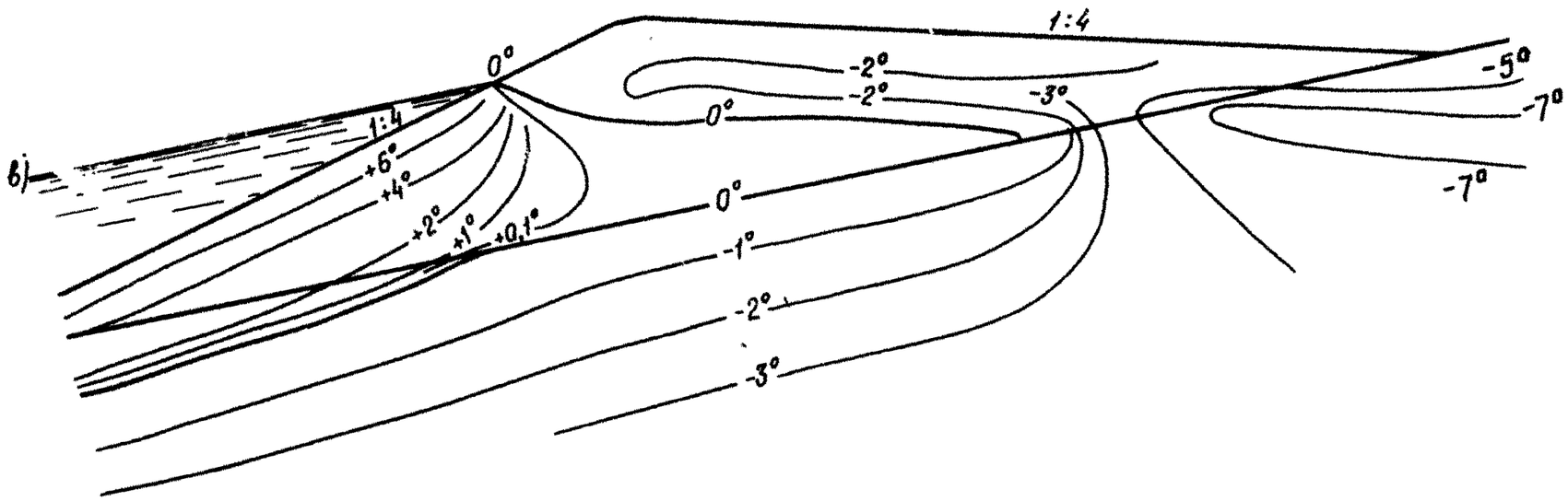
3. Двумерные задачи

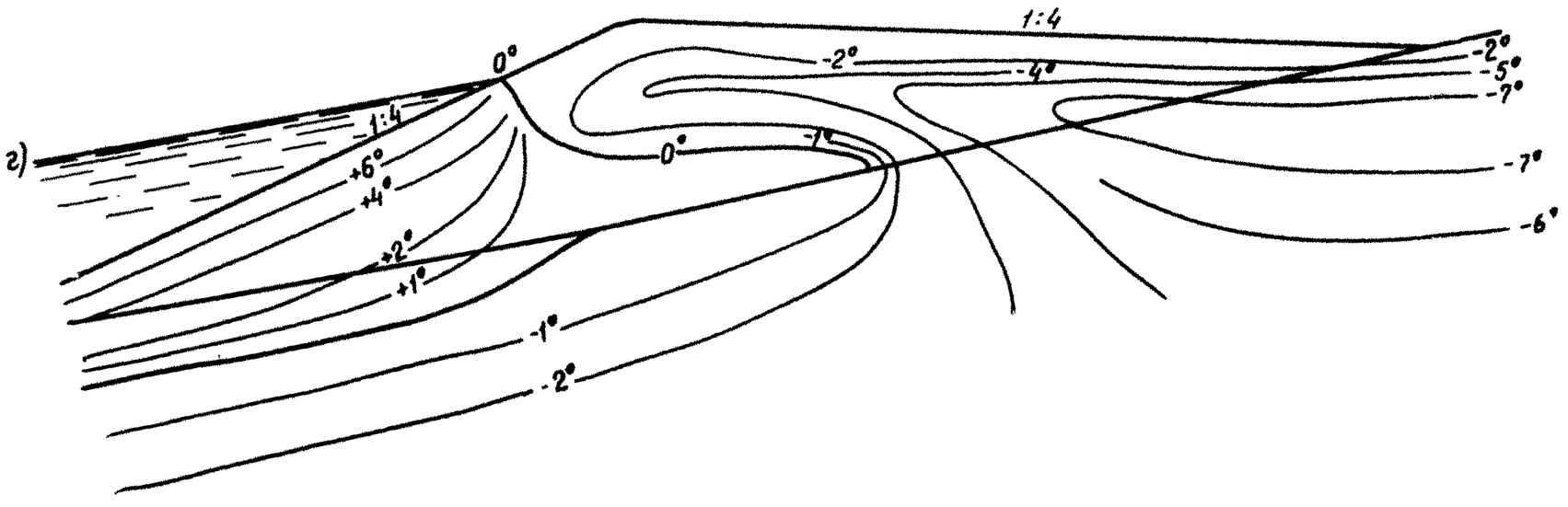
а) Плотина с откосами 1 : 4, талый вариант. Начальные данные: $t_0=+1°$ С в теле плотины; в основании начальная температура задана на основе решения одномерной задачи в п. 2а. На границе *4* (рис. 33) граничное условие $t'=-4{,}5°$ С. Продолжительность расчетного периода 200 лет. Температурные поля, полученные в расчете, приведены на рис. 38. Картина продвижения границы промерзания изображена на рис. 38.

Фронт промерзания перемещается от поверхности низового откоса в глубь тела плотины. В течение первых 50 лет фронт перемещается, оставаясь параллельным поверхности низового откоса. Глубина промерзания в пределах этого периода пропорциональна $\sqrt{\tau}$. После этого периода граница промерзания постепенно смещается в сторону верхо-


0 3 9 15 м
а)
0°
1:4
+6°
+4°
+2°
+1°
0°
+0,2°
+0,1°
+0,2°
+0,1°
1:4
-3°
-5°
-7°
-7°


б)
0°
1:4
+6°
+4°
+2°
+1°
+0,1°
-0,5°
0°
1:4
-3°
-2°
-5°
-7°
-2°
-3°
-7°


1:4
0°
-2°
-2°
-3°
-5°
0°
-7°
1:4
+6°
+4°
+2°
+1°
+0,1°
0°
-1°
-2°
-3°
-7°


1:4
0°
-2°
-4°
-2°
-5°
-7°
1:4
+6°
+4°
+2°
+1°
0°
-1°
-1°
-7°
-6°

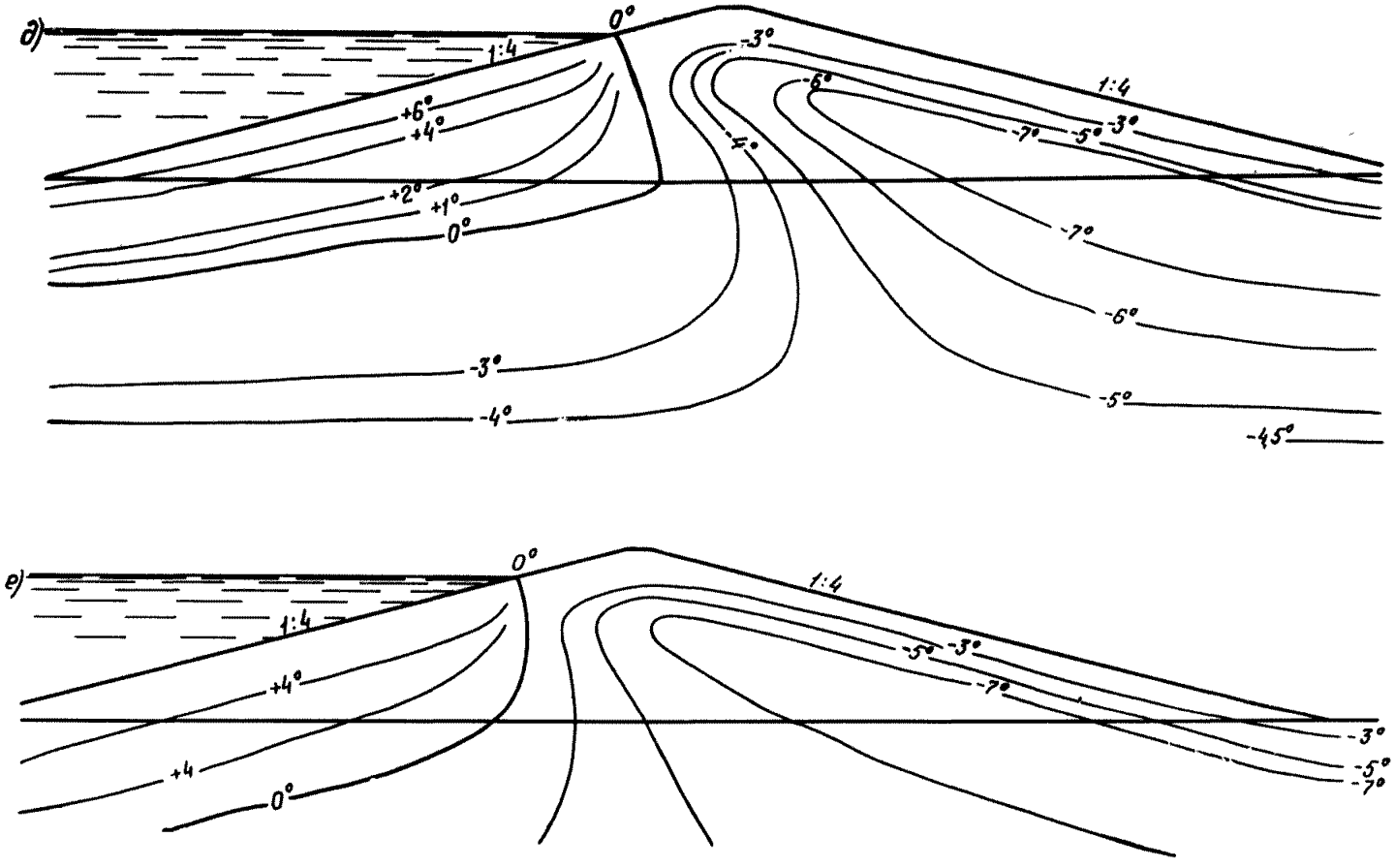


Рис. 37. Изменение во времени температурного поля в талой земляной плотине с откосами 1 : 4
$t_{нач.гр}$ = +1° С; *а* — 5 лет; *б* — 10 лет; *в* — 25 лет; *г* — 50 лет; *д* — 100 лет; *е* — 200 лет (см. стр. 95—97).

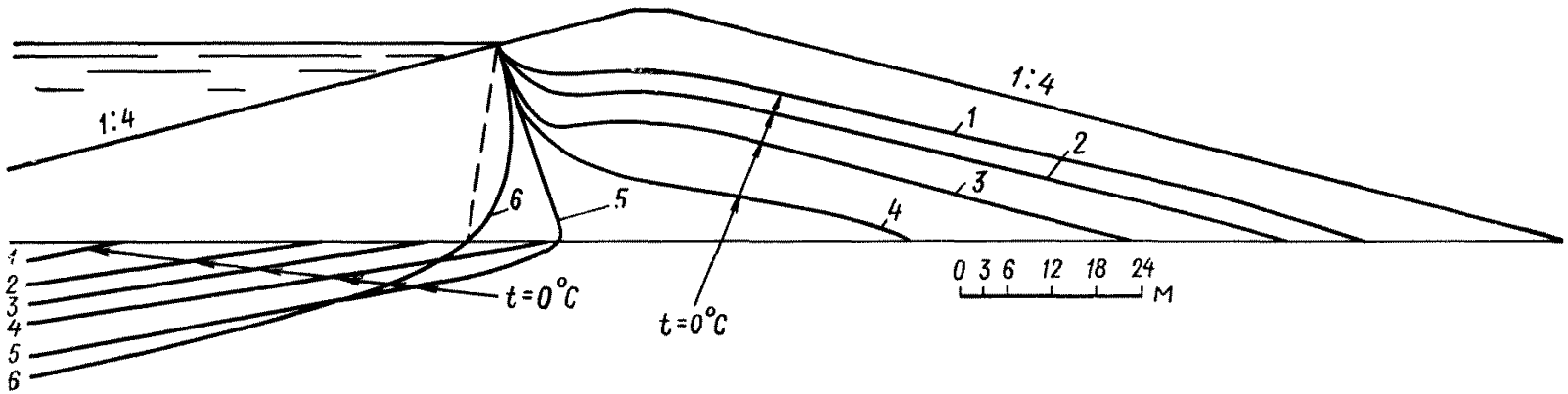


Рис. 38. Продвижение границы фазового перехода в талой земляной плотине с откосами 1 : 4
$t_{нач.гр}$= +1° С; *1* — 5 лет; *2* — 10 лет; *3* — 25 лет; *4* — 50 лет; *5* — 100 лет; *6* — 200 лет

вого откоса, приближаясь к своему предельному (стационарному) положению. Положение границы промерзания согласно решению И. С. Моисеева стационарной задачи с осредненными за год температурами воды и воздуха изображено на рис. 38 пунктиром.

К концу расчетного периода в теле низового откоса образуется мощный промороженный слой. Вдоль нормали к поверхности низового откоса на достаточном удалении от гребня после 100-летнего расчетного периода до глубины 15—20 м от поверхности температурное поле близко к одномерному.

На поверхности низового откоса и гребня в течение года происходят фазовые переходы на глубину деятельного слоя. Происходит оттаивание ложа водохранилища, причем глубина протаивания пропорциональна $\sqrt{\tau}$. За 100 лет ложе протаивает приблизительно на 20 м. Согласно расчету протаивание продолжается и после 100 лет.

Фазовый переход идет также вдоль стыка талой плотины с мерзлым основанием.

Время выхода температурного поля данной плотины на квазистационарный режим, согласно расчету, — порядка 100 лет.

б) Плотина с откосами 1 : 4, мерзлый вариант. Начальные данные: $t_0 = -1°$ С в теле плотины; остальные данные те же, что и в предыдущей задаче. Продолжительность расчетного периода 100 лет. Температурные поля, полученные в расчете, показаны на рис. 39. Картина продвижения границы оттаивания изображена на рис. 40.

В этой задаче в отличие от предыдущей идет оттаивание тела плотины со стороны верховой грани. Граница оттаивания перемещается в глубь тела плотины, оставаясь в основном параллельной верховому откосу. В течение первых 50—100 лет, согласно расчету, глубина протаивания пропорциональна $\sqrt{\tau}$. К 100—200 годам происходит стабилизация границы протаивания в теле плотины.

С низовой стороны промерзание идет гораздо быстрее и интенсивнее, чем в предыдущей задаче для талого варианта. В мерзлой части температурное поле складывается в течение первых 10 лет и в дальнейшем слабо изменяется.

К концу расчетного периода температурное поле приближается к тому, которое образовалось в предыдущей задаче. Температурное поле через большой промежуток времени (порядка 100 лет) не зависит от начальных условий.

в) Плотина с откосами 1 : 6, талый вариант. Начальные и граничные условия такие же, как в задаче 3а. Расчетный период 100 лет. Продвижение нулевой изотермы показано на рис. 41.

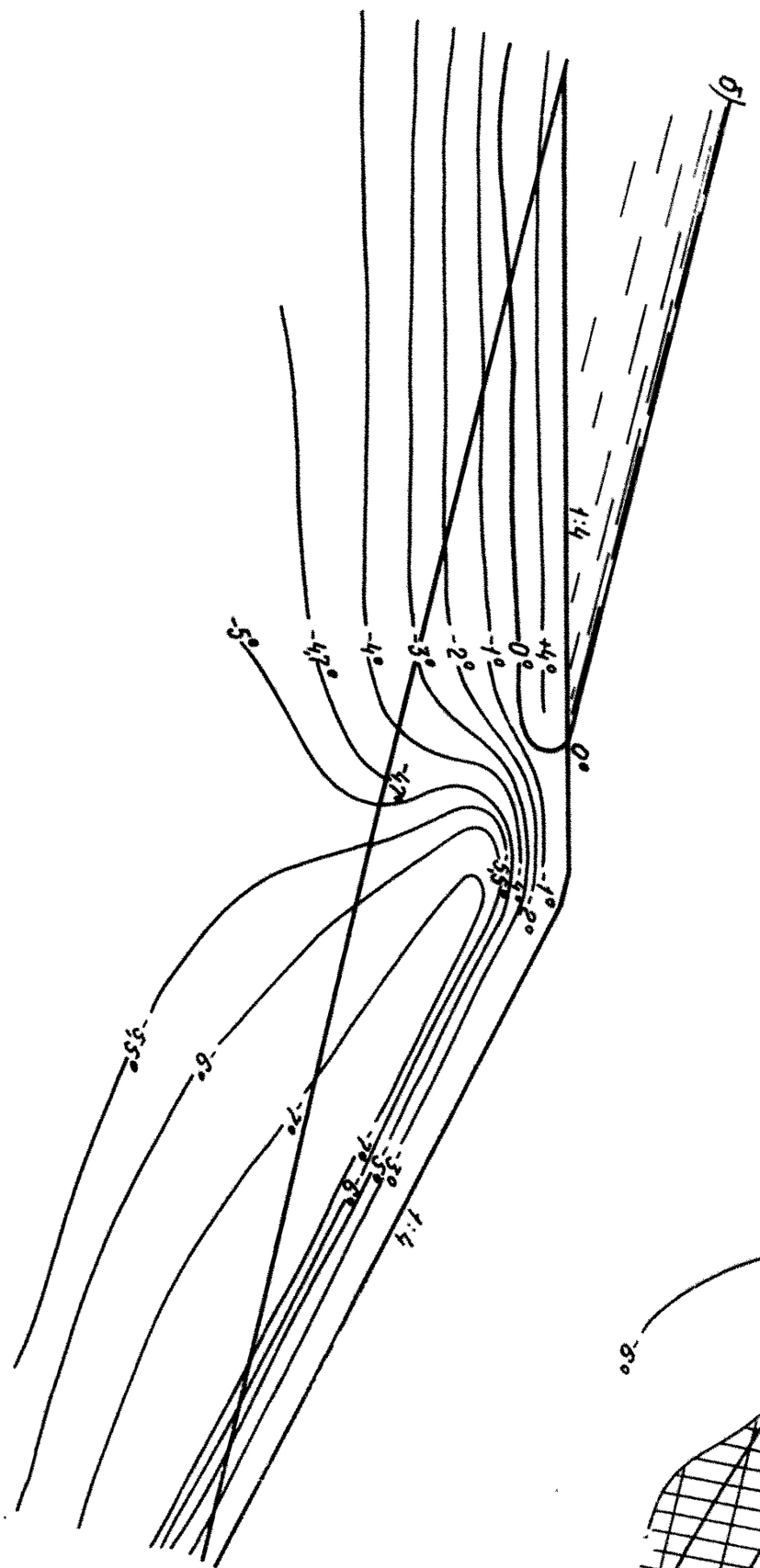
Результаты расчета в целом аналогичны результатам п. 3а.

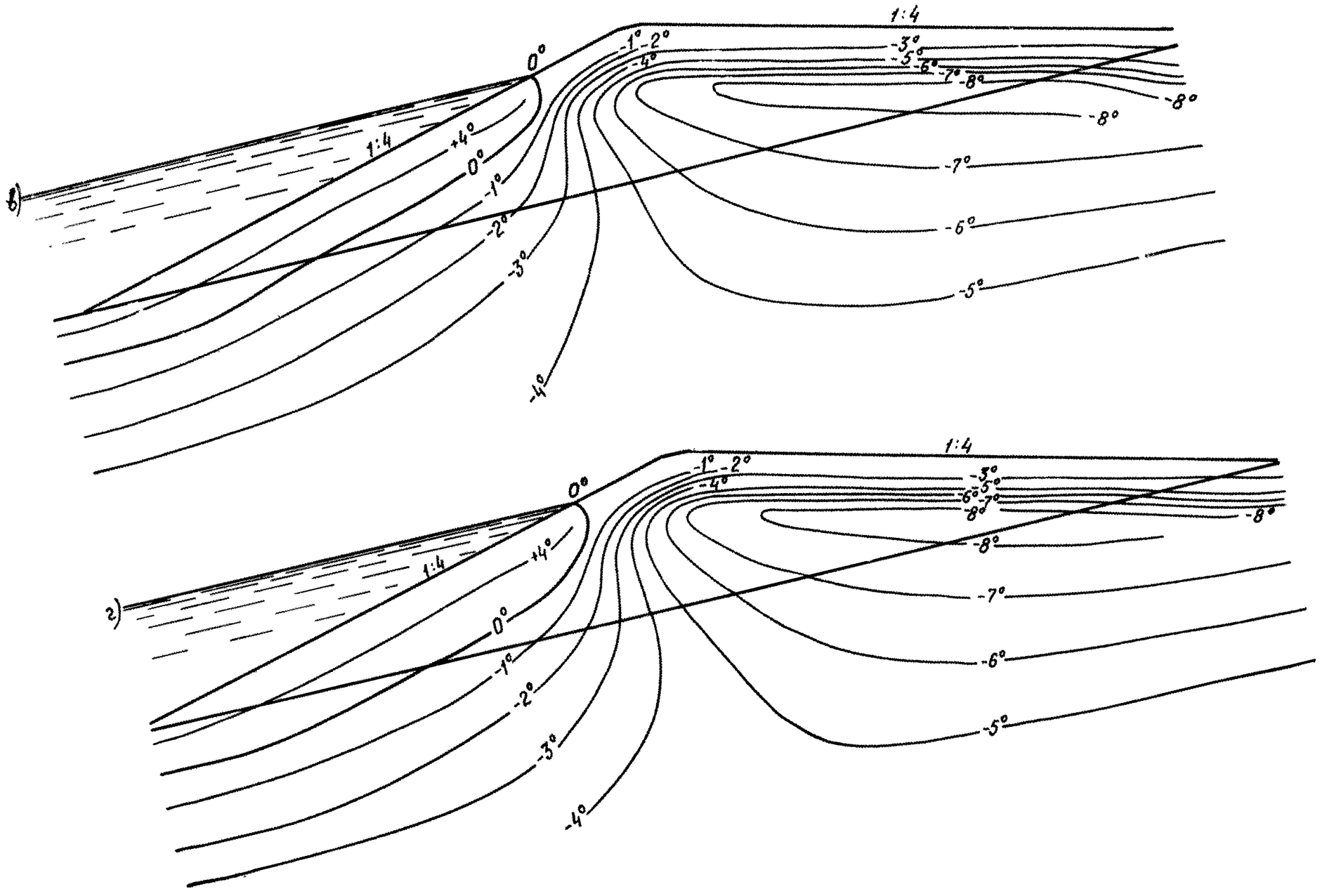
г) Плотина с откосами 1 : 6, мерзлый вариант. Начальные и граничные условия, как в задаче 3б. Продвижение нулевой изотермы — на рис. 42.

Результаты расчета аналогичны результатам п. 3б.

д) Плотина с откосами 1 : 2, талый вариант. Начальные и граничные условия близки к тем, которые рассматривались в задаче 3а. Продолжительность расчетного периода 100 лет. Передвижение нулевой изотермы в теле плотины показано на рис. 43.

На основании приведенных результатов расчетов можно сделать вывод, что предварительно промороженная плотина значительно целесообразней, так как может сразу же после возведения воспринять давление воды водохранилища. В равных условиях оба варианта плотин будут только в стационарных условиях, т. е. практически, согласно расчетам, через 50—100 лет после возведения.


a
b
1:4
1:4
0°
+4°
0°
-1°
-2°
-3°
-4°
-5°
-6°
-7°
0.03 g 15m


1:4
0°
-1°
-2°
-4°
-3°
-5°
-6°
-7°
-8°
-8°
-8°
-7°
-6°
-5°
1:4
+4°
0°
-1°
-2°
-3°
-4°
б)
1:4
0°
-1°
-2°
-4°
-3°
-5°
-6°
-7°
-8°
-8°
-8°
-7°
-6°
-5°
1:4
+4°
0°
-1°
-2°
-3°
-4°
2)

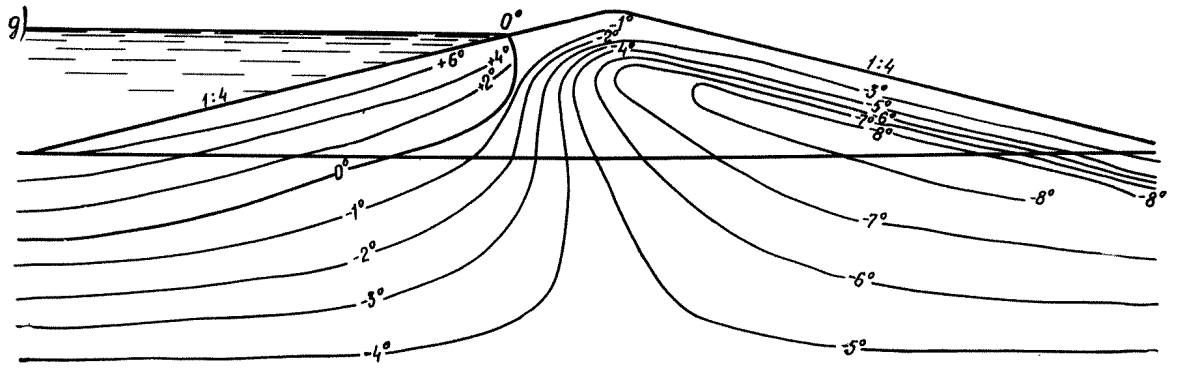


Рис. 39. Изменение во времени температурного поля в мерзлой земляной плотине с откосами 1 : 4
$t_{нач.гр}$ = —1° С; *а* — 5 лет; *б* — 10 лет; *в* — 25 лет; *г* — 50 лет; *д* — 100 лет

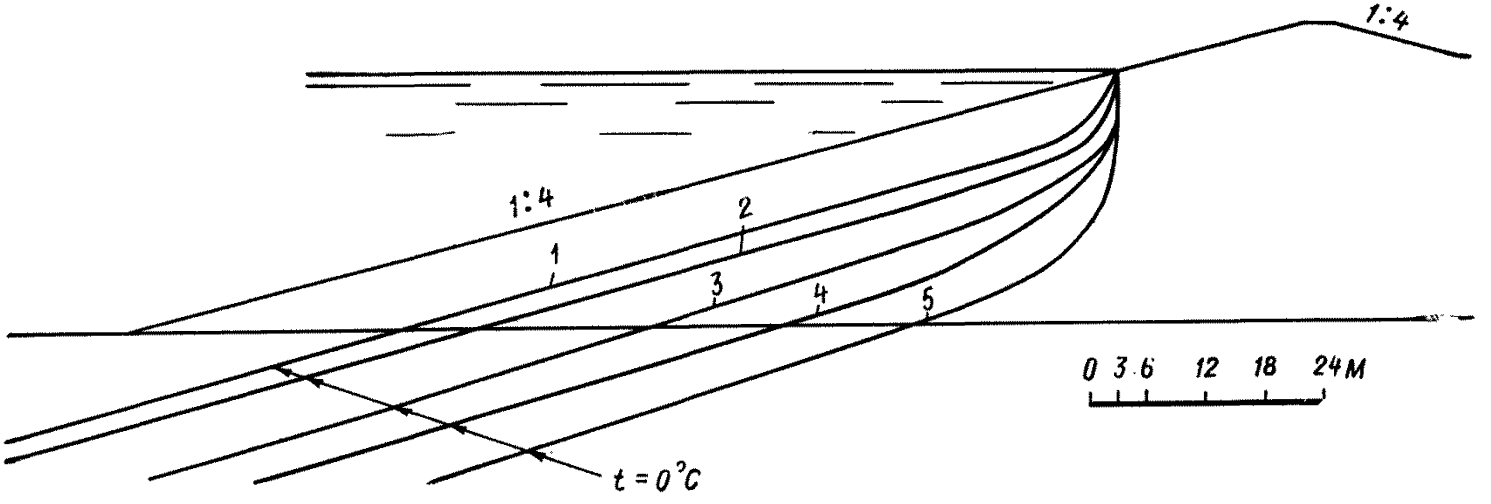


Рис. 40. Продвижение границы фазового перехода в мерзлой земляной плотине с откосами 1 : 4
$t_{нач.гр}$ = —1° С; *1* — 5 лет; *2* — 10 лет; *3* — 25 лет; *4* — 50 лет; *5* — 100 лет

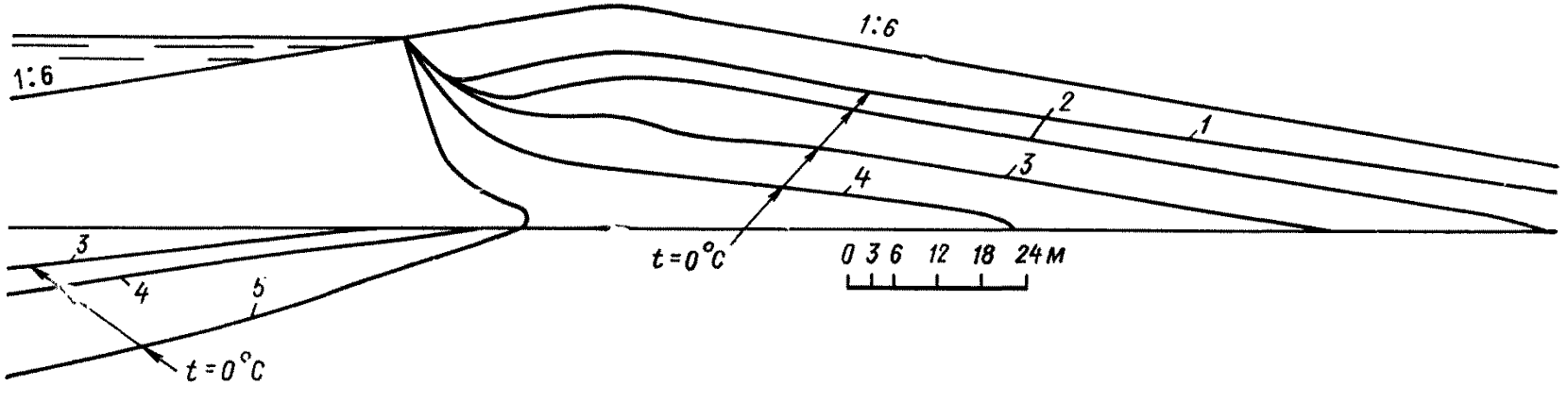


Рис. 41. Продвижение границы фазового перехода в талой земляной плотине с откосами 1 : 6
$t_{нач.гр}$ = +1° С; *1* — 5 лет; *2* — 10 лет; *3* — 25 лет; *4* — 50 лет; *5* — 100 лет

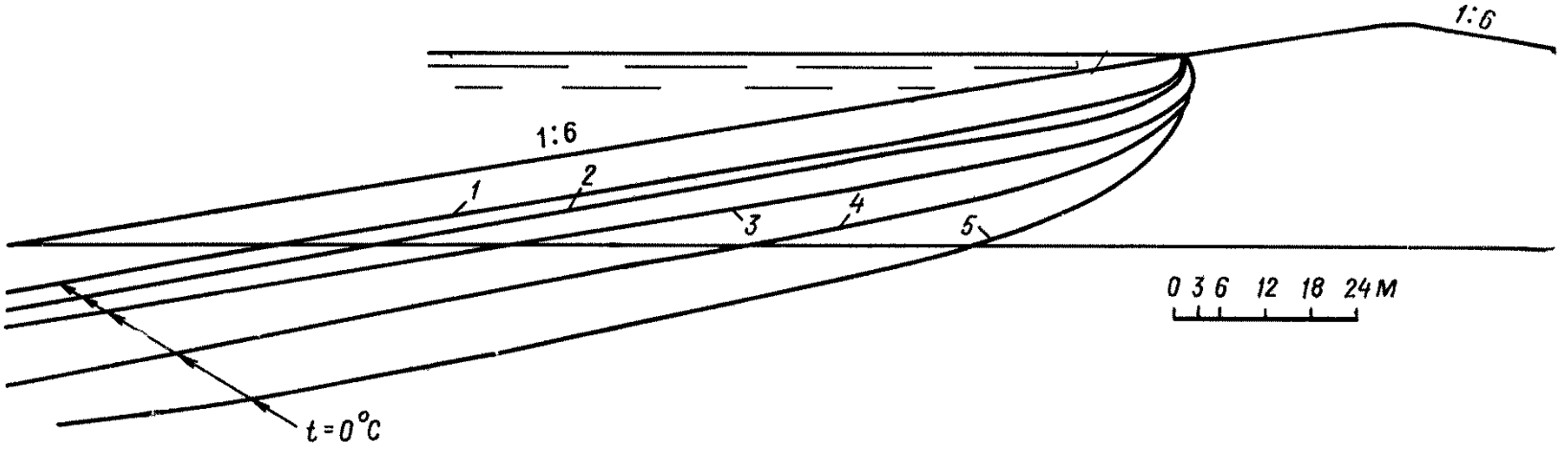


Рис. 42. Продвижение границы фазового перехода в мерзлой земляной плотине с откосами 1 : 6

$t_{нач.гр}$= —1° С; *1* — 5 лет; *2* — 10 лет; *3* — 25 лет; *4* — 50 лет; *5* — 100 лет

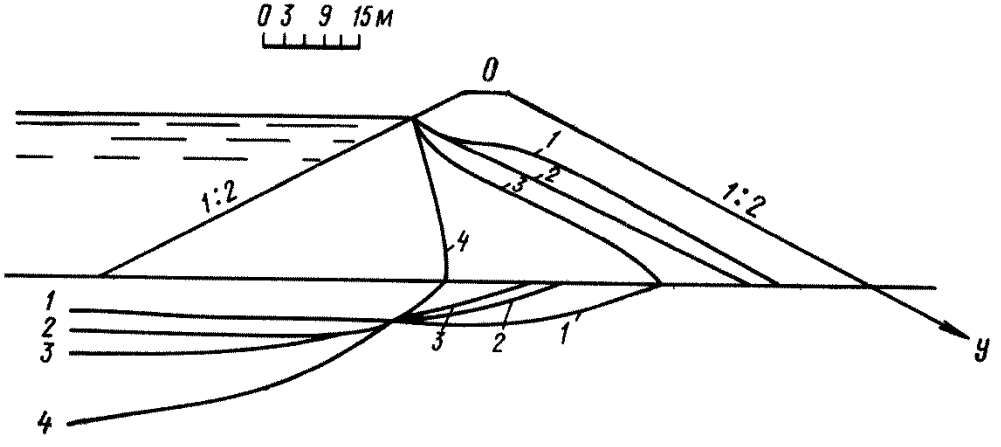


Рис. 43. Продвижение границы фазового перехода в талой земляной плотине с откосами 1 : 2

$t_{нач.гр}$= +1° С; *1* — 5 лет; *2* — 10 лет; *3* — 25 лет; *4* — 100 лет

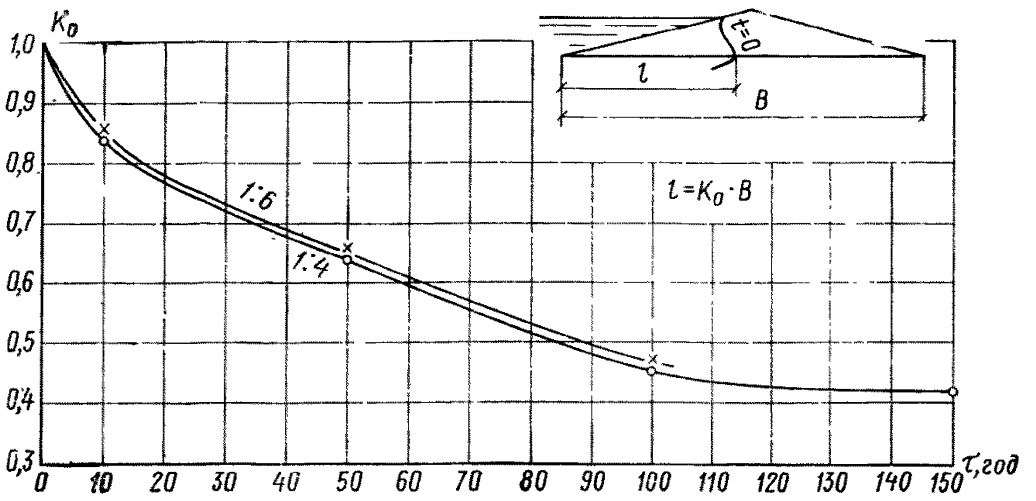


Рис. 44. Определение величины Ko для талых плотин

K_0=0,398 при заложении откосов 1 : 4 по решениям И. С. Моисеева для стационарных условий

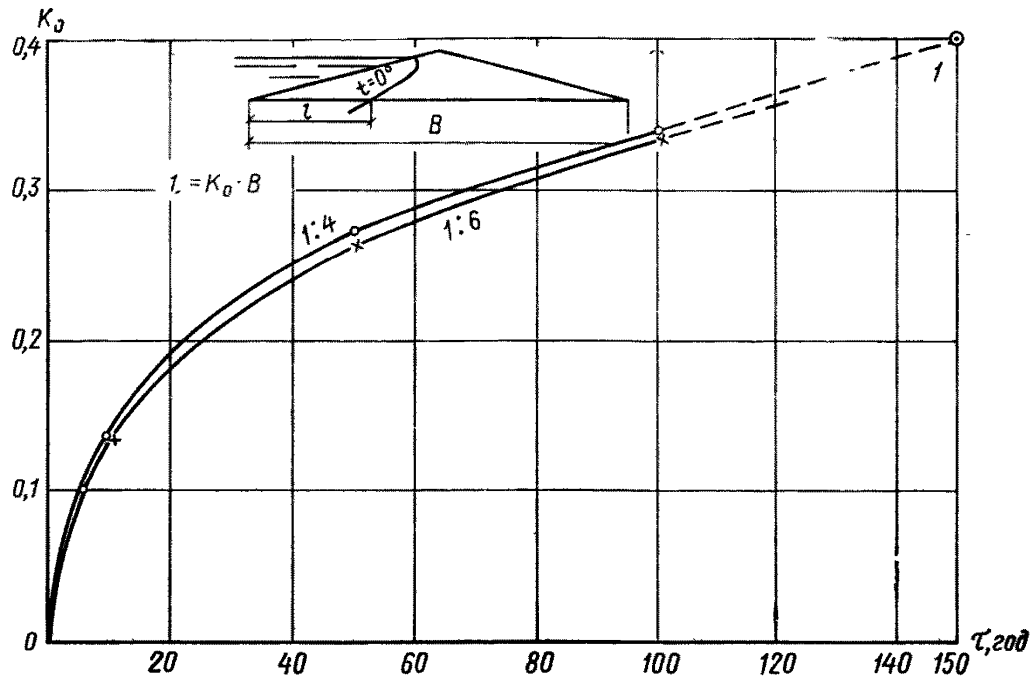


Рис. 45. Определение величины K_0 для мерзлых плотин

K_0=0,398 при заложении откосов 1 : 4 по решениям И. С. Моисеева для стационарных условий

На рис. 44, 45 на основании расчетов для однородных плотин с откосами 1 : 4, 1 : 6 построены графики изменения во времени величины K_0, являющейся отношением ширины талой зоны по основанию плотины l к полной ширине плотины B.

Расстояние l от верхового откоса плотины по основанию до границы талой и мерзлой зон находится по формуле

$$l=K_0B.$$

ПРИБЛИЖЕННАЯ ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ МЕРЗЛОТНОЙ ЗАВЕСЫ В НАЧАЛЬНЫЙ ПЕРИОД ЭКСПЛУАТАЦИИ

При проектировании мерзлой плотины следует учитывать, что промерзание низового клина за счет естественного охлаждения поверхности низового откоса и боковой холодоотдачи от мерзлотной завесы может продолжаться несколько лет (не менее 3—4), если при отсыпке грунта не осуществляется его послойное промораживание.

Ширина промороженного ядра мерзлой плотины должна быть достаточной для обеспечения устойчивости сооружения при заполнении водохранилища до полного промерзания низовой упорной призмы.

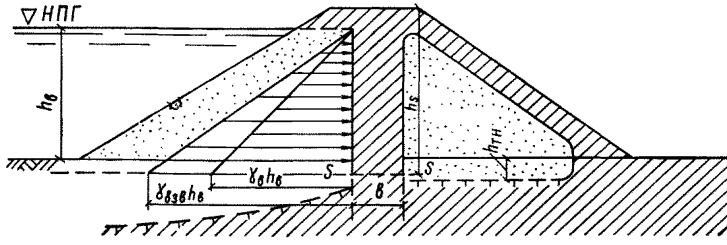


Рис. 46. Расчетная схема для определения прочности мерзлотной завесы

Расчетную оценку общей устойчивости земляной плотины с мерзлым ядром рекомендуется выполнять по приближенной схеме плоского сдвига (рис. 46) при следующих упрощениях:

ширина мерзлого ядра b постоянна по высоте плотины;

талый грунт, уложенный в тело низовой призмы, к моменту промораживания ядра до ширины b сохраняет положительную температуру в значительной части своего объема;

в основании талой зоны низовой призмы за счет ее теплосодержания происходит оттаивание льдистого вечномерзлого грунта на глубину $h_{т.н.}$;

оттаивающий льдонасыщенный грунт основания низовой призмы, находясь в переувлажненном состоянии, обладает практически нулевой сопротивляемостью сдвигу;

под влиянием тепла водохранилища или при развитии талика в строительный период к моменту достижения ядром ширины b в основании верхового клина происходит оттаивание льдистого грунта.

Угол внутреннего трения и сцепление оттаивающего грунта основания вследствие их малых значений в приближенном расчете принимаются равными нулю;

при отсыпке верхового клина из талых уплотненных грунтов боковое давление грунта на вертикальную поверхность мерзлого ядра может быть принято равным нулю, так как тепловая осадка оттаивающего основания сопровождается появлением растягивающих напряжений и осадочных трещин на контакте грунта верхового клина с напорной гранью ядра;

выше отметки НПГ ядро не испытывает бокового давления со стороны мерзлого слоя грунта на гребне;

при возведении верховой призмы из структурно неустойчивых при оттаивании мерзлых грунтов в расчете следует учитывать боковое давление переувлажненной грунтовой массы с нулевыми значениями угла внутреннего трения и сцепления;

под действием гидростатического давления воды и бокового давления взвешенного грунта верховой призмы возможен сдвиг ядра в некоторой плоскости $s—s$;

плоскость $s—s$ располагается на такой критической глубине h_s, для которой значения $\varphi_{отт}$, $C_{отт}$ оттаивающего слоя могут быть приняты равными нулю;

не обладая сцеплением с основанием вследствие равенства нулю значений $\varphi_{отт}$, $C_{отт}$ в контактном слое оттаивающего грунта подошвы, низовая упорная призма до полного своего промерзания не участвует в сопротивлении сдвигающим усилиям — боковому давлению грунта верховой призмы и гидростатическому давлению воды;

сопротивление мерзлого грунта ядра сдвигу $R^{н}_{сд}$ принимается по табл. 7 для средней расчетной температуры мерзлой стенки на глубине h_S.

Приближенная оценка устойчивости мерзлого ядра на сдвиг в плоскости $s—s$, соответствующей периоду нулевой сопротивляемости сдвигу низовой упорной призмы, может быть выполнена по следующим формулам:

а) для случая отсутствия бокового давления грунта верховой упорной призмы

$$b \geqslant \frac{\gamma_в h_в^2}{2(\gamma_м h_s + R^{н}_{сд})}; \qquad (48)$$

б) для случая одновременного воздействия гидростатического давления и бокового давления оттаявшей грунтовой массы

$$b \geqslant \frac{h_в^2(\gamma_{взв} + \gamma_в)}{2(\gamma_м h_s + R^{н}_{сд})}, \qquad (49)$$

где $\gamma_м$ — объемный вес мерзлого грунта ядра, кг/м³; $\gamma_в$ — объемный вес воды, кг/м³; $h_в$ — глубина воды, насыщающей верховой откос, м; $\gamma_{взв}$ — объемный вес взвешенного грунта верхового клина; h_s — высота мерзлого ядра над расчетной плоскостью сдвига $s—s$. Приводятся два примера расчета по определению минимальной толщины.

Пример.

Необходимо определить минимальную ширину мерзлого ядра, воспринимающего напор воды после смыкания мерзлотных цилиндров, но до промерзания низовой упорной призмы плотины.

При расчете принята положительная температура грунта низовой призмы плотины и отсутствует сопротивляемость грунтов в плоскости предполагаемого сдвига (рис. 46).

Дано:

$h_s = 30$ м;

$h_в$ — высота части ядра, воспринимающей давление воды и грунта со стороны верхнего бьефа, 25 м;

$\gamma_{взв.}$ — объемная масса взвешенного грунта верховой призмы 1,1 т/м³;

$\gamma_м$ — объемная масса мерзлого грунта ядра плотины 1,84 т/м³;
$\gamma_в$ — объемная масса воды 1 т/м³;
$R^н_{сд}$ — сопротивление мерзлого грунта сдвигу 25 т/м².

При отсутствии бокового давления грунта верховой упорной призмы

$$b \geqslant \frac{\gamma_в h_в^2}{2\left(\gamma_м h_s + R^н_{сд}\right)} = \frac{1 \cdot 2{,}5^2}{2\left(1{,}84 \cdot 30 + 25\right)} = 3{,}9 \text{ м}.$$

При одновременном воздействии гидростатического давления и бокового давления грунтовой массы

$$b \geqslant \frac{h_в^2\left(\gamma_{взв} + \gamma_в\right)}{2\left(\gamma_м h_s + R^н_{сд}\right)} = \frac{2{,}5^2\left(1{,}1 + 1\right)}{2\left(1{,}84 \cdot 30 + 25\right)} = 8{,}16 \text{ м}.$$

ПРИЛОЖЕНИЕ 6

БОРЬБА С РАЗРУШЕНИЕМ ЛЬДИСТЫХ БЕРЕГОВ ВОДОХРАНИЛИЩА

При строительстве водохранилищ в речных долинах, сложенных рыхлыми льдонасыщенными породами с включениями подземных льдов и признаками их естественного вытаивания, необходимо выполнение комплекса мероприятий, предотвращающих их дальнейшее вытаивание и разрушение берегов в зонах врезки плотины в борта долины и вблизи существующих сооружений.

Интенсивность оттаивания обнаженных клиновидных и других подземных ледяных тел превосходит интенсивность оттаивания вмещающего их грунта. В отличие от грунта тающее под водой ледяное тело не создает ни теплоизоляционного, ни светового экрана над мерзлыми грунтами ложа. Небольшие водоемы в суровых условиях арктической тундры накапливают за лето больше тепла, чем теряют за зиму; начиная с глубины 1,4—1,6 м, летнее оттаивание дна превышает его зимнее промерзание, усиливается общий прогрев мерзлоты и начинается прогрессирующее развитие талика в сочетании с оттаиванием и размывом льдистых берегов.

С увеличением зеркала водохранилища переработка его берегов резко ускоряется за счет усиления волнового воздействия. Волны постоянно смывают оттаявший грунт, обнажаются льды в береговом обрыве, берег подтаивает и на уровне воды подрезается глубокими (до 7—10 м) нишами. Обрушенные блоки мерзлого грунта, достигающие 0,5—0,7 км в длину, через один-два месяца полностью размываются. Высокий и наиболее подверженный термоабразии льдонасыщенный берег непрерывно отступает со скоростью до 10 м/год (в отдельных случаях эта величина может достигать 15—20 м/год по всему периметру).

Теплозащитный слой, приостанавливающий процесс переработки берегов и сквозное протаивание крупных ледяных включений в береговых примыканиях плотин, может быть создан двумя способами:

а) путем отсыпки, уплотнения и защиты от размыва слоя слабофильтрующего грунта, являющегося одновременно противофильтрационным экраном;

б) путем временной (1—2 года) эксплуатации водохранилища с повышенными отметками уровня по сравнению с нормальным подпорным уровнем. В этом случае после оттаивания льдов, переработки начальной береговой линии и уплотнения грунтов по периметру водохранилища образуется шлейф талых грунтов, устойчивых к действию воды и защищающих льдистый берег от дальнейшего протаивания и разрушения.

Отсыпанный или образованный путем естественного оттаивания теплозащитный слой может быть защищен от волнового разрушения отсыпкой скелетного грунта и каменной пригрузкой. При этом следует учитывать и разрушающее воздействие ледяных полей.

Укрепление льдонасыщенных берегов плитами или каменной наброской без устройства теплоизолирующего грунтового слоя неэффективно. Для устройства такой теплоизоляции могут быть использованы маловлажные талые грунты, залегающие в ложе мелководных молодых термокарстовых озер, предварительно осушенных с помощью простейших отводных канав, и другие грунты, содержащие достаточное (не менее 20%) количество мелкозема (частиц $d<2$ мм).

Отступание подводного льдонасыщенного уступа берегового склона при условии, что оттаявший грунт достаточно быстро оплывает и слабо влияет на теплообмен между стенкой мерзлого грунта и водой, можно определить по формуле

$$L=\frac{\alpha t_1 \tau}{\rho W \cdot 0{,}9}, \tag{50}$$

где L — величина отступания берега в процессе оттаивания и термоабразии, начиная с момента завершения тепловой осадки ложа водохранилища, при полном вытаивании подземных льдов под ним, м;

ρ — скрытая теплота фазового перехода влажного грунта (80 тыс. ккал/м^3 $\approx$ 320 МДж/м^3);

W — объемная льдистость мерзлых пород берегового склона, включающих и погребенные льды, доли единицы;

α — коэффициент теплоотдачи при свободной конвекции воды у вертикальной изолированной сверху льдогрунтовой стенки, ккал/м^2×ч•град;

τ — время, ч;

t_1 — средняя температура воды, °С.

Механическое (волновое) разрушение оттаивающего берега формулой (50) не учитывается.

Возможность неограниченного термоабразионного отступания льдонасыщенного берега (рис. 47) определяется по формуле

$$H_{\text{разр}} < h-\eta h, \tag{51}$$

где $H_{\text{разр}}$ — высота льдистого берега над уровнем воды;

h — мощность слоя грунта, вмещающего льды;

η — относительная высота этого слоя после вытаивания льда.

При наличии в районе строительства плотины термокарстовых озер возможность стабилизации высокольдистого берега при образовании водохранилища (рис. 48) определяется по формуле

$$H_{\text{стаб}} \geqslant h-\eta h; \tag{52}$$

$$\eta=\frac{h-(H+h_0)}{h}, \tag{53}$$

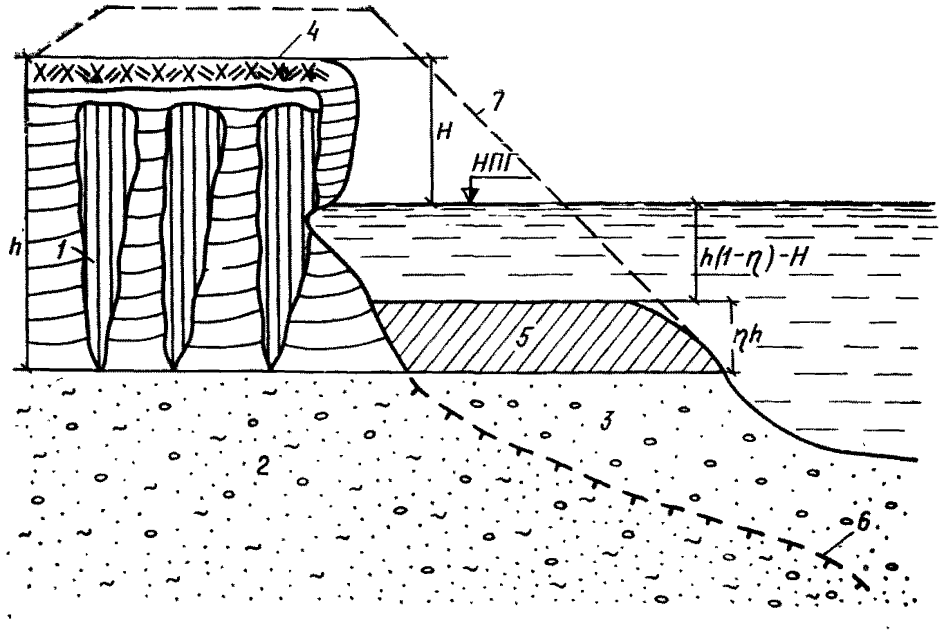


Рис. 47. Схема непрерывно разрушающегося берега с включениями мощных погребенных льдов

1 — сильно просадочные иловатые грунты с включениями чистого льда; *2* — малольдистые вечномерзлые грунты; *3* — оттаявшие малопросадочные грунты; *4* — грунты деятельного слоя; *5* — отложения грунта после вытаивания ледяных включений; *6* — граница вечной мерзлоты; *7* — ориентировочный контур отсыпки, необходимой для защиты берега от разрушения

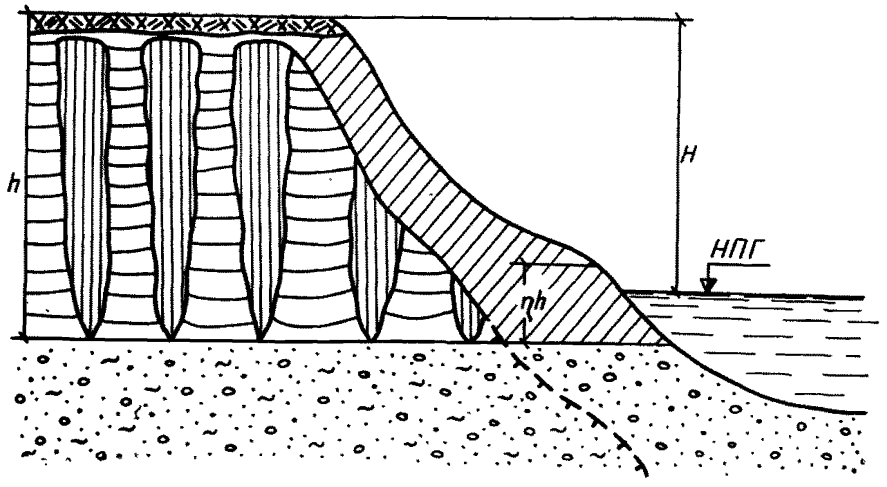


Рис. 48. Схема формирования стабильного берега водохранилища в районах развития мощных погребенных льдов (обозначения те же, что на рис. 47)

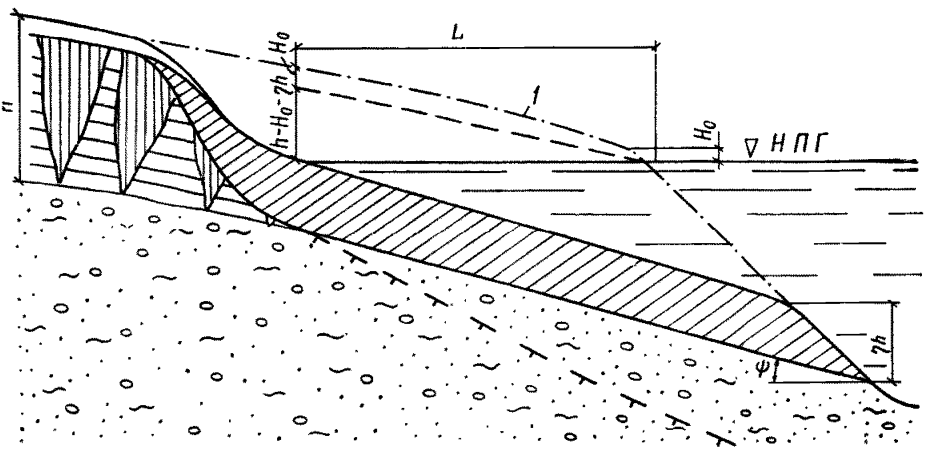


Рис. 49. Схема к расчету продвижения L уреза воды до стабильного положения берега водохранилища при подошве слоя грунта с ледяными включениями, наклоненной под углом ψ к горизонту

1 — начальное очертание берега

где h_0 — глубина термокарстового озера-аналога;

H — превышение поверхности грунта, вмещающего льды, над поверхностью воды в этом озере.

Неограниченно отступающий льдовмещающий берег может быть защищен от термоабразии слоем грунта с минимальной высотой

$$h_{\text{защ}} = h - H - \eta h, \tag{54}$$

показанным пунктиром на рис. 47.

От размыва вследствие изменений уровня воды и волнения в водохранилище этот слой должен быть защищен обратным фильтром и защитным слоем крупнообломочного грунта с учетом возможного навала ледяных полей.

При разрушении берега по схеме рис. 49 максимальная величина отступания берега L может быть определена по формуле

$$L = \frac{h - H_0 - \eta h}{\operatorname{tg} \psi}, \tag{55}$$

где H_0 — начальное превышение льдистого берега над НПГ, м;

ψ — угол наклона подошвы слоя грунта, вмещающего погребенные льды.

Продвижение уреза воды в сторону такого берега может быть остановлено отсыпкой защитного слоя еще до наступления равновесного состояния.

БОРЬБА С ПУЧЕНИЕМ И МОРОЗОБОЙНЫМ ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЕМ

При проектировании плотин в районах Крайнего Севера рекомендуется учитывать следующие опасные проявления морозного пучения:

а) пучение связных грунтов при промерзании в ходе послойной зимней укладки;

б) пучение в пределах сезонноотаивающего слоя на гребне и откосах плотины при многократном замерзании и оттаивании в период эксплуатации (без теплозащитного слоя или при недостаточной его толщине);

в) пучение оснований при производстве работ по возведению плотины и в эксплуатационный период (у подошвы и примыканий плотины).

Эффективное снижение вредного влияния пучения при однократном промораживании талого связного грунта в процессе зимней укладки в тело плотины достигается переуплотнением грунта свыше максимальной стандартной плотности. Следует учитывать, что при многократном промерзании—оттаивании за счет пучения происходит постепенное разуплотнение и переувлажнение грунта, снижающее его прочность и водоупорные свойства. Некоторое уменьшение пучения достигается при снижении начальной влажности до значений, близких к пределу раскатывания $W_р$. Наличие крупнообломочных включений в количестве 50% по весу снижает пучение в 1,5—2 раза, хотя оно и не обеспечивает долговечной противопучинной стабилизации грунта. Достаточно эффективным средством снижения пучения является пригрузка из непучинистого грунта толщиной до 2,5—3 м (рекомендации п. 5.46). В талых плотинах для предотвращения пучения в зоне сезонного промерзания—оттаивания может быть использовано засоление грунта на $^2/_3$ глубины этой зоны солями NaCl, $CaCl_2$ и KCl. Противопучинное засоление является достаточно устойчивым мероприятием, срок действия которого измеряется не менее чем 40—50 циклами замерзания—оттаивания.

Морозобойные трещины образуются вследствие сильного охлаждения зимой поверхности мерзлого грунта, и образуют сетку, близкую к прямоугольной, с расстоянием между противоположными трещинами-сторонами в пределах 5—25 м. Блоки, ограниченные трещинами, обычно называют «полигонами». Глубина морозобойной трещины может составлять от нескольких десятков сантиметров до нескольких метров. Возможность зарождения морозобойной трещины может быть предсказана по комплексу характеристик верхнего 1,5-метрового слоя грунта. Морозобойные трещины могут возникать в мелкозернистых песчаных и глинистых грунтах при определенной влажности. Если суммарная (льдистость+незамерзшая вода) влажность в поверхностном слое массива меньше утроенной влажности любого из 0,2-метровых слоев внутри верхнего 1,5-метрового слоя, то образование морозобойных трещин возможно только с поверхности. Если же влажность верхнего слоя больше утроенной влажности какой-либо из внутренних прослоек 1,5-метрового слоя грунта, то зарождение морозобойной трещины может произойти и внутри этого слоя. Отсыпка теплозащитного слоя толщиной 1,5 м и более из грунта с большим содержанием крупных частиц ($d \geqslant 2$ мм более 70%), но не содержащим пылеватых частиц ($d \leqslant 0{,}05$ мм) и большого количества крупных пустот практически исключает возможность образования морозобойных трещин. Выполнение рекомендаций по защите плотин от пучения автоматически обеспечивает защиту их и от образования морозобойных трещин.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 1
1. Общие положения 3
2. Требования к изысканиям 4
3. Опытные работы и исследования 7
4. Выбор типа и створа плотины. Компоновка гидроузла . . 9
5. Требования к конструкциям плотин 12
Мерзлые плотины 12
Талые плотины 21
6. Требования к водосбросным сооружениям 30
7. Производство работ 32
Подготовительные работы 32
Подготовка основания 32
Разработка карьеров и подготовка грунта к укладке . . . 34
Укладка грунта в плотину 37
Организация работ 40
8. Геотехнический контроль 40
9. Состав расчетов 42
10. Натурные наблюдения 46
Приложение 1. Прочностные, деформативные и теплофизические характеристики мерзлых, промерзающих и оттаивающих грунтов 49
Приложение 2. Теплотехнические расчеты тела плотин, основания и дна водохранилища 59
Приложение 3. Примеры приближенных расчетов температурного режима тела плотины, ее основания и дна водохранилища 79
Приложение 4. Теплотехнические расчеты нестационарного температурного режима однородной нефильтрующей земляной плотины на ЭВМ 91
Приложение 5. Приближенная оценка прочности мерзлотной завесы в начальный период эксплуатации . . . 106
Приложение 6. Борьба с разрушением льдистых берегов водохранилища 108
Приложение 7. Борьба с пучением и морозобойным трещинообразованием 112