Библиотека СОК

ИНЖЕНЕРНЫЕ КОММУНИКАЦИИ НА ВЕЧНОМЁРЗЛЫХ ГРУНТАХ

А.Л. АСТРЕБОВ

А. Л. ЯСТРЕБОВ
Канд. техн. наук

А, 139
В, 239

ИНЖЕНЕРНЫЕ КОММУНИКАЦИИ НА ВЕЧНОМЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ

ИЗДАТЕЛЬСТВО ЛИТЕРАТУРЫ ПО СТРОИТЕЛЬСТВУ, ЛЕНИНГРАД 1972

УДК 625.78:624.139

В книге излагаются способы прокладки и конструкции сетей водоснабжения, теплоснабжения, канализации, а также магистральных нефте- и газопроводов в условиях залегания вечномерзлых грунтов. Дается методика тепловых расчетов трубопроводов и расчета опор и оснований инженерных коммуникаций в различных мерзлотно-грунтовых условиях. Теория расчетов иллюстрируется примерами из современной практики проектирования.

Книга является практическим пособием и предназначена для инженеров, занятых проектированием гражданских, промышленных и транспортных объектов строительства на Крайнем Севере.

3-2-6
59-72

Глава первая

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИНЖЕНЕРНЫХ КОММУНИКАЦИЯХ НА ВЕЧНОМЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ

§ 1. Санитарно-техническое обеспечение населенных мест Крайнего Севера

Согласно современным требованиям к благоустройству населенных мест Крайнего Севера, в каждом городе или поселке необходимо иметь центральное отопление, хозяйственно-питьевое и горячее водоснабжение и централизованную канализацию. Устройство вместо водопровода в домах водоразборных колонок на улице, а вместо канализации — люфт-клозетов и отдельно стоящих выгребов, считается недопустимым как из-за сурового климата, так и залегания вечномерзлых грунтов, при которых водоупорный слой мерзлого грунта находится близко к поверхности земли. Эти требования, преследующие цель улучшить условия жизни в северных поселениях и не допустить возникновения эпидемических заболеваний, далеко не всегда выполняются.

Отопление. Проблема простой и экономичной системы отопления — одна из важнейших на Крайнем Севере. Годовая потребность в топливе для отопления зданий в 2,5—3 раза больше, чем в местностях с умеренным климатом, а доставка топлива в отдаленные места Крайнего Севера обходится в 5—10 раз дороже.

Города и крупные поселки зарубежного Крайнего Севера имеют централизованное отопление, но к сетям теплоснабжения подключаются только общественные, административные здания и жилые дома административных служащих. Туземное же население и в этих городах пользуется местным отоплением.

В Советском Союзе все города и поселки, возникшие на Крайнем Севере с 40-х годов, обеспечены центральной системой отопления, к которой подключено большинство зданий.

Однако это еще не говорит о том, что у нас в этом вопросе все благополучно. Во многих случаях системы отопления решены крайне неэкономично, так как приходится иметь по нескольку десятков котельных даже в незначительных по количеству населения поселках.

При одной центральной котельной трудно менять режим работы отопительной системы в связи с расширением поселка и ростом числа потребителей. Распределительная сеть отопления в условиях залегания вечномерзлых грунтов дорога и в строительстве, и в эксплуатации. Велики и непроизводительные потери тепла из-за сурового климата.

Электрическое отопление могло бы широко использоваться на Крайнем Севере, если бы не некоторые экономические соображения: дизельный генератор (преимущественный источник электроэнергии в северных поселениях) превращает в электрическую энергию лишь $^1/_3$ тепла, заключающегося в жидком топливе, в то время как, скажем, нефтяной обогреватель отдает около $^2/_3$ содержащейся в топливе тепловой энергии. Однако для условий Крайнего Севера такой расчет является односторонним, так как не учитываются сложность прокладки и повышенные эксплуатационные расходы тепловых сетей в условиях вечномерзлых грунтов.

Водоснабжение. Использование грунтовых вод для водоснабжения в области вечномерзлых грунтов имеет ограниченные пределы. Надмерзлотные воды, находящиеся над слоем вечномерзлой толщи грунтов, обычно непригодны для использования в зимнее время, когда слой грунта с поверхности промерзает и сливается с вечномерзлой толщей грунтов. К тому же, надмерзлотные воды загрязнены и не удовлетворяют санитарным требованиям. Подмерзлотные воды из водоносных слоев, залегающих под слоем вечномерзлых грунтов, могут быть использованы для водоснабжения. Но источник этот трудно обнаружить при изысканиях, а эксплуатировать дорого, особенно при глубоком залегании вечномерзлой толщи. В большинстве случаев подмерзлотные воды содержат нежелательные органические включения, а также железистые и марганцевые примеси.

Скважины в мерзлых грунтах пробуриваются сравнительно легко, но в большинстве случаев требуют непрерывной откачки воды или в той или иной форме подключения добавочного тепла, чтобы скважина не замерзала. Такой метод водоснабжения применяется в Фэрбенксе (Аляска).

Поверхностные воды в виде озер и небольших рек также могут использоваться для водоснабжения, но для этого они должны иметь глубину не менее 3 *м*, чтобы служить круглогодично. Ледяной покров оказывает сильное влияние на запас воды и ее качество. Минеральные и органические примеси в воде при замерзании водохранилища скапливаются в нижних, незамерзших, слоях и делают воду не пригодной для питьевых и производственных нужд.

Водоснабжение из крупных рек осложняется не только глубоким их промерзанием, но и тем обстоятельством, что водозаборные сооружения забиваются шугой и донным льдом. Засорение приемных устройств льдом уменьшают путем сооружения заборных резервуаров (ковшей). С помощью подачи пара или электрообогрева можно повысить температуру воды и предохранить водозаборные сооружения от обледенения.

Для круглогодичного получения воды из непостоянно действующих источников в ряде поселков и на военных базах Аляски сооружаются резервуары для хранения воды в таком количестве, чтобы ее хватило на весь период замерзания источника. Примером может служить резервуар, построенный в поселке Коцебу (Аляска)*. Как только температура воды в резервуаре понижается до 4,4° С, автоматически включается циркуляционный насос, перемешивающий слои воды, что предохраняет от образования ледяной корки в резервуаре. При температуре 5° С насос автоматически отключается. Если температура воды падает до 2° С, то автоматически начинает работать электрический обогреватель, прекращающий свою работу, как только вода достигает 3° С.

Главные трудности в обработке воды на Крайнем Севере возникают из-за ее низкой температуры. Повышенная вязкость воды и замедленность химических реакций требуют изменения обычных стандартных процессов. Аэрация, фильтрация, осаждение осадков и смешение с химикалиями протекают в замедленном темпе при низких температурах в результате изменения физических, химических и биологических свойств воды. Поэтому необходимо увеличивать время на смешение, аэрацию и подобные операции, иметь более вместительные камеры и добавлять химикалии в больших процентах.

Местная канализация. За исключением крупных городов и поселков, все населенные места Крайнего Севера обходятся примитивной местной канализацией с выгребами.

Известный шаг вперед по сравнению с обычными выгребами представляют собой туалеты, где в сборники нечистот добавляются по мере надобности химикалии. Однако такие устройства не нашли широкого применения главным образом из-за сравнительно высокой стоимости химикалий.

Септиктенки применяются, но без особого успеха. В одних случаях сборники сточных вод обогревают для предохранения от замерзания и поддержания необходимой температуры, при которой имеет место воздействие аэробных бактерий,

---

* J. B. Cohen, B. E. Benson. Arctic water storage. «Journal of the American Water Works Association», vol. 60, № 3, 1968.

в других — ограничиваются просто теплоизоляцией сборников, иногда очень примитивной — засыпкой снегом. Более удовлетворительным решением является помещение сборников в самих отапливаемых зданиях. Удаление содержимого септиктенков все же представляет собой серьезную проблему, так как процесс перегнивания в них не уничтожает вредных бактерий, могущих послужить причиной возникновения эпидемических заболеваний.

Рядом промышленных фирм и научно-исследовательских организаций в США и Канаде за последние годы разработаны более совершенные системы местной канализации для поселений Крайнего Севера *, которые еще находятся в стадии опытной эксплуатации и широкого распространения не получили.

Одна из новых систем местной канализации основана на удалении сточных вод при помощи маловязкого жидкого топлива с температурой застывания — 60° С. В этой системе применяются нестандартные унитазы и арматура. Промывка жидким топливом производится с помощью насоса, действующего по принципу соленоида. Под каждым унитазом устанавливается дробилка, способная измельчать отбросы до частиц диаметром 1,6 *мм*. Получившийся шлам по трубопроводам транспортируется к форсункам котельной, где и сжигается. Котел применяется водотрубный с огневой топкой. При мощности 100 *л. с.* он сжигает за день около 150 *кг* сточного шлама от обслуживания туалета на 100 человек. Тепло, генерируемое в процессе сжигания, может быть использовано для различных нужд. Такая система находится в эксплуатации на одной из военных баз и работает успешно.

Другая система, получившая название «электрического туалета», была установлена в Пойнт-Бэрроу на Аляске в 1963 г. Туалет построен наподобие обычного ватерклозета с верхней приемной частью (унитазом), отделенной от нижней части вращающейся задвижкой. В нижней части размещена выдвижная камера сгорания, работающая или на естественном, или на сжиженном газе, доставляемом в баллонах. Всасывающая сила создается воздуходувкой, работающей, как и все управление системой, от электрической сети переменного тока напряжения 110—115 *в*. Предварительно при пользовании туалетом в унитаз вкладывается пластмассовый мешок, который плотно удерживается по стенкам унитаза за счет отсоса воздуха, создаваемого вентилятором. После использования прибора закрывается верхняя крышка унитаза, нажимается кнопка опорожняющего механизма и мешок с содержимым падает в нижнюю камеру, где и сгорает. Система себя вначале не оправдала, так как отверстие между унитазом и камерой сгорания часто засорялось мешками. Фирма, изготовляющая такие приборы, разработала улучшенную систему без необходимости использовать пластмассовые мешки. Последняя испытывается с 1965 г. в одном из зданий Бэрроу-Виллидж.

Третья система, с успехом применяемая в одной из школ на севере Канады (в Кейп-Дорсет, Северо-Западные территории), относится к типу замкнутых канализационных систем. Сточные воды собираются в резервуар, расположенный непосредственно в самом здании школы, где и подвергаются аэробному разложению. Существенными элементами системы, кроме самого резервуара, является компрессор для аэрации сточных вод в сборном резервуаре и циркуляционный насос для промывки туалетных приборов. Туалеты применяются дробильного типа, истирающие твердые осадки сточных вод для более эффективной их обработки аэрацией. Дробилка может приводиться в действие электроэнергией от осветительной сети или напорным давлением водопроводной сети, подающей воду в промывочные баки. Обработанный сток из резервуара используется снова для промывки унитазов путем рециркуляции его в промывочные бачки.

При такой замкнутой системе из резервуара необходимо удалять лишь твердый осадок, который может накапливаться там в течение продолжительного времени, так как его остается незначительное количество. Преимущества таких систем заключаются в очень высокой степени обработки сточных вод, дающей более благоприятные результаты, чем при обычных способах обработки на традиционных очистных сооружениях, в большой экономии воды и в отсутствии наружных канализационных трубопроводов, которые трудно предохранять от промерзания. Биологическое разложение осадка в этой системе настолько эффективно, что всякий неприятный запах устраняется.

Централизованная канализация. В городах и крупных поселках Крайнего Севера нельзя обойтись без сооружения централизованной канализации, хотя далеко еще не во всех таких населенных местах прокладывается сеть трубопроводов для приема и отвода сточных вод. Одним из серьезных вопросов при устройстве системы централизованной канализации является обработка и очистка сточных вод.

Санитарно-технические коммуникации. Низкие температуры наружного воздуха и отрицательная температура толщи мерзлых грунтов вынуждают при любом способе прокладки трубопроводов распределительных сетей (в грунте или на поверхности) принимать меры против замерзания транспортируемых жидкостей. Для этой цели используется

* W. L. Boyd, J. W. Boyd. Water supply and sewage disposal developments in the Far North. «Journal of the American Water Works Association», vol. 57, № 7, 1965.

термоизоляция труб, принимаются меры к обеспечению непрерывного движения жидкости по трубопроводам и применяют подогрев жидкостей. Последний осуществляется различными способами: электроподогревом, пропуском воды через различного рода бойлеры или через конденсаторы паровых турбин ТЭЦ и т. п.

Вечномерзлые грунты заставляют обращать особое внимание на устойчивость инженерных сетей, равно как и на устойчивость расположенных близко от подземных трубопроводов зданий и других сооружений.

Мерзлые грунты, являясь основанием для трубопроводов или санитарно-технических каналов, будут оттаивать с поверхности в теплый период года, причем глубина оттаивания за счет дополнительного тепла, выделяемого трубопроводами, окажется больше, чем слой сезонного оттаивания в условиях естественного залегания. Если при этом грунты льдонасыщенные, то неизбежно возникнут деформации конструкций инженерных сетей, что повлечет за собой расстройство стыковых соединений, нарушение тепло-, гидроизоляции и пр. Дополнительное оттаивание мерзлой толщи грунтов от действия тепла, выделяемого трубопроводами, может неблагоприятным образом повлиять на фундаменты близрасположенных зданий, построенных с учетом сохранения мерзлого состояния грунтов в их основании. Верхняя граница вечномерзлой толщи грунтов понизится, фундаменты окажутся заглубленными на недостаточную глубину в мерзлый грунт, могут не выдержать передаваемой на них нагрузки и дадут непредусмотренную расчетом осадку.

Для предотвращения недопустимых осадок инженерных коммуникаций в случае оттаивания под ними мерзлых грунтов принимаются соответствующие меры, к которым относятся: усиленная термоизоляция трубопроводов, замена в основании трубопроводов льдонасыщенных грунтов грунтами малосжимаемыми при оттаивании, устройство свайных оснований под инженерными сетями и искусственное промораживание грунтов в основании подземных каналов.

§ 2. Способы прокладки инженерных коммуникаций

В районах залегания вечномерзлых грунтов применяются четыре способа прокладки инженерных коммуникаций: подземная с укладкой трубопроводов в слое сезонного протаивания или в вечномерзлой толще грунтов; наземная, когда трубопроводы укладываются на поверхности земли в невысоких насыпях, надземная с прокладкой трубопровода на низких опорах и воздушная, при которой трубопроводы укладываются на отдельных высоких опорах или эстакадах.

Применение того или иного способа прокладки инженерных коммуникаций зависит от многих условий: от характера застройки, от вида залегающих грунтов, рельефа местности и, наконец, от назначения трубопровода. Поэтому вопрос о том, как прокладывать инженерные сети, может быть решен только на основе тщательного изучения местных условий и технико-экономического сравнения вариантов с учетом стоимости строительства и расходов на эксплуатацию и ремонт сетей.

При выборе способа прокладки необходимо принимать во внимание способность мерзлых грунтов давать осадки при оттаивании. В этом отношении вечномерзлые грунты удобно делить на категории (табл. 1), как это принято сейчас при проектировании магистральных трубопроводов, а также автомобильных и железных дорог *.

Таблица 1

Строительная классификация мерзлых грунтов

Наименование и состав грунтов	Влажность мерзлого грунта в %		
	I категория (грунты непросадочные)	II категория (грунты малопросадочные)	III категория (грунты просадочные)
Гравийно-галечные и щебенисто-дресвяные с примесью:			
песка	Менее 5—9	9—15	Более 15
супеси или суглинка до 25%	» 9—13	13—17	» 17
супеси или суглинка до 50%	» 11—16	16—20	» 20
Пески	» 15—17	15—25	» 25
Супеси:			
легкие	» 11—13	13—23	» 23
тяжелые	» 14—16	16—25	» 25
Суглинки:			
легкие и средние	» 17—20	20—28	» 28
тяжелые	» 21—23	23—35	» 35
Глины	» 25	25—40	» 40

К IV категории следует относить все грунты, содержащие подземный лед с толщиной слоев более 10 *см*, залегающий в верхних горизонтах.

При неблагоприятных мерзлотно-грунтовых условиях (грунты III и IV категорий) на площадке строительства или

* С точки зрения мерзлотоведов термин «просадочные грунты» неправилен и надо говорить не о «просадке», а о «сжатии грунта при оттаивании». Однако в данной классификации сохранена старая терминология, как укоренившаяся в строительной практике, подобно «вечномерзлым», а не «многолетнемерзлым» грунтам».

по трассе магистрального трубопровода следует изыскать все возможности для избежания прокладки труб в земле. Наоборот, в непросадочных и малопросадочных при оттаивании грунтах I и II категорий подземная прокладка может быть широко использована при любых прочих условиях.

Сети водопровода как напорные и имеющие сравнительно невысокую температуру воды в трубах можно прокладывать и в грунтах, и по поверхности земли. Канализационные сети могут быть как надземные, так и подземные. Однако в пределах застройки надземная прокладка канализационных труб нежелательна по санитарно-гигиеническим соображениям. Кроме того, во многих случаях рельеф местности не позволяет осуществлять надземную прокладку канализационной сети без устройства станций перекачки.

Тепловые сети из-за высокой температуры теплоносителя особенно неблагоприятно воздействуют на вечномерзлые грунты, образуя большой талик в зоне подземной прокладки теплотрассы. Поэтому подземная прокладка их даже в грунтах II категории нежелательна. Тепловые сети рекомендуется, как правило, укладывать по поверхности на отдельных опорах или эстакаде или же укладывать их в подземных вентилируемых каналах, охлаждая последние в зимнее время наружным морозным воздухом.

Прокладка санитарно-технических коммуникаций может осуществляться как раздельно (раздельная или одиночная прокладка), когда сети водопровода, канализации и теплоснабжения идут по отдельным самостоятельным трассам, так и совместно на одних и тех же опорах или в общем канале. Каналы при совместной прокладке применяются трех типов: непроходные, полупроходные и проходные.

Наиболее часто при совместной прокладке водопровод укладывается в одном канале с теплопроводами (а при бесканальной прокладке — в одной общей теплоизоляции) для предохранения водопровода от замерзания (тепловое сопровождение) с тем, чтобы избежать дополнительных расходов, связанных с подогревом воды. Недостатком такого способа является перегрев воды в часы минимального водоразбора, поэтому применять этот способ прокладки на большом протяжении нежелательно. В одном канале или в общей термоизоляции с теплопроводами можно прокладывать не только водопровод, но и канализацию, хотя такая совместная прокладка и вызывает известные опасения. Утечка сточных вод и отрицательный напор в водопроводных трубах могут создать условия для загрязнения воды, поэтому укладка канализации и водопровода в одном канале или на общих опорах допустима лишь при соблюдении следующих правил: водопроводные трубы должны укладываться выше канализационных или в отдельных от канализации секциях канала; герметизация

стыков должна быть полной; при тепловом сопровождении водопроводную трубу следует помещать в общей теплоизоляции с одной из труб теплосети (обычно с обратной), а канализационную — укладывать в общей теплоизоляции с другой трубой теплоснабжения (обычно с подающей). За рубежом встречаются случаи, когда на вводах-выпусках в здания трубы канализации и водопровода укладываются в общей теплоизоляции вплотную друг к другу.

§ 3. Планировка населенных мест и инженерные коммуникации

На рис. 1 приведен пример рациональной для Крайнего Севера планировки двух поселков, запроектированных с учетом минимального протяжения санитарно-технических коммуникаций. Поселок *А* рассчитан на 5,8 тыс. человек и поселок *Б* на 7 тыс. человек населения. Дома пяти- и шестиэтажные. Застройка организуется в виде компактного массива, воспринимающего снего-ветровой поток основного направления своим коротким фронтом. Для защиты от ветра и снежных заносов вся селитебная территория с наветренных сторон застраивается преимущественно без разрыва. Для инженерных коммуникаций используется главным образом надземная прокладка вне территории застройки, параллельно наружному ее контуру. В поселке *Б*, чтобы избежать пересечения сетями проездов, используется подземный канал для совместной прокладки коммуникаций. Группы из сблокированных двух-трех зданий присоединяются к наружным сетям одним вводом-выпуском. Разводка сетей по сблокированным корпусам производится в проветриваемых подпольях зданий с подвеской труб под цокольным перекрытием *.

Примером продуманного решения, дающего минимальную протяженность инженерных сетей, является планировка и застройка жилых кварталов Норильска. На рис. 2 приведена схема санитарно-технических коммуникаций одного из микрорайонов этого города. Здесь полностью исключены случаи прокладки наружных сетей внутри квартала, поскольку при внутриквартальной прокладке санитарно-технических коммуникаций они оказывают вредное тепловое воздействие на близрасположенные здания, о чем уже говорилось выше. В свою очередь внутриквартальная прокладка инженерных коммуникаций из-за необходимости отдалять их от зданий неизбежно влечет за собой увеличение разрывов между зданиями, что снижает плотность застройки.

---

* «Поселки и кварталы для Крайнего Севера». Альбом примеров планировки и застройки. Ленинградский филиал АСиА СССР. Госстройиздат, 1961.

Хаотичная малоэтажная застройка старых городов и поселков Крайнего Севера создает чрезвычайные трудности при проектировании в них канализации, водоснабжения и центрального теплоснабжения. В качестве примера приведем схему устройства коммуникаций в одном из поселков на се-

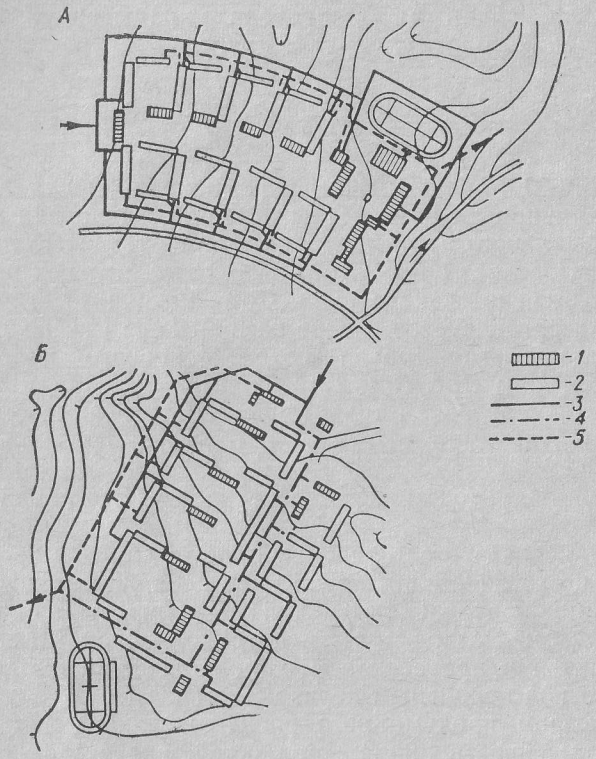


Рис. 1. Схемы инженерных коммуникаций в поселках Крайнего Севера

1 — здания культурно-бытового назначения; *2* — жилые здания; *3* — наземная совмещенная прокладка водопровода и теплосети; *4* — совмещенная прокладка водопровода, канализации и теплосети в подземном канале; *5* — прокладка канализации в грунте

вере Якутской АССР (рис. 3). Неблагоприятные мерзлотно-грунтовые условия (грунты III и IV категорий) и незначительное по количеству население не оправдывали расходов на прокладку подземных сетей. Все инженерные коммуникации были построены надземными в непроходных каналах. Сети получились большой длины и перерезали вдоль и поперек весь поселок. Чтобы не нарушать транспортных связей, пришлось на территории поселка делать развязки санитарно-технических

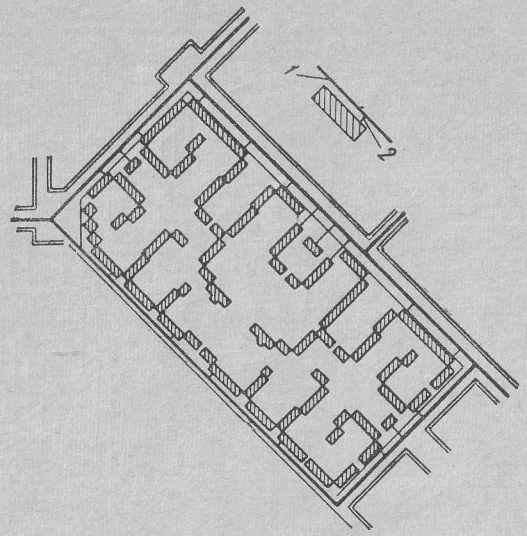


Рис. 2. Схема санитарно-технических коммуникаций микрорайона № 1 г. Норильска

1 — подземный канал для совмещенной прокладки всех инженерных сетей; *2* — вводы-выпуски в здания

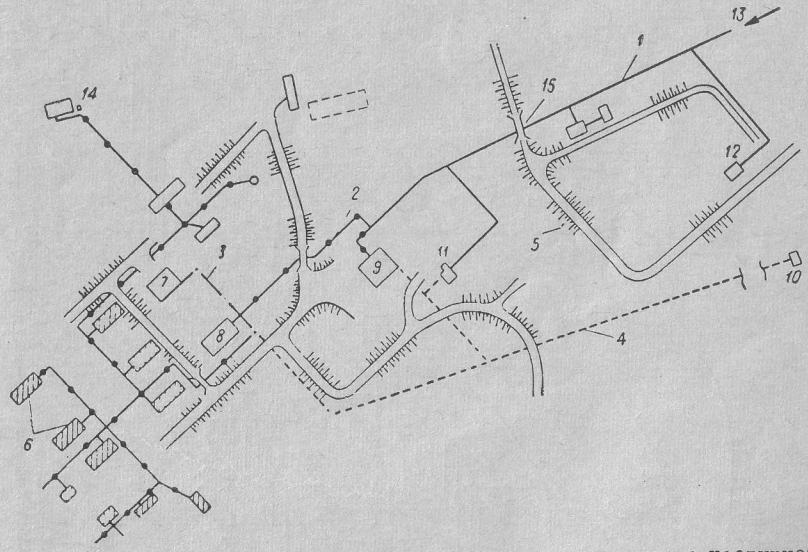


Рис. 3. Схема инженерных сетей в старом северном поселке с хаотичной застройкой

1 — водопровод надземной прокладки; *2* — надземный канал с сетями водопровода и теплоснабжения; *3* — надземный канал с сетями водопровода, теплоснабжения и канализации; *4* — надземная прокладка канализации; *5* — автомобильные дороги; *6* — жилые здания; *7* — пожарное депо; *8* — столовая; *9* — центральная котельная и дизельная электростанция; *10* — выпуск канализации; *11* — насосная второго подъема и очистные сооружения водопровода; *12* — насосная станция; *13* — водовод от источника водоснабжения; *14* — служебное здание аэропорта; *15* — мосты на дорогах для пропуска инженерных коммуникаций

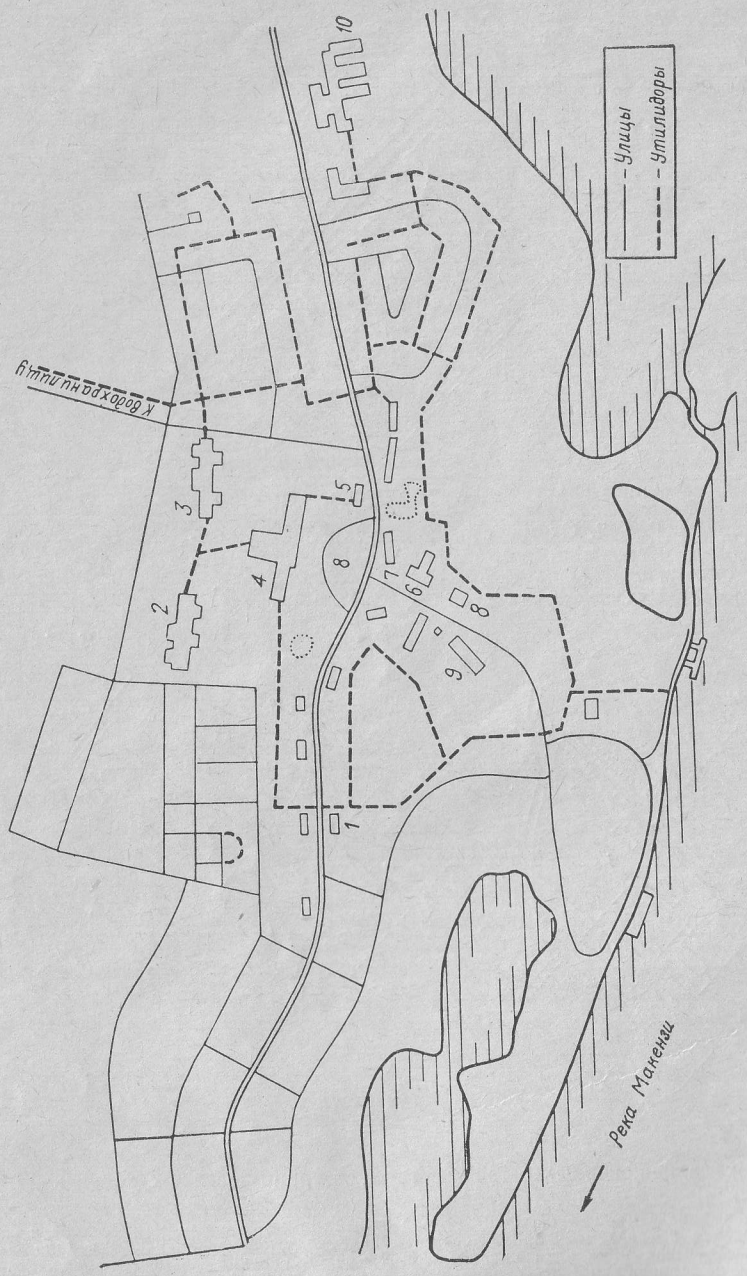


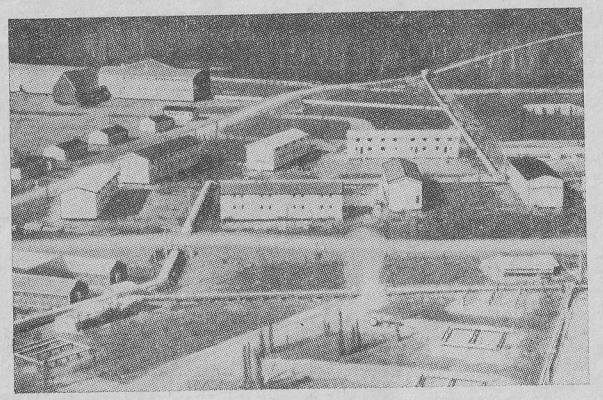
Рис. 4. План города Инувика (Арктическая Канада)

1 — прачечная; *2* — общежитие учеников католической школы; *3* — общежитие учеников англиканской школы; *4* — школа Макензи; *5* — англиканская церковь; *6* — гостиница; *7* — здание административного управления; *8* — королевская канадская конная полиция; *9* — морская казарма; *10* — больничный городок

коммуникаций и поселковых дорог, поднимая уровень дорог и строя мосты через санитарно-технические каналы.

Во вновь создаваемых городах и поселках соответствующими приемами планировки можно запроектировать надземные сети инженерных коммуникаций таким образом, чтобы

а)



б)

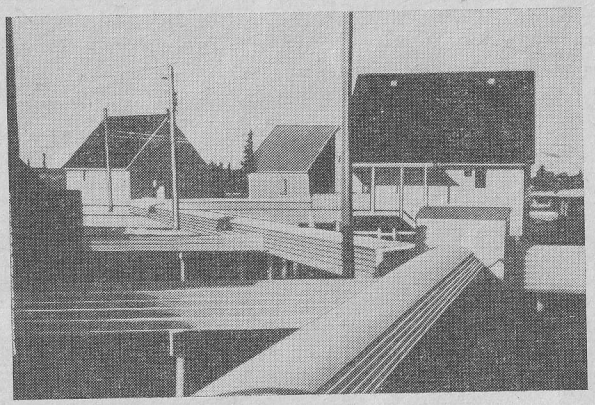


Рис. 5. Утилидоры в городе Инувике (Арктическая Канада)

а — общий вид; *б* — фрагмент

они почти не мешали движению транспорта. Так в 1960—1961 гг. был построен новый город Инувик в арктической Канаде. Но все же и здесь не удалось избежать пересечения дорог с санитарно-техническими каналами (утилидорами), как это видно из рис. 4 и 5.

Выбор схемы начертания инженерных коммуникаций зависит от многих факторов, и дать общие рекомендации на все

случаи затруднительно. Можно лишь сделать следующие указания в отношении водопроводной сети. Ее желательно проектировать так, чтобы на всех участках была обеспечена постоянная циркуляция воды с достаточной скоростью для предохранения воды от замерзания. В этом отношении обычная кольцевая система малопригодна. В ней на отдельных участках скорость движения воды может падать до нуля или в течение длительного времени вода будет двигаться с минимальными скоростями в переменных направлениях. Даже при организации на такой сети постоянных холостых сбросов возможно появление безрасходных участков. Тупиковые схемы допустимы только при компактной застройке крупными зданиями с постоянным потреблением воды. При этом в зданиях организуется постоянный сброс воды из водопровода в каждый канализационный стояк в количестве примерно 0,05—0,08 *л/сек* (см. § 31). Эта мера предупреждает замерзание водопроводных и канализационных вводов-выпусков и тупиковых участков наружной сети.

Непроизводительный расход воды на сбросы из тупиков нежелателен, а при высокой стоимости и ограниченном запасе воды недопустим. В таких случаях сбрасываемую из тупиков воду можно возвращать по специальным водоводам к насосной станции второго подъема или к источнику водоснабжения. При этом получается сеть из одного или нескольких самостоятельных колец, замкнутых через насосную станцию, чем и обеспечивается постоянная циркуляция воды во всех участках сети. Примером такого решения может служить водоснабжение г. Ураниум-Сити на севере провинции Саскачеван в Канаде. От места водозабора к станции с циркуляционными насосами и подогревом проложена подающая магистраль диаметром 254 *мм*. Кроме этой главной магистрали, сооружены еще два самостоятельных кольца с трубопроводами диаметром 152 и 203 *мм*. Каждая закольцованная линия обслуживается насосами для подкачки и теплообменниками для подогрева воды (рис. 6).

При реконструкции водопровода г. Фэрбенкса на Аляске с населением около 50 тыс. человек отказались от старой системы прокладки водопровода совместно с сетями теплоснабжения и перешли на новую систему побудительной циркуляции воды в сети, подобную описанной выше для Ураниум-Сити. По такому же принципу построена новая водопроводная сеть Якутска, первая очередь которой состоит из нескольких самостоятельных вытянутых колец.

Кроме описанных однотрубных систем водопровода с принудительной циркуляцией воды, на Аляске и в некоторых северных городах Канады (Флин-Флон, Йеллоунайф) применены двухтрубные системы с прямой и обратной трубами, наподобие схем тепловых сетей.

В районах распространения вечномерзлых грунтов из-за сложности строительства и эксплуатации подземных сетей строится только бытовая сеть канализации. Дождевые воды удаляются поверхностным водоотводом.

Трасса канализационной сети во многом будет зависеть от рельефа местности. В тундровых районах, где рельеф почти плоский, приходится применять во многих случаях станции перекачки на канализационной сети.

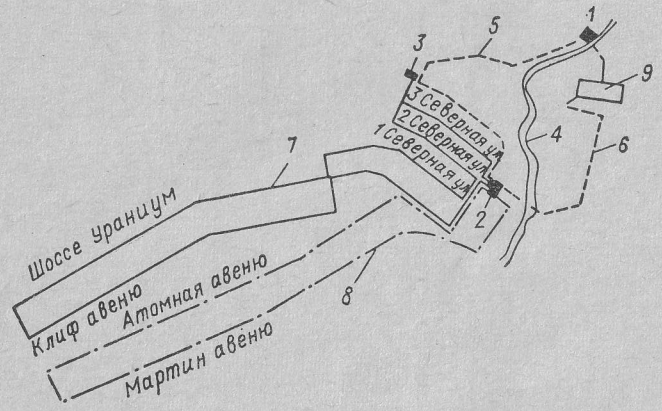


Рис. 6. Сеть водопровода в Ураниум-Сити (Канада)

1 — насосная водозабора; *2* — станция подогрева и рециркуляции; *3* — рециркуляционная насосная; *4* — река Фредетт; *5* — магистральный водовод; *6* — кольцо № 1 (перспективное развитие сети); *7* — кольцо № 2; *8* — кольцо № 3; *9* — территория госпиталя

В небольших населенных местах расход сточных вод будет мал; последние заполняют лишь незначительную часть поперечного сечения труб. Аналогичное положение будет и в верховых участках уличных коллекторов больших городов и поселков. Из-за отсутствия большого запаса тепла в сточной жидкости последняя может замерзнуть на участках с малым расходом, поэтому при трассировании канализационных сетей целесообразно верховые участки размещать в местах с большим водоотведением (у бань, прачечных и т. п.). В некоторых случаях может применяться и метод искусственного увеличения расхода сточных вод за счет накопления их в сборниках с последующим периодическим залповым выпуском, обеспечивающим расчетные скорости в сети.

В старых городах и поселках Крайнего Севера, построенных не на основе новых принципов компактной застройки, приходится применять местную канализацию с отводом сточных вод от группы зданий (или даже только от одного здания) в сборный резервуар, откуда они перекачиваются

ассенизационными машинами и вывозятся в специально отведенное место.

Для проектирования тепловых сетей трудно дать какие-либо специфические рекомендации в условиях прокладки трубопроводов в мерзлых грунтах. Следует лишь иметь в виду, что в этом случае надо избегать подземной внутриквартальной прокладки, особенно в грунтах III и IV категорий.

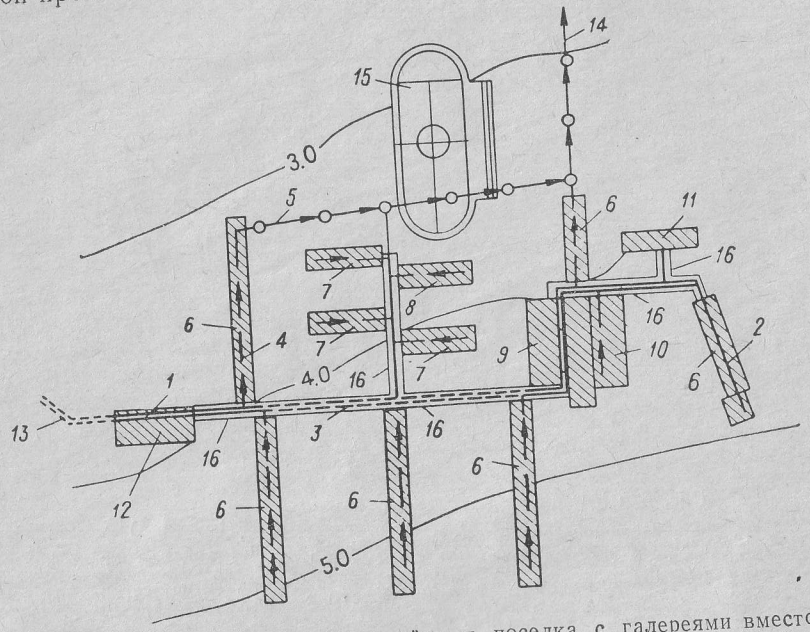


Рис. 7. Схема инженерных сетей для поселка с галереями вместо улиц

1 — водопровод (две трубы), теплосеть, канализация; *2* — водопровод (одна труба), теплосеть, канализация; *3* — водопровод (две трубы), теплосеть; *4* — канализация, проложенная надземно в проветриваемых подпольях; *5* — сборный подземный коллектор канализации; *6* — жилые здания; *7* — детские ясли-сад; *8* — школа; *9* — культурно-просветительный блок; *10* — торгово-бытовой блок; *11* — баня-прачечная; *12* — больница; *13* — магистральные водовод и теплосеть; *14* — выпуск канализации; *15* — стадион; *16* — пешеходные галереи

В последние годы создан ряд проектов городов и поселков для Крайнего Севера, в которых применены новые принципы планировки и застройки. В таких населенных местах для связи жилья с общественными зданиями предусматриваются галереи, которые используются также и для прокладки инженерных коммуникаций. Схема санитарно-технических коммуникаций для одного из таких поселков (пос. Депутатский на севере Якутской АССР) по проекту ЛенЗНИИЭПа приведена на рис. 7. Поселок рассчитан на 6145 жителей и состоит из шести девятиэтажных домов и восьми зданий культурно-бытового назначения. Здесь применена кольцевая схема водопроводной сети, которая состоит из двух параллельных трубопроводов. Все коммуникации в пределах застройки прокладываются или под зданиями в вентилируемом подполье с подвеской трубопроводов к цокольному перекрытию, или в пешеходных галереях, соединяющих все здания между собой. Три параллельных магистральных канализационных трубопровода в северной части поселка объединяются сборным коллектором, из которого сточные воды сбрасываются после очистки в реку.

Выше уже говорилось, что инженерные коммуникации как выделяющие тепло в грунт при подземной прокладке должны быть удалены от линии застройки для устранения деградации (оттаивания) мерзлых грунтов в основании зданий. Это обстоятельство следует учитывать при начертании инженерных сетей, проверяя допустимые расстояния подземных каналов и теплоотдающих трубопроводов от фундаментов зданий по размеру талика, определяемому тепловым расчетом (см. § 39).

§ 4. Способы прокладки магистральных трубопроводов

Магистральные трубопроводы — водоводы, теплопроводы, нефтепроводы, газопроводы — прокладываются как наземно или надземно, так и подземно. Преимущества надземного способа — простота надзора, ремонтов и ликвидаций аварий, а также отсутствие земляных работ при строительстве в трудных инженерно-геологических условиях залегания вечномерзлых грунтов — делают этот способ наиболее распространенным, в особенности в грунтах III и IV категорий. Наземная прокладка в насыпи и подземная прокладка не требуют устройства опор и предохраняют трубопроводы от воздействия низких температур воздуха, ветра и снега, что позволяет в большинстве случаев отказаться от теплоизоляции труб. Однако эти способы прокладки связаны с трудностями при разработке мерзлых грунтов, требуют для обеспечения устойчивости сооружения замены грунтов в основании трубопроводов и затрудняют эксплуатацию. Практически можно сказать, что подземная прокладка магистральных трубопроводов возможна только в грунтах I и II категорий.

Глава вторая

КОНСТРУКЦИИ САНИТАРНО-ТЕХНИЧЕСКИХ КОММУНИКАЦИЙ И МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

§ 5. Подземные трубопроводы

Подземные трубопроводы широко применяются для сетей водопровода и канализации, в том числе и в грунтах со значительным содержанием льда (грунты III категории) при трубах диаметром не более 300 *мм*. Трубы укладываются непосредственно на подготовленное грунтовое основание. Чтобы предотвратить их осадку при оттаивании грунтов, последние в основании трубопроводов заменяются на глубину несколько меньшую, чем глубина залегания расчетного горизонта мерзлой толщи под трубопроводом (рис. 8.). Эта глубина замены грунта в основании трубопроводов $h_з$ определяется расчетом, как указывается в § 41. Трубы диаметра большего чем 300 *мм* укладывать в льдонасыщенных грунтах не рекомендуется, так как вокруг них образуется большой талик и замену грунта в основании трубопроводов приходится производить на большую глубину, что экономически невыгодно.

Для замены грунтов в основании трубопроводов применяются грунты с малым коэффициентом фильтрации и легко поддающиеся уплотнению, т. е. супеси и пылеватые пески, укладываемые в талом состоянии с послойным уплотнением. Для замены могут применяться также «оптимальные смеси», состоящие из местного талого грунта, песка и гравия в соотношении 1 : 1 : 0,5. Если в основании трубопровода залегают песчаные грунты, содержащие ледяные линзы, то подготовка основания может осуществляться путем предварительного протаивания таких грунтов, например электропрогревом, с последующим их уплотнением.

Ширина основания из замененного грунта принимается равной ширине траншеи. Хорошо фильтрующие грунты непригодны для замены в основании труб, так как они создают приток надмерзлотных вод, что приводит к дополнительному,

сверх расчетного, оттаиванию грунтов в основании трубопроводов.

В грунтах I категории трубы можно укладывать без замены грунта в основании прямо на существующий грунт по подготовке из слоя песка толщиной 10—15 *см*. Необходимость замены грунта при грунтах II категории устанавливается расчетом. В грунтах III и IV категорий замена грунта в основании труб по расчету обязательна.

Глубина заложения водопроводных труб обычно небольшая и колеблется в пределах 0,7—1,5 *м*, т. е. они укладываются в слое сезонного оттаивания. Трубы канализации закладываются и на бóльшую глубину, в зависимости от требуемого уклона и рельефа местности. Чем ближе к поверхности заложены трубы, тем больше теплопотери в сети в зимнее время. Поэтому оптимальную глубину заложения водопроводных труб следует определять на основе расчета теплопотерь (см. § 21).

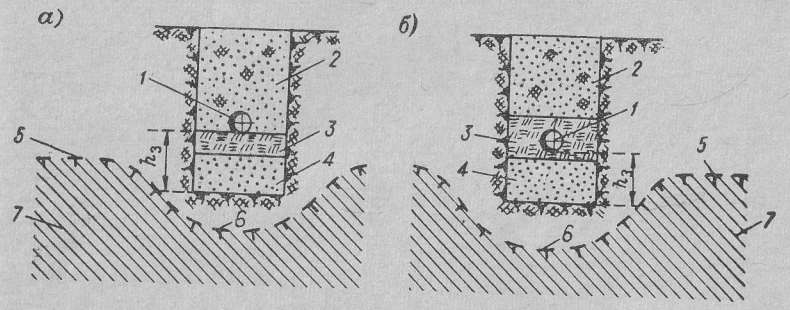


Рис. 8. Прокладка труб инженерных коммуникаций в грунте
1 — трубопровод; *2* — засыпка местным грунтом; *3* — глинобетон; *4* — замененный грунт; *5* — верхняя граница мерзлой толщи грунтов на глубине сезонного протаивания; *6* — понижение границы мерзлой толщи грунтов от тепловыделения трубопровода; *7* — вечномерзлая толща грунтов

Под трубу на основание из замененного грунта иногда укладывается гидроизолирующий слой (рис. 8, *а*) из утрамбованного глинобетона (механическая смесь глины или тяжелого суглинка с примесью щебня или гравия и песка) толщиной 25—30 *см*.

В некоторых случаях трубы целиком размещаются в слое глинобетона, при этом слой его над трубой должен быть 20—30 *см* (рис. 8, *б*), чтобы предотвратить приток грунтовых вод к трубе и движение их вдоль трубы. Такая обкладка труб глинобетоном обязательна для канализационных сетей в случае их изготовления из чугунных труб с заделкой стыков цементным раствором. При стальных трубах со стыками на сварке устройство глинобетонных подстилающих слоев и обвалование глинобетоном труб применяются редко.

После укладки трубопровода на подготовленное основание траншеи засыпаются местным талым грунтом. При засыпке траншеи зимой разрешается использовать и мерзлые комья грунта, но не свыше 35—40% от всего объема засыпки.

Если подземный трубопровод укладывается в фильтрующих грунтах и не защищается глинобетоном, то во избежание фильтрации надмерзлотных вод вдоль трубы устраиваются перемычки, преграждающие интенсивное движение грунтовых вод. Перемычки сооружаются из глинобетона поперек траншеи, причем врезаются в мерзлое основание и

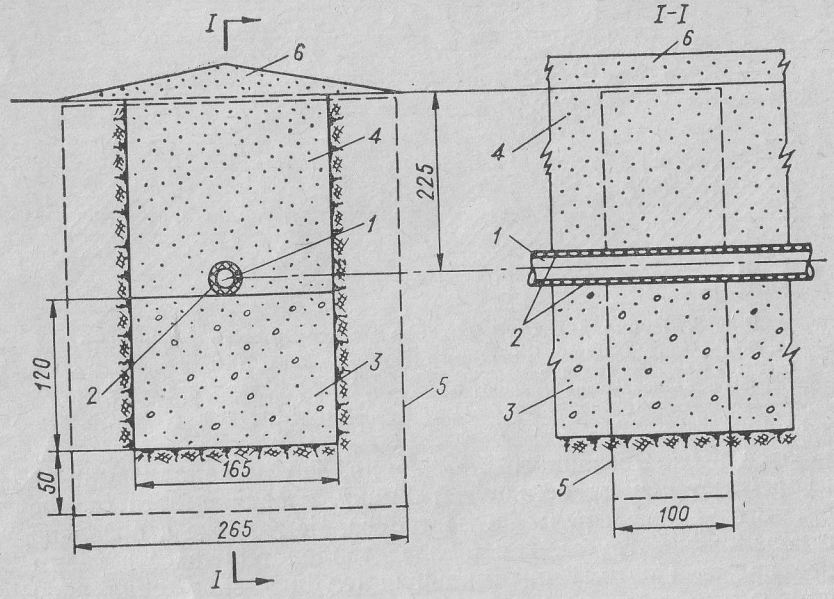


Рис. 9. Подземная прокладка канализационной трубы в теплоизоляции
1 — труба; *2* — теплоизоляция; *3* — замененный грунт; *4* — местный грунт; *5* — глинобетонный замок; *6* — присыпка для отвода воды

в стенки траншеи на 0,5—1 *м* (рис. 9). Расстояние между перемычками назначается в зависимости от продольного уклона трубопровода и обычно колеблется в пределах от 50 до 200 *м*. В хорошо фильтрующих грунтах (крупные пески, гравий, галечник) такие перемычки малоэффективны, так как поток надмерзлотных вод может легко их обходить. В таких случаях приходится прибегать к устройству дренажа под трубопроводом.

Материал труб. При подземной бесканальной прокладке в грунтах III и IV категорий рекомендуется применять как для водопровода, так и для канализации стальные трубы. При этом можно не опасаться дополнительных напряжений

в материале труб, возникающих от возможных местных просадок и пучения грунтов, если диаметр труб не превышает 30—40 *см*. При грунтах I и II категорий можно применять для водопроводных сетей и чугунные раструбные трубы с заделкой стыков асбоцементом. При самотечной канализации в этих грунтах можно использовать железобетонные и чугунные трубы с заделкой раструбных стыков асфальтовой мастикой и прокладкой смоляной пряжи. Применять асбоцементные трубы не следует, так как они хрупки и непригодны для службы в мерзлых грунтах, а стыковые соединения их на резиновых кольцах ненадежны при отрицательных температурах.

На Крайнем Севере за рубежом для водопровода и канализации применяются преимущественно чугунные трубы. Иногда для водопроводных сетей используются и стальные оцинкованные трубы или стальные трубы с изоляцией в несколько слоев из асфальто-асбестового войлока.

Теплоизоляция труб. При подземной прокладке часть тепла, теряемого транспортируемой жидкостью, аккумулируется и вокруг труб образуется талая зона. Этот ореол талого грунта является естественной теплоизоляцией, так что в большинстве случаев подземную прокладку сетей водопровода и канализации можно осуществлять без теплоизоляции труб. Талая зона вокруг трубопровода в известной степени предохраняет трубы также от действия сил морозного пучения.

На участках канализационной сети неглубокого заложения и с малыми расходами теплоизоляция труб во многих случаях окажется экономически выгодной. Для подземной бесканальной укладки должна применяться изоляция весьма прочная, могущая нормально работать без периодических ремонтов в условиях мерзлых грунтов. В качестве примера на рис. 9 приведена конструкция канализационной сети в грунтах III категории. Трубы приняты стальные с теплоизоляцией из стекловолокна и покрытием из листов стеклопластика.

Подземная бесканальная прокладка теплопроводов в мерзлых грунтах не применяется, так как такие трубопроводы весьма активно воздействуют на вечномерзлую толщу грунтов, и ореол протаивания вокруг труб с обычной теплоизоляцией может достигнуть очень больших размеров (радиусом до 20 *м* и более). Особенно опасны при теплопроводах аварийные прорывы горячей воды из-за порчи изоляции. Однако при надлежащей теплоизоляции труб в грунтах I и II категорий и при близком заложении труб к поверхности земли бесканальная прокладка теплопроводов технически возможна и может быть экономически оправдана. В этом случае необходимо, чтобы теплоизоляция труб была эффективна и одновременно обладала высокой механической прочностью.

§ 6. Подземные санитарно-технические каналы

Подземные каналы применяются при прокладке сетей теплоснабжения или для совместной прокладки инженерных коммуникаций различного назначения.

Главной задачей при проектировании и строительстве подземных каналов является обеспечение их устойчивости при оттаивании мерзлых грунтов в основании сооружения и борьба с затоплением каналов надмерзлотными водами. Для обеспечения надлежащей устойчивости каналов грунты III и IV категорий, а иногда и грунты II категории в основании каналов заменяются на расчетную глубину (см. § 41). Расчет глубины замены грунта в основании канала производится из условия максимального оттаивания грунтов под ним в летнее время. В холодный период года оттаявший под каналом слой грунта должен быть снова проморожен, для чего каналы вентилируются зимой морозным воздухом для удаления из них тепла, препятствующего промерзанию нижележащих слоев грунта.

Для борьбы с затоплением каналов грунтовыми водами принимаются различные меры. К ним относятся: устройство глинобетонных замков-перемычек по трассе канала, дренажа, закладка каналов на возможно меньшую глубину в грунт и, наконец, отвод грунтовых вод по самому каналу. Однако все эти меры малоэффективны, так как большой ореол оттаивания вокруг каналов создает обильный приток надмерзлотных вод, отвод которых в условиях вечномерзлых грунтов представляет немалые трудности. Лучшим способом в этом отношении является сооружение каналов мелкого заглубления, что, к сожалению, не всегда возможно.

Подземные каналы для инженерных сетей подразделяются на непроходные, высотой до 0,9 *м*, полупроходные, высотой 1,6 *м* и проходные, высотой 1,8 *м*. Последние могут быть одноярусными и двухъярусными.

В настоящее время подземные каналы устраиваются преимущественно из монолитного или сборного железобетона. Сборные железобетонные каналы собираются из тонкостенных (12—20 *см*) элементов длиной 3—4 *м* и замоноличиваются.

Каналы тепловых сетей. Сети теплоснабжения при раздельной прокладке укладываются в непроходных каналах с заглублением обычно 0,5—0,7 *м* от поверхности, считая от верха перекрытия канала.

В грунтах II категории канал можно укладывать в траншее непосредственно на послойно уплотненный непучинистый грунт с содержанием глинистых и пылеватых частиц не более 10% (рис. 10, *а*). Таким же грунтом производится обратная засыпка траншеи. В грунтах III категории, где можно

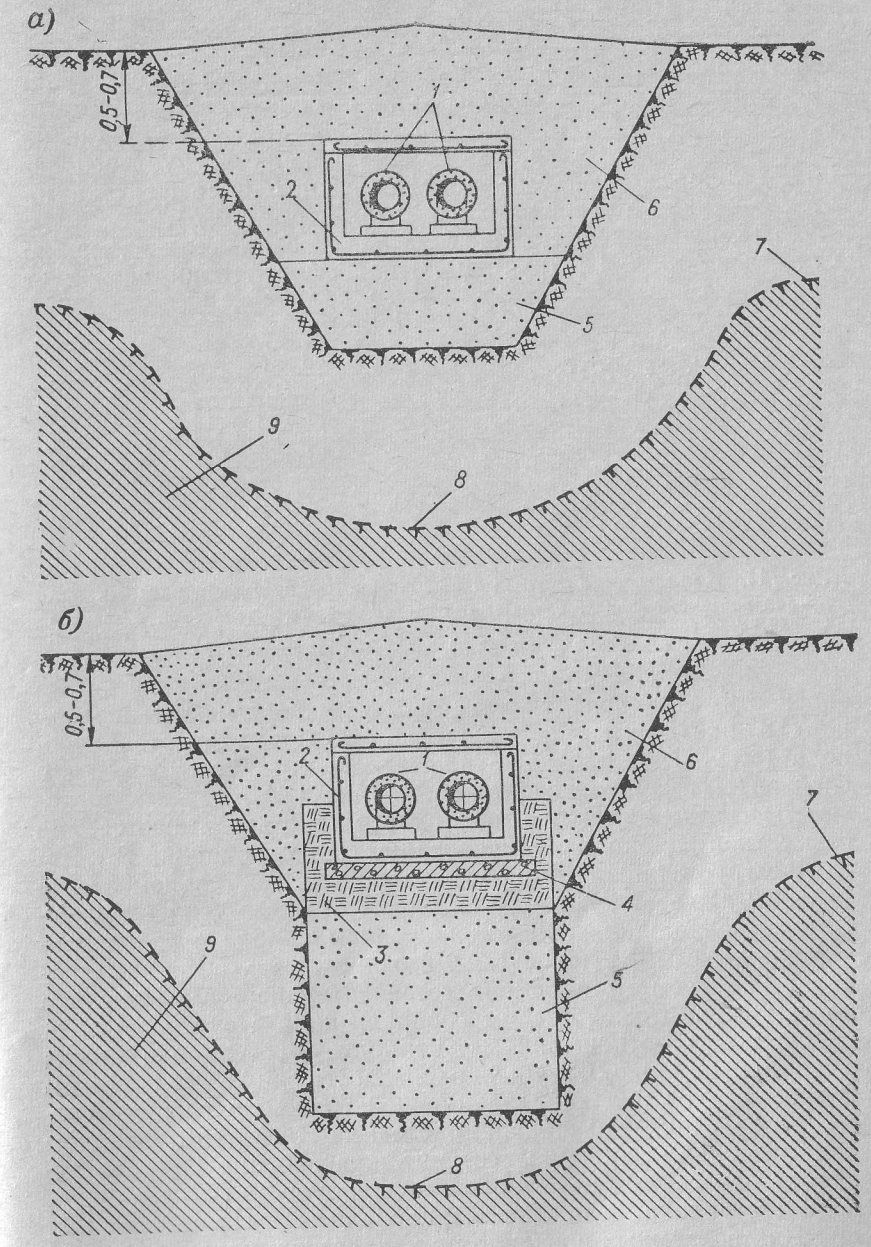


Рис. 10. Подземный канал теплосети

а — в грунтах II категории; *б* — в грунтах III и IV категорий; *1* — трубы в теплоизоляции; *2* — железобетонный канал; *3* — глинобетон; *4* — бетонная подготовка; *5* — замена грунта в основании канала; *6* — засыпка котлована; *7* — граница мерзлой толщи грунтов на глубине сезонного оттаивания; *8* — понижение границы мерзлой толщи грунтов от тепловыделения трубопроводами; *9* — вечномерзлая толща грунтов

ожидать неравномерные осадки при протаивании грунтов, на уплотненное основание из замененного грунта укладывается слой глинобетона толщиной 20 *см*, поверх которого устраивается подготовка из бетона марки 50. На подготовке монтируют короб канала. Глинобетон используется для устранения случайного проникновения воды из канала в грунт основания. Глинобетонный слой заворачивают в виде фартука на стенки канала до середины его высоты (рис. 10, *б*).

В хорошо дренирующих грунтах, особенно если их можно отнести по табл. 1 к грунтам III или IV категорий, возникает

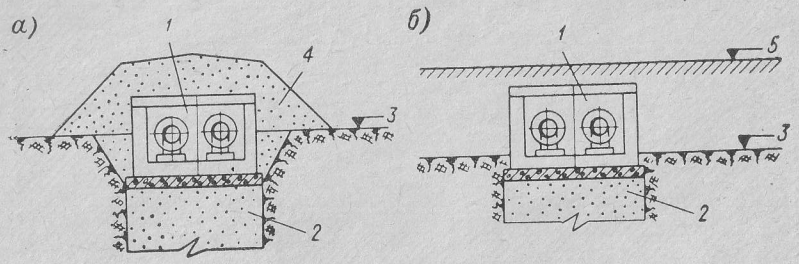


Рис. 11. Каналы теплосети при высоком стоянии надмерзлотных вод
а — полуподземный канал; *б* — наземный канал; *1* — канал теплосети; *2* — замена грунта в основании канала; *3* — поверхность земли; *4* — обсыпка канала грунтом; *5* — красная отметка вертикальной планировки

опасность затопления канала грунтовыми водами. В таких случаях лучше применять полуподземную прокладку теплопровода (рис. 11, *а*) или даже наземную с соответствующей последующей планировкой местности (рис. 11, *б*).

Подземные каналы непроходного типа используются для совместной прокладки инженерных коммуникаций. В этом случае трубы канализации укладываются в отдельном отсеке (рис. 12, *а*), а водопровод — в одном отсеке с тепловыми сетями. Прокладка канализации в одном канале с водопроводом, даже в отдельном отсеке, в непроходных подземных каналах, где осмотр и ремонт сетей затруднен, нежелательна по санитарно-гигиеническим соображениям. Некоторое улучшение в этом отношении можно получить, если дно отсека с канализационной трубой располагать ниже (рис. 12, *б*). В этом случае под канализационной трубой получается своего рода лоток, куда попадают сточные воды при аварийном прорыве канализационной сети. Понижение дна канализационного отсека может потребоваться и для обеспечения продольного уклона, если канализационная сеть самотечная.

Для подземных прокладок в каналах применяются стальные трубы с подвесной теплоизоляцией из минеральной ваты. В последнее время для теплоизоляции труб начали использовать пенопласт.

Подземные непроходные каналы с совместной прокладкой неудобны для монтажа и эксплуатации, поэтому их устройство допускается только на небольших расстояниях, например для внутриквартального участка.

Полупроходные каналы с высотой в свету 1,6 *м* устраиваются в случае совместной прокладки магистральных сетей. Такие каналы легче очищать от мусора, попадающего через вентиляционные отверстия и от заиления вследствие неизбежного проникновения в них надмерзлотных вод. Что касается конструкции полупроходных каналов, то она отличается от конструкции непроходных каналов только габаритами.

На Аляске и на севере Канады также применяются подземные каналы для прокладки санитарно-технических коммуникаций, известные под названием «утилидоры». В принципе они ничем не отличаются от применяемых у нас на Крайнем Севере непроходных и полупроходных подземных каналов для совместной прокладки трубопроводов различного назначения. Преимущественно их стараются сделать водонепроницаемыми, для чего используют готовые железобетонные монолитные секции с надежной гидроизоляцией или изготавливают утилидоры из металла. Строительство утилидоров обходится дорого (от 150 до 300 долл. за 1 *м*).

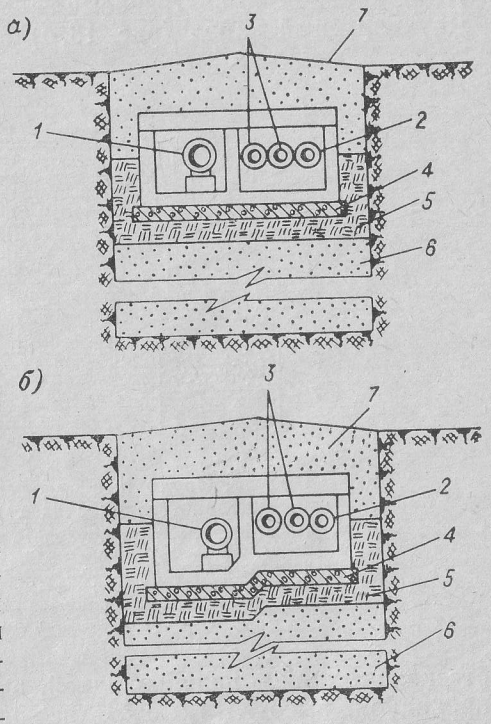


Рис. 12. Непроходной канал для прокладки санитарно-технических коммуникаций
а — с плоским днищем; *б* — с пониженным отсеком для канализации; *1* — канализация; *2* — водопровод; *3* — теплосеть; *4* — бетонная подготовка; *5* — глинобетон; *6* — замененный грунт; *7* — засыпка траншеи местным грунтом

Подземные проходные каналы удобны в эксплуатации, но дороги и потому широкого применения пока не нашли. Только в г. Норильске имеется развитая сеть подземных проходных одноярусных и двухъярусных каналов для прокладки санитарно-технических коммуникаций протяженностью около 20 *км*. Недавно сооружены одноярусные проходные каналы и

в г. Мирном (Якутская АССР). В проходных каналах, кроме водопровода, канализации и теплосети, укладываются также электрические кабели.

Одноярусные каналы устраиваются из сборных железобетонных элементов и отличаются от ранее описанных габаритами и размещением трубопроводов (рис. 13, *а*). Высота таких каналов по внутреннему габариту составляет 1,8—2,5 *м*. Двухъярусный канал (рис. 13, *б*) по высоте разделен на два

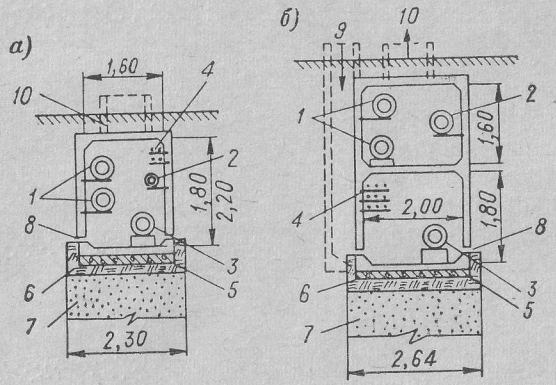


Рис. 13. Проходные подземные каналы санитарно-технических коммуникаций

а — одноярусный; *б* — двухъярусный; *1* — теплосеть; *2* — водопровод; *3* — канализация; *4* — электрические кабели; *5* — бетонная подготовка; *6* — глинобетон; *7* — замененный грунт; *8* — дренажные трубки; *9* — приточная вентиляционная шахта; *10* — вытяжная вентиляционная шахта

отсека: верхний — полупроходной, высотой 1,6 *м* и нижний — проходной, высотой 1,8 *м*. В верхнем отсеке укладываются трубы теплосети и водопровода, в нижнем — электрические кабели и трубы канализации.

Преимущество двухъярусных каналов усматривается в том, что трубопроводы теплосети с большим выделением тепла отделены от нижней части канала железобетонной диафрагмой, так что в грунт основания попадает меньше тепла и глубина оттаивания грунтов под каналом меньше, чем при одноярусных. На этой основе построены рекомендации: применять одноярусные каналы при благоприятных грунтовых условиях, а двухъярусные — при грунтах сильно льдонасыщенных (грунты III и IV категорий). Однако двухъярусные каналы по сравнению с одноярусными имеют и серьезные недостатки: они дороже, у них худшие условия для вентиляции, меньше удобства при монтаже, осмотре и ремонте.

При мало фильтрующих грунтах можно принимать грунтовые воды непосредственно в канал. Для этого в боковых

стенках его устраивают дренажные трубки. Для отвода грунтовых вод на дне канала надбетонкой оформляется лоток. По этому же лотку сбрасываются также и аварийные воды из трубопроводов.

Вентиляция подземных каналов. Применяется для удаления зимой из каналов тепла с тем, чтобы грунты в основании восстановили свое мерзлое состояние. Для вентиляции в каналах через 15—20 *м* по длине устраиваются вентиляционные шахты. По одной части сечения шахты холодный наружный воздух опускается в канал, а по другой — нагретый воздух выходит из канала (рис. 14, *а*). Система вентиляции должна быть рассчитана так, чтобы в канале в зимнее время всегда поддерживалась отрицательная температура, хотя это и приводит к образованию наледей в канале и требует теплоизоляции не только труб тепловых сетей, но и водопроводных и канализационных труб.

Как показала практика эксплуатации, естественная вентиляция работает ненадежно, так как на приток воздуха влияет направление ветра, а шахты заносятся снегом. Поэтому в ряде случаев необходимо устройство побудительной вентиляции с установкой вентиляторов.

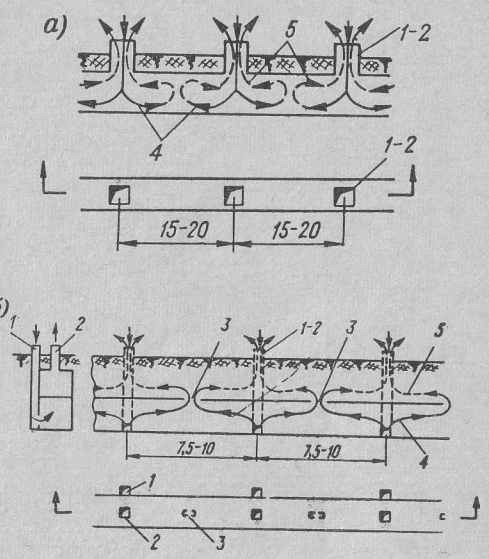


Рис. 14. Схема вентиляции подземных каналов

а — одноярусный канал; *б* — двухъярусный канал; *1* — приточная шахта; *2* — вытяжная шахта; *3* — отверстия в диафрагме; *4* — холодный воздух; *5* — нагретый воздух

Вентиляция двухъярусных каналов протекает по следующей схеме (рис. 14, *б*). Холодный воздух опускается по приемной шахте в нижний ярус канала, где уложена только канализационная труба. Там он нагревается, поднимается вверх к диафрагме, разделяющей ярусы, и через отверстия в ней поступает в верхний отсек. В верхнем отсеке, где уложены трубы теплосети и водопровода, воздух дополнительно нагревается, перемещается к выходным шахтам и по ним выходит наружу. Такая система часто нарушается, так как в зависимости от силы и направления ветра выбросная шахта начинает работать как приемная, а приемная, наоборот, как выбросная.

Очень трудно решается вопрос с наледями, которые образуются в подземных каналах при их вентиляции морозным воздухом. Борьба с наледями путем выкалывания льда практически невозможна.

§ 7. Наземные и надземные трубопроводы

Можно выделить два основных вида бесканальной прокладки трубопроводов на поверхности земли: прокладку в земляном обваловании (наземная) и прокладку на отдельных опорах (надземная).

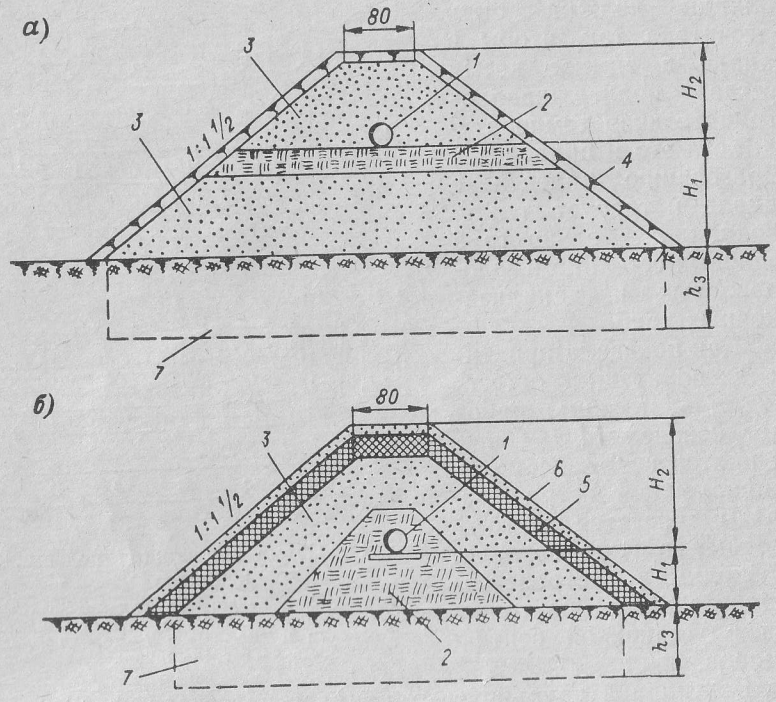


Рис. 15. Прокладка трубопровода в земляном обваловании

1 — трубопровод; *2* — глинобетон; *3* — местный грунт; *4* — покрытие мхом; *5* — теплоизоляция из торфа; *6* — присыпка из песчано-гравийного грунта; *7* — замена грунта в основании (если требуется по расчету)

При прокладке в земляном обваловании (в насыпи) трубы укладываются без теплоизоляции непосредственно на подготовку из песчано-гравийного грунта или по слою глинобетона (рис. 15, *а*), иногда в слое глинобетона по деревянным поперечинам (рис. 15, *б*). При стальных трубах со стыками на сварке глинобетон не применяется. Сверху труба обваловывается местным грунтом, а получившаяся при этом насыпь

прикрывается мхом или торфом. Теплоизоляционный слой из торфа для противопожарных целей присыпается сверху слоем грунта толщиной 10—12 *см*.

Высота грунтовой подготовки под трубой H_1 диктуется местными неровностями рельефа или же продольным профилем трубопровода. Высота обвалования H_2 назначается как из условия предохранения трубопровода от механических повреждений, для чего над трубой необходимо иметь слой

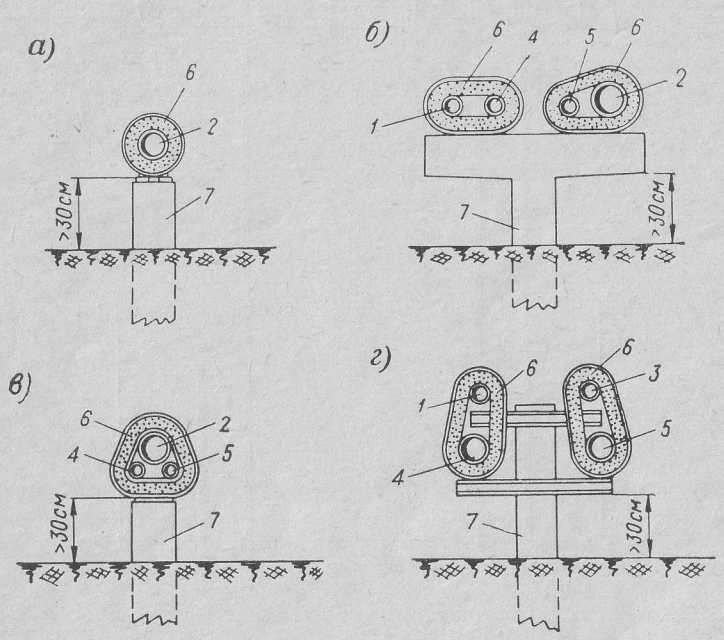


Рис. 16. Схемы конструкций надземной прокладки санитарно-технических коммуникаций на отдельных опорах

1 — водопровод; *2* — канализация; *3* — горячее водоснабжение; *4* — теплопровод подающий; *5* — теплопровод обратный; *6* — антикоррозионное покрытие + термоизоляция + защитное покрытие + гидроизоляция; *7* — свая или стойка

грунта 50—60 *см*, так и из условий теплопотерь в трубопроводе. В последнем случае высота обвалования определяется тепловым расчетом (см. § 23). Общая высота валика $H = H_1 + H_2$ при залегающих в основании грунтах III и IV категорий должна проверяться расчетом для того, чтобы в результате летнего оттаивания грунтов основание вала (насыпи) не получило недопустимых просадок (см. § 42).

При прокладке трубопроводов на отдельных опорах (надземная) от низа изоляции трубопровода до поверхности земли оставляется свободное пространство высотой не менее 30 *см*

(рис. 16). Этим исключается попадание тепла, выделяемого трубопроводами в грунт, а снег при поземках и метелях свободно проносится под трубопроводом. Кроме того, исключается воздействие грунта на конструкцию при его сезонных пульсациях (выпирание грунта зимой при пучении).

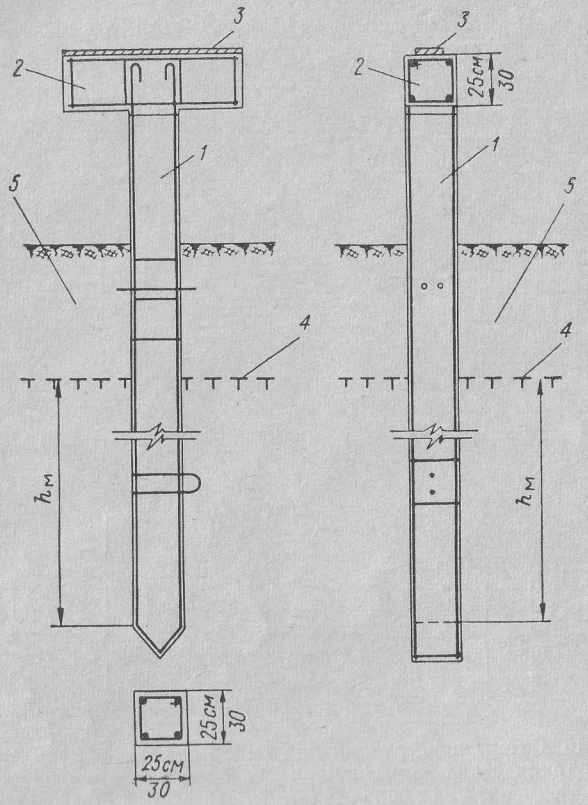


Рис. 17. Свайная железобетонная опора для надземных санитарно-технических коммуникаций

1 — свая; *2* — железобетонная балка; *3* — стальной лист; *4* — верхняя граница вечномерзлых грунтов; *5* — слой сезонного оттаивания

Таким способом осуществляется прокладка одиночных труб (рис. 16, *а*) и совмещенная прокладка труб различного назначения (рис. 16, *б, в* и *г*).

Конструкция инжнерных коммуникаций на отдельных опорах несложна в строительстве, наилучшим образом сохраняет термический режим в вечномерзлой толще подстилающих грунтов, сравнительно дешева и надежна в эксплуатации. Однако существенны и недостатки такой прокладки. Сети постоянно повреждаются транспортом при наездах и снегоочистителями при очистке улиц от снега. Сети работают в условиях низких температур, часто при сильных ветрах, и вопрос термоизоляции приобретает первостепенное значение.

При надземных открытых прокладках чаще применяются стальные трубы, так как они малочувствительны к возможным деформациям опор.

В пределах территории населенных мест или промышленных предприятий применяются одиночные свайные и реже стоечные опоры, так как они наименее загромождают территорию. Материалом для опор служит дерево или железобетон. Из железобетонных свай наибольшее распространение получили сваи квадратного сечения (рис. 17), изготовляемые из бетона марки 200 с арматурой из гладкой круглой стали. При больших горизонтальных нагрузках применяются сваи прямоугольного сечения.

Свайные и стоечные опоры рассчитываются на вертикальную и горизонтальные нагрузки и проверяются на противодействие силам пучения. Глубина заложения опор в вечномерзлую толщу грунтов $h_м$ определяется расчетом (см. § 43).

§ 8. Надземные каналы санитарно-технических сетей

Надземная прокладка трубопроводов в непроходных каналах применяется в небольших населенных пунктах при неблагоприятных мерзлотно-грунтовых условиях (грунты III и IV категорий). Канал имеет целью предохранить теплоизоляцию трубопроводов от атмосферных воздействий и одновременно защитить трубопроводы от повреждений транспортом при наездах. Строительство инженерных коммуникаций при прокладке в каналах, естественно, обходится дороже, чем при открытой прокладке, но зато в эксплуатации такие сети более надежны и не требуют постоянных ремонтов изоляции труб.

Каналы на свайных или стоечных опорах. Так же, как и при открытой прокладке, надземные непроходные каналы санитарно-технических коммуникаций сооружаются на невысоких отдельных опорах в виде свай или стоек, заглубляемых в вечномерзлую толщу грунтов на необходимую расчетную глубину (см. § 43). Трубы обычно прокладываются в каналах в кольцевой теплоизоляции.

Для изготовления надземных непроходных каналов, которые называют также коробами, ранее использовалось дерево. Хотя оно удовлетворительно служит на Крайнем Севере, сейчас применяется редко; его заменил железобетон монолитный или сборный.

Каналы применяются преимущественно прямоугольного сечения (рис. 18). В поперечном разрезе они могут быть односекционными и двухсекционными. Последние делают в том случае, когда в канале проходит канализационная труба

вместе с трубами водопровода или горячего водоснабжения. Иногда при большом числе труб размеры канала получаются настолько большими (рис. 18), что канал приходится устанавливать на двух опорах.

Расстояние между опорами для сборных железобетонных каналов зависит от габарита канала и обычно колеблется от

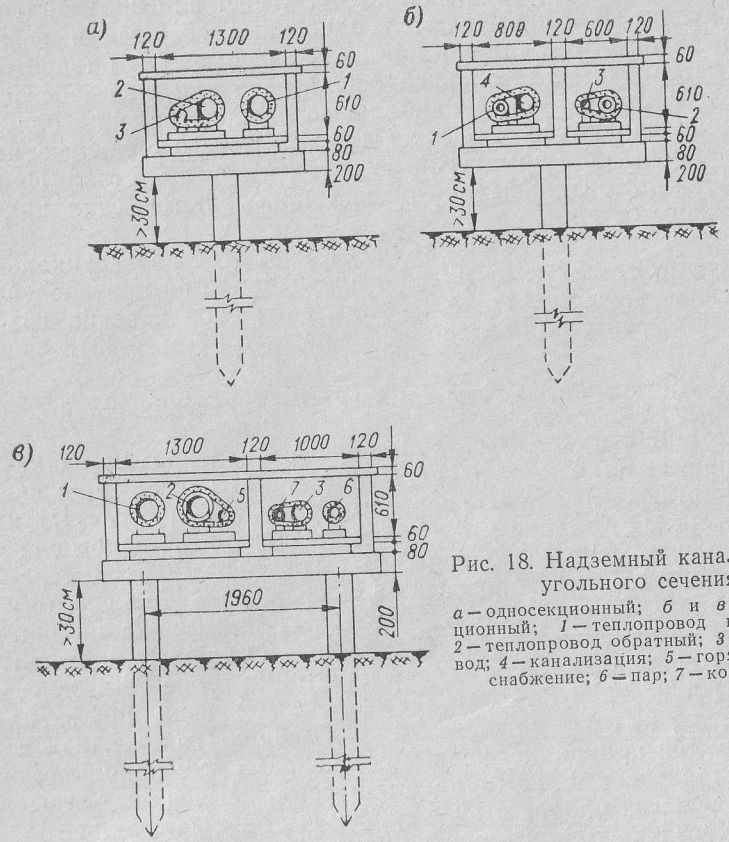


Рис. 18. Надземный канал прямоугольного сечения

а — односекционный; *б* и *в* — двухсекционный; *1* — теплопровод подающий; *2* — теплопровод обратный; *3* — водопровод; *4* — канализация; *5* — горячее водоснабжение; *6* — пар; *7* — конденсат

2,5 до 6 *м*. От низа канала до поверхности земли должен быть оставлен просвет высотой не менее 30 *см*, который играет ту же роль, что и при бесканальной надземной прокладке (см. стр. 31).

На Крайнем Севере за рубежом также применяются надземные непроходные каналы для прокладки городских санитарно-технических коммуникаций, которые носят то же название — утилидоры, что и подземные. Конструктивно они несколько отличаются от приведенных на рис. 18. Так, утилидоры в Инувике (Арктическая Канада) представляют собой ящик, состоящий из стального каркаса и стенок, выполненных

из теплоизолированных трехслойных панелей — оболочек из фанеры с сердцевиной из стекловолокна. Поверх фанерной оболочки панели покрыты листами алюминия (см. рис. 5, *б*). В таких утилидорах уложены трубы теплосети, водопровод и канализация. Материал труб теплосети — сталь, для водопровода и канализации использованы асбоцементные трубы. Утилидоры опираются на деревянные сваи, установленные с пролетом 3 *м* и вмороженные в вечномерзлую толщу грунта.

Для мертвых опор, воспринимающих горизонтальные усилия, использованы стальные сваи двутаврового сечения.

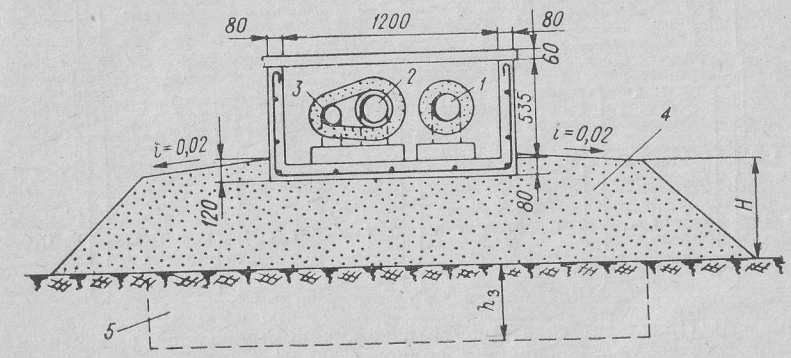


Рис. 19. Надземный канал на земляных призмах

1 — теплопровод подающий; *2* — теплопровод обратный; *3* — водопровод; *4* — непучинистый крупноскелетный грунт; *5* — замена грунта в основании земляной призмы

Каналы на пульсирующих опорах. Когда позволяет территория застройки, вместо свай можно применить для надземных каналов опоры в виде земляных призм (рис. 19). Такие опоры относятся к типу пульсирующих, так как при протаивании грунтов основания они будут садиться, а при замерзании выпучиваться под действием сил морозного пучения. Высота земляных призм должна назначаться по расчету (см. § 42), чтобы деформации оседания и пучения не превосходили допустимой величины.

Земляные опоры устраиваются из крупноскелетных непучинистых грунтов, содержащих примесь глинистых и пылеватых частиц, не превышающую по объему 10%. В основании призмы следует сохранять мохо-торфяной или травяной слой. Канал опирается непосредственно на земляную призму, врезаясь в нее на глубину 10—15 *см*.

§ 9. Прокладка трубопроводов под зданиями

В городах и поселках, сооружаемых по принципу повышенной компактности застройки с блокировкой зданий или с созданием слитных комплексов домов и пешеходных галерей

(см. рис. 7), применяется прокладка городских инженерных коммуникаций в вентилируемых подпольях под зданиями. Трубопроводы при этом или подвешиваются к плитам цокольного перекрытия, или укладываются в специально предусмотренном техническом туннеле. На рис. 20 показан поперечный разрез цокольной части здания с подвесными трубопроводами, что характерно для массовой застройки крупнопанельными домами кварталов в Норильске. Трубопроводы подвешиваются на некотором расстоянии от низа перекрытия для возмож-

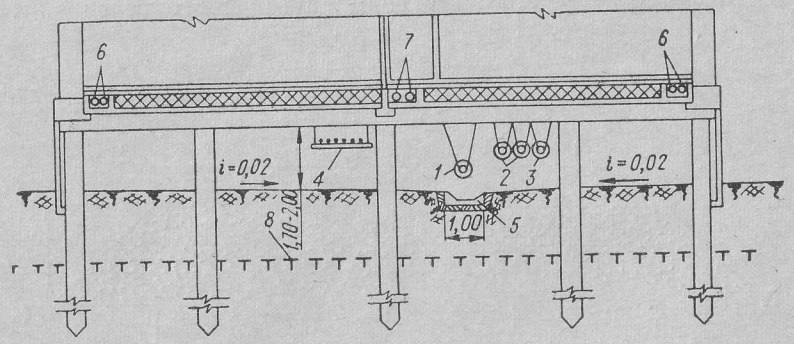


Рис. 20. Прокладка санитарно-технических коммуникаций в вентилируемом подполье здания

1 — канализация; *2* — теплосеть; *3* — магистральный водопровод; *4* — электрические кабели; *5* — лоток; *6* — отопление; *7* — внутренний горячий и холодный водопровод; *8* — верхняя граница вечномерзлой толщи грунтов

ности присоединения домовых стояков и размещения арматуры. Внутренний водопровод горячего и холодного водоснабжения и сети отопления располагаются в каналах в перекрытии здания.

Чтобы сохранить грунты основания от теплового воздействия воды при авариях с трубопроводами или при спуске ее из систем, устраивается бетонный лоток для приема этих вод. Поверхность подполья планируется с уклоном к лотку. Вода из лотка спускается в канализационный выпуск из здания. Высота подполья для удобства эксплуатации санитарно-технических коммуникаций должна быть не менее 1,4 *м*. Такая прокладка инженерных коммуникаций не загромождает территорию, экономична и удобна в эксплуатации.

Технические туннели в подполье здания, как и подземные каналы, могут быть непроходными или проходными. В первом случае доступ к трубам для осмотра и ремонта должен быть предусмотрен изнутри помещения, для чего туннель устраивается под полом коридора, имеющим съемные плиты. Это не всегда удобно, так как затрудняет планировку помещений в здании. При проходном техническом туннеле необходимо устраивать подполье высотой 2,5 *м*. Такая высота вполне оправдывается при планировке города с устройством пешеходных галерей и пассажей в комплексе со зданиями. Во многих случаях увеличение высоты подполья окажется экономически выгоднее, чем сооружение подземных санитарно-технических каналов.

В разрывах между зданиями инженерные сети прокладываются в надземных каналах, подобно тому как это было рассмотрено в предыдущем параграфе. В случае устройства соединительных галерей между зданиями (см. рис. 6) санитарно-технические трубопроводы укладывают по этим галереям.

§ 10. Магистральные трубопроводы

Подземная прокладка и прокладка в обваловании. Они осуществляются так же, как было сказано в § 5 и 7. Из-за большой протяженности магистральных трубопроводов и большого диаметра труб теплопотери достигают значительных величин и в ряде случаев приходится прибегать к теплоизоляции труб путем обкладки их слоем торфа.

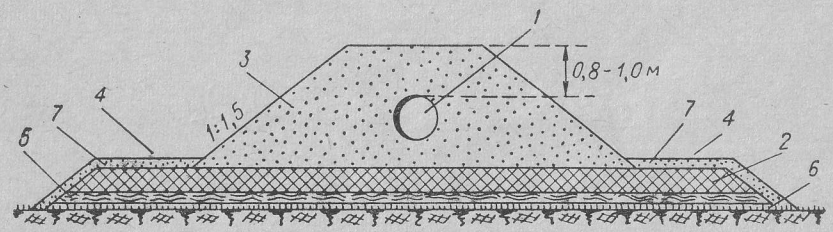


Рис. 21. Прокладка газопровода в насыпи с теплоизоляцией основания

1 — трубопровод; *2* — теплоизоляция из торфа; *3* — грунтовая засыпка; *4* — защитная берма; *5* — хворостяная выстилка (если по трассе имеется кустарник или лес); *6* — растительный слой; *7* — защитная присыпка из крупноскелетного грунта толщиной 10—12 *см*

Некоторые особенности наземной прокладки с обвалованием характерны для участков магистральных газопроводов большого диаметра. Температура газа колеблется в широких пределах: от температуры наружного воздуха в зимнее время до +70° С и выше после компрессорных станций летом. При больших диаметрах трубопровода и высоких температурах газа грунты в основании обвалования могут протаять на глубину до 15 *м* и более, так что осадки достигнут 2—3 *м* и газопровод выйдет из строя.

Чтобы избежать катастрофических просадок газопровода, приходится в этих случаях под трубой укладывать теплоизоляционный слой из минерального грунта, торфа (рис. 21) или других материалов, имеющих низкий коэффициент теплопроводности (поливинилхлорида, полистирола и т. п.). Этих мер по расчету может оказаться недостаточно или они будут не

экономичными. Тогда следует переходить на надземную открытую прокладку, опирая газопровод на отдельные невысокие опоры. Но здесь возникнут другие затруднения. Из-за высокой температуры газа и низких температур наружного воздуха в трубопроводах появятся большие температурные напряжения, что приведет к разрушению стали и разрыву сварных стыков. Поэтому открытая прокладка газопровода возможна лишь при применении труб из особо высокопрочной стали, обладающей высокой ударной вязкостью и пластичностью, или при использовании дорогой теплоизоляции труб, или, наконец, при дополнительном искусственном охлаждении газа после компримирования.

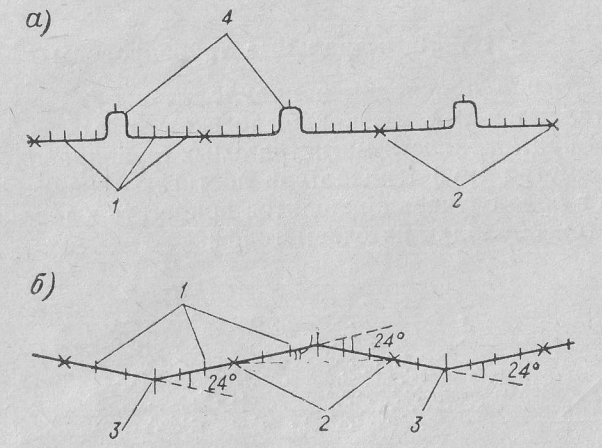


Рис. 22. Схема прокладки надземного трубопровода на отдельных опорах

а — прямолинейная; *б* — самокомпенсирующаяся; *1* — промежуточные опоры; *2* — мертвые опоры; *3* — угловые опоры; *4* — компенсаторы

При подземной прокладке и прокладке в обваловании магистральных трубопроводов необходимо по трассе трубопровода через известные промежутки устраивать контрольные пункты с автоматическим измерением температуры как транспортируемого продукта (жидкости или газа), так и грунтов основания на различных глубинах.

Надземная прокладка на отдельно стоящих опорах. Осуществляется двумя способами: прямолинейная прокладка, когда температурные деформации трубопроводов воспринимаются П-образными или сальниковыми компенсаторами, и зигзагообразная самокомпенсирующаяся прокладка (рис. 22). Практика показала, что углы поворота зигзагов выгоднее назначать равными 24°. Увеличение углов удлиняет трассу и увеличивает ширину полосы прокладки трубопровода, уменьшение

снижает устойчивость зигзага под воздействием ветровых и температурных деформаций. Длина плеч зигзагов принимается от 120 до 180 *м*, радиус изгиба около 30 *м*.

Зигзагообразную самокомпенсирующуюся прокладку рационально применять при средних диаметрах труб (300—500 *мм*). При меньшем и большем диаметрах обычно используется прямолинейная прокладка.

Жесткие и пульсирующие опоры. Жесткие опоры обычно представляют собой сваи, заглубляемые на определенную расчетную глубину $h_м$ в мерзлую толщу грунта. Для магистральных трубопроводов в большинстве случаев требуются

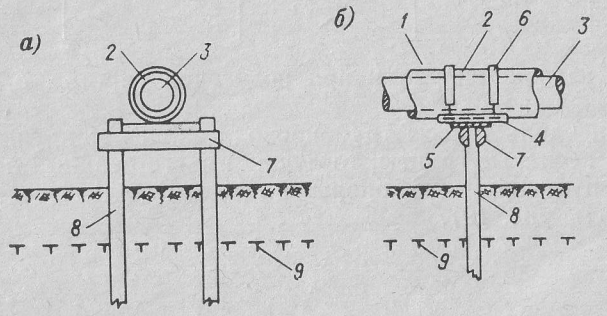


Рис. 23. Двухсвайная опора, на которой расположен трубопровод с теплоизоляцией из скорлуп

а — поперечный разрез; *б* — боковой вид; *1* — гидроизоляция; *2* — теплоизоляция; *3* — трубопровод; *4* — опорный металлический башмак; *5* — металлическая подкладка; *6* — хомуты из полосовой стали; *7* — поперечные схватки; *8* — сваи; *9* — верхняя граница вечномерзлых грунтов

двухсвайные и даже четырехсвайные опоры. На рис. 23 показана двухсвайная опора под трубопровод с теплоизоляцией из скорлуп. Для сохранности теплоизоляции трубопровод скреплен с башмаком хомутами из полосовой стали. При перемещениях от температурных напряжений башмак, жестко скрепленный с трубопроводом, скользит по металлической прокладке.

Высота опор определяется по рельефу местности, причем наименьшая высота должна быть такой, чтобы от низа трубопровода до поверхности грунта было не менее 30 *см*. Для трубопроводов, укладываемых по самокомпенсирующемуся зигзагообразному контуру, высота опор должна быть такова, чтобы трубы не заносились снегом.

Расстояние между опорами определяется расчетом в зависимости от диаметра и веса 1 *пог. м* трубы и от давления ветра с учетом возможного явления резонанса. В табл. 2 приведены ориентировочные расстояния между опорами магистральных газопроводов для двух вариантов прокладки:

Таблица 2

Расстояние между опорами магистральных газопроводов в *м*

Диаметры труб в *мм*	Скользящая система		Подвесная система	
	мертвые опоры	промежуточные опоры	мертвые опоры	промежуточные опоры
325	108—184	18—23	96—128	12—16
426	132—216	22—27	112—144	14—18
529	150—240	25—30	128—160	16—20
720	156—248	26—31		
820	168—254	28—33		
1020	180—280	30—35		

при скользящих опорах и при подвесной системе, о которой будет сказано ниже*.

Если вдоль трассы трубопровода залегают крупноскелетные или песчаные грунты, то лучше вместо свайных опор применять пульсирующие опоры в виде отдельных земляных призм (см. рис. 19).

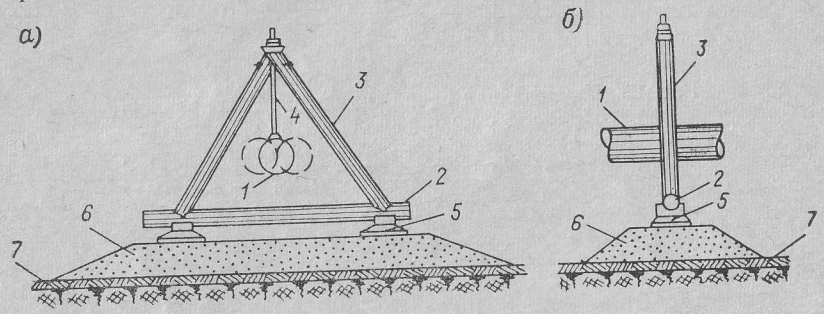


Рис. 24. Подвесная качающаяся деревянная опора

а — вид вдоль оси трубопровода; *б* — вид сбоку; *1* — трубопровод; *2* — деревянная затяжка диаметром 16—20 *см*; *3* — наклонная деревянная нога диаметром 16—20 *см*; *4* — стальная подвеска; *5* — железобетонный опорный башмак; *6* — подсыпка из крупноскелетного грунта; *7* — мохо-растительный покров

Качающиеся опоры. К особому виду опор относятся свободно качающиеся подвесные опоры при прокладке трубопроводов по зигзагообразному самокомпенсирующемуся контуру с подвеской труб выше снегового покрова. Такие опоры можно применять при трубах диаметром до 500 *мм*. На рис. 24 показана подвесная опора, устанавливаемая непосредственно на поверхность невысокой песчано-гравийной подсыпки. Наклонные ноги опоры опираются на железобетонные башмаки.

* Таблица заимствована из статьи В. В. Спиридонова «Особенности строительства магистральных газопроводов в районах вечной мерзлоты». В сб. научных работ АКХ. Вып. XII. Изд. АКХ, 1962.

Трубопровод своим весом придает устойчивость конструкции, а продольные температурные перемещения трубопровода не вызывают изгибающего момента в ногах опоры. В качестве качающихся опор может применяться металлическая рама, изготовляемая из труб диаметром 90—100 *мм* на сварке.

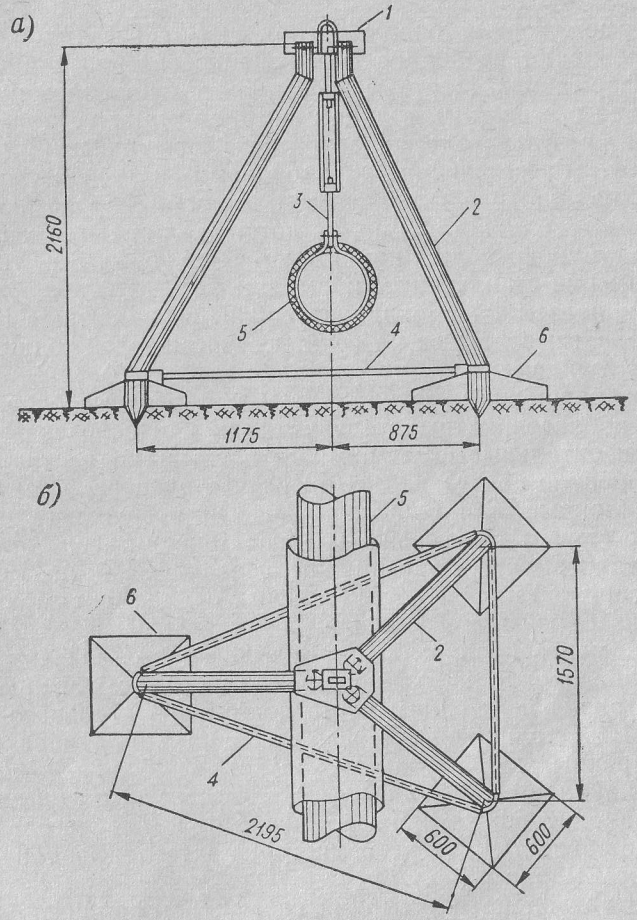


Рис. 25. Треугольная опора для подвески водовода

а — вид сбоку; *б* — вид сверху; *1* — головка опоры; *2* — нога опоры из металлических труб диаметром 114 × 5 *мм*; *3* — подвеска диаметром 30 *мм*; *4* — связь из уголковой стали; *5* — труба диаметром 426 × 8 *мм* в теплоизоляции; *6* — железобетонная подушка

На одном из участков водовода в Кайерканском угольном районе при зигзагообразном самокомпенсирующемся контуре применена опора специальной конструкции (рис. 25). Она представляет собой треногу, изготовленную из металлических труб диаметром 114×5 *мм*. Ноги опираются на железобетонные

башмаки, установленные непосредственно на поверхность грунта. Такой способ прокладки не требует устройства компенсаторов и мертвых опор *.

§ 11. Промежуточные и мертвые опоры

Промежуточные опоры воспринимают вес трубопровода и обеспечивают свободное перемещение его при температурных деформациях. Мертвые опоры фиксируют положение трубопровода в известных точках и воспринимают усилия, возникающие в результате температурных деформаций и внутреннего давления. Расстояние между опорами и усилия, передаваемые на них, рассчитываются обычными методами. Опорные части, т. е. конструкции, на которые опираются непосредственно трубопроводы, принимаются по обычным типовым проектам или стандартным нормалям.

При надземной прокладке усилия, возникающие в мертвых опорах, передаются на грунты вечномерзлой толщи через свайные фундаменты.

Сваи, являющиеся фундаментом для мертвых опор, работают в неблагоприятных условиях, так как передаваемые на них горизонтальные силы намного превышают вертикальную составляющую нагрузки. В этом случае следовало бы применять наклонные сваи. Однако техника их погружения в вечномерзлые грунты только еще начинает внедряться.

В зависимости от величины передаваемой на мертвую опору горизонтальной силы свайный фундамент может состоять из одной или нескольких вертикальных свай. Пример решения мертвой опоры с одной железобетонной сваей при канальной прокладке теплосети совместно с водопроводом дан на рис. 26. Опорная часть состоит из стального листа 150×800 *мм* толщиной 8 *мм*, укрепленного на оголовке сваи и приваренных к этому листу уголков. В сборных железобетонных каналах оголовок сваи, на котором укреплена опорная часть, заходит внутрь канала (рис. 26, *а*), для чего в плите днища пробивается отверстие, которое затем замоноличивается бетоном марки 200.

Мертвая опора с четырьмя сваями под топливопровод в две нитки, воспринимающая значительное горизонтальное усилие (около 10 *т*), показана на рис. 27. Все четыре сваи связаны между собой в одну жесткую систему с помощью квадратной рамы из швеллеров № 16. Поверх этих связей смонтированы отрезки швеллера № 24, в которых уложены

---

* Г. В. Михайлов. Водоснабжение Кайерканского угольного района Норильского комбината. В сб.: «Водоснабжение и канализация населенных мест в районах Сибири и Крайнего Севера». Труды ЛИСИ, вып. 2. Изд. ЛИСИ, 1964.

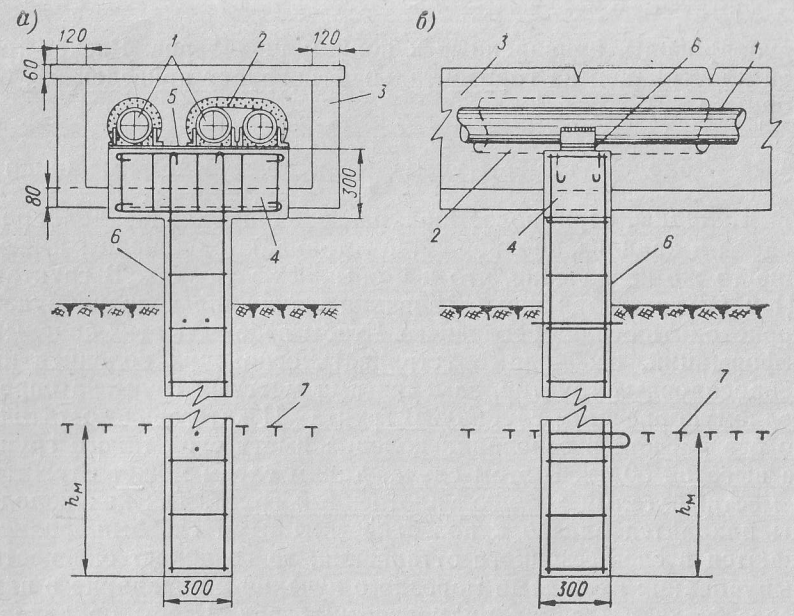


Рис. 26. Мертвая опора с одной железобетонной сваей

а — поперечный разрез; *б* — продольный разрез; *1* — трубопровод; *2* — изоляция; *3* — железобетонный надземный канал; *4* — железобетонная балка; *5* — стальной лист 150 × 800 *мм*, толщиной 8 *мм*; *6* — железобетонная свая; *7* — верхняя граница вечномерзлых грунтов

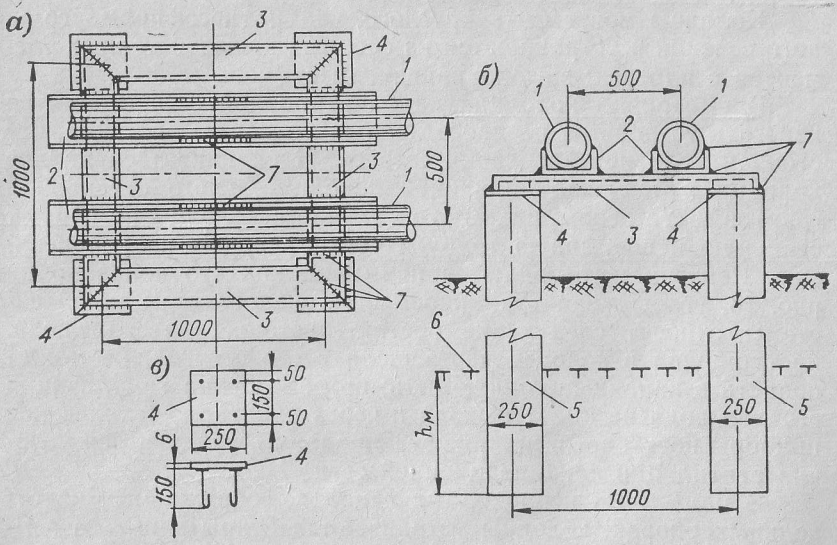


Рис. 27. Мертвая свайная опора при больших горизонтальных нагрузках

а — вид сверху; *б* — вид сбоку; *в* — деталь закладной части на оголовке железобетонной сваи; *1* — трубопроводы; *2* — швеллер № 24; *3* — швеллер № 16; *4* — закладная деталь; *5* — железобетонные сваи сечением 25 × 25 *см*; *6* — верхняя граница вечномерзлых грунтов; *7* — сварные швы

трубопроводы, приваренные к полкам швеллеров. Расчет такой конструкции на горизонтальную нагрузку приведен в § 44 (пример 35).

§ 12. Колодцы, камеры управления, компенсаторные ниши

Колодцы. При подземной раздельной укладке водопроводной и канализационной сетей устраиваются колодцы, имеющие то же назначение, что и в обычных условиях. В грунтах III и IV категорий при оттаивании основания колодца будет происходить осадка последнего. Чтобы избежать этих опасных деформаций, необходимо устраивать основания колодцев из непросадочных грунтов, заменяя ими местный грунт на определяемую расчетом глубину. В грунтах II категории достаточно без расчета в основании колодца иметь слой такого грунта высотой 50 *см*. В этом случае таким слоем может служить и местный талый хорошо уплотненный грунт. Так как колодцы находятся близко к поверхности, иными словами, размещаются в слое сезонного оттаивания, то возникает опасность выпучивания их силами морозного пучения и попадания в них через щели в стенках надмерзлотных вод. Чтобы предохранить колодец от таких явлений, вокруг него устраивают обсыпку из непучинистого грунта, а в нижней части — стенку из глинобетона толщиной 30 *см*. Такой же слой глинобетона укладывают и под днищем колодца.

Колодцы могут быть круглого, квадратного, прямоугольного сечений и устраиваются из сборных железобетонных элементов с плотным замоноличиванием стыков.

В смотровых колодцах канализационной сети стремятся избегать устройства на дне открытых лотков из опасения, что сточная вода при засорении сети будет скапливаться на дне колодца и послужит причиной дополнительного оттаивания грунтов в его основании. В этом случае в колодцы помещают стальную непрерывную трубу и устанавливают на ней ревизию. Ревизии изготовляются прямыми, как это показано на рис. 28, угловыми и тройниковыми. К недостаткам такой системы относят следующие обстоятельства: грунтовая вода, поступившая в колодец через щели в его стенках, не может попасть в канализационную сеть; при засорении канализации сточная вода не имеет выхода и через санитарно-технические приборы поступает в нижние этажи зданий; ухудшаются условия вентиляции канализационной сети.

В надземных непроходных каналах, сооружаемых на отдельных опорах, колодцы устраиваются открытыми, без земляной обсыпки, но с теплоизоляцией стенок. На рис. 29 приведен пример колодца, установленного на непроходном канале, в котором укладываются сети тепло- и водоснабжения. Канал здесь опирается на отдельные пульсирующие опоры в виде

земляных призм (см. рис. 19). Стенки с внутренней стороны и дно колодца теплоизолированы. Колодец имеет съемную крышку, состоящую из двух рядов досок, между которыми уложен слой теплоизоляции.

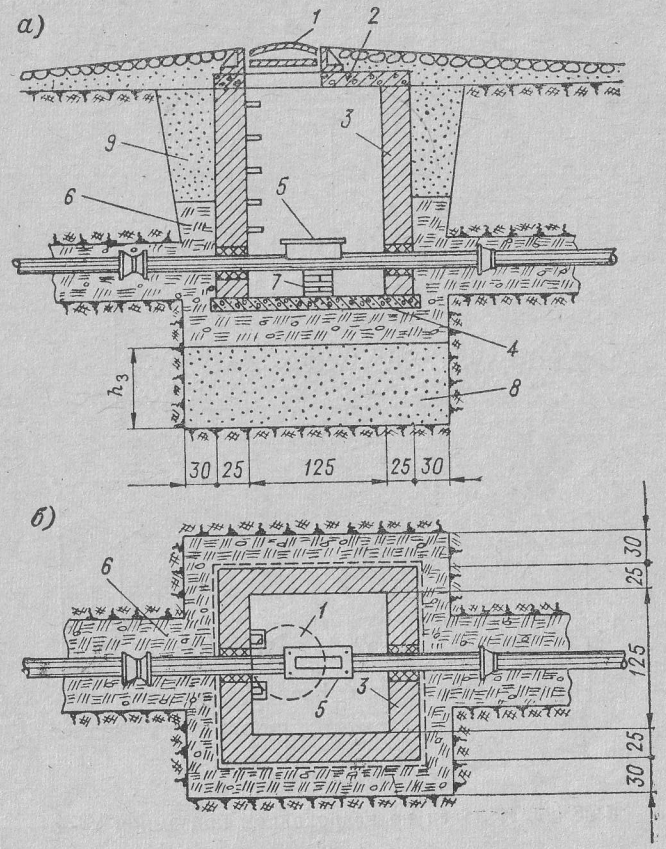


Рис. 28. Канализационный колодец с линейной ревизией

а — разрез; *б* — план; *1* — стандартный чугунный люк; *2* — железобетонная плита; *3* — кирпичная стенка, оштукатуренная с двух сторон, или сборные железобетонные блоки с обмазкой битумом; *4* — железобетонное днище; *5* — стальная сварная ревизия; *6* — глинобетон; *7* — опора из кирпича или бетона; *8* — песчано-гравийная подсыпка или местный протаянный и уплотненный грунт; *9* — засыпка непучинистым грунтом

При переходе наземной канальной прокладки в подземную колодцы устраиваются по типу, показанному на рис. 30. В данном случае это канализационный колодец, установленный на выпуске канализации из здания аэровокзала в одном из арктических аэропортов. Из подземного участка сети

сточные воды принимаются в сборный подземный резервуар. Колодец выполнен в монолитном железобетоне марки 150, стенки его не имеют теплоизоляции, так как канализационные трубы в каналах уложены с тепловым сопровождением, имеющим целью предохранить сточные воды от замерзания и обо-

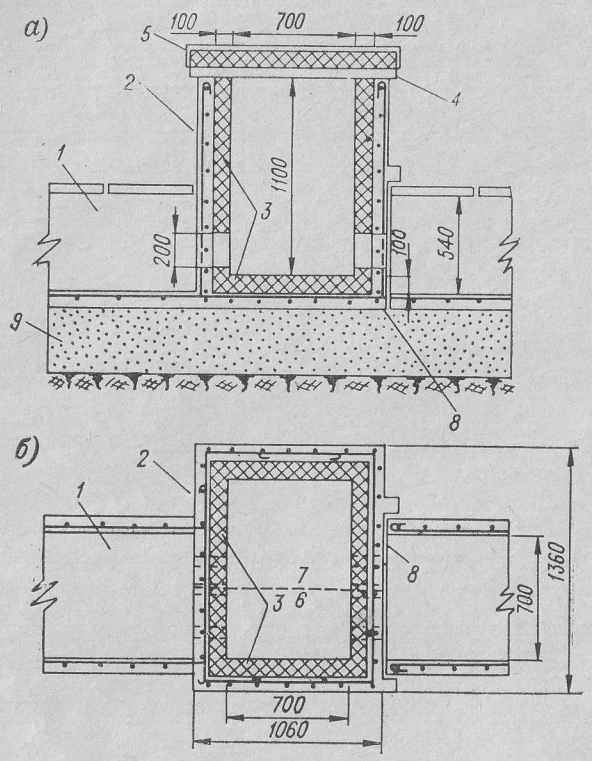


Рис. 29. Колодец на непроходном надземном канале

а — продольный разрез по каналу; *б* — план; *1* — железобетонный канал; *2* — колодец; *3* — теплоизоляция стенок и дна колодца; *4* — железобетонная плита; *5* — теплоизоляционный слой, крытый одним рядом рубероида; *6* — верх колодца, прикрытый железобетонной плитой; *7* — верх колодца, прикрытый съемной деревянной крышкой (доски 2,5 *см*, теплоизоляция 10 *см*, доски 2,5 *см*); *8* — температурный шов; *9* — подсыпка под канал из непучинистого крупноскелетного грунта

греть сборный резервуар. Стенки подземной части колодца обрамлены пропитанными деревянными брусьями. Такие же брусья уложены под дном колодца и под подземным каналом для уменьшения теплоотдачи от колодца и канала в грунт. Брусья связаны между собой проволокой, а швы между ними тщательно проконопачены мхом.

Сетевая арматура обычного типа — задвижки линейные и сбросные, пожарные гидранты, воздушные вантузы, аэрационные клапаны и т. п. — могут работать лишь в среде с положительной температурой, что усложняет эксплуатацию на Крайнем Севере и требует отопления колодцев. Сейчас начинает все шире и шире применяться специальная арматура для Крайнего Севера *.

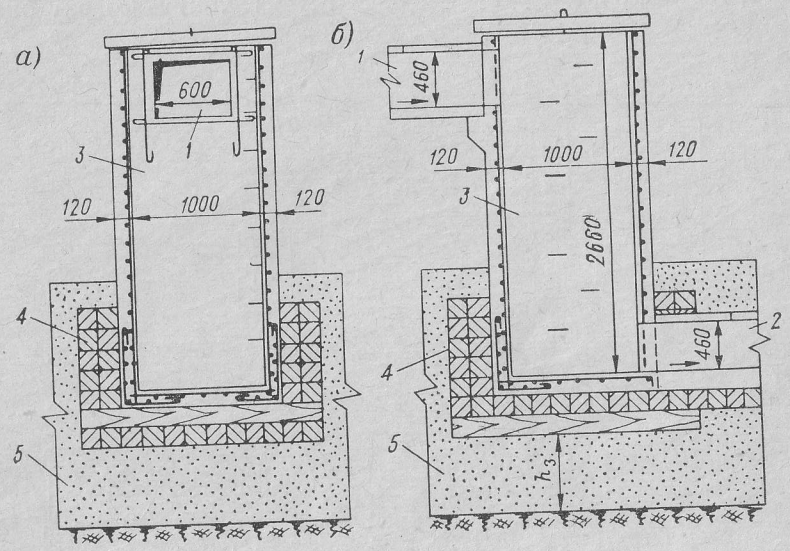


Рис. 30. Колодец в месте перехода надземной канальной прокладки в подземную

а — поперечный разрез; *б* — продольный разрез; *1* — надземный санитарно-технический канал; *2* — то же, подземный; *3* — железобетонный колодец из бетона марки 150; *4* — антисептированные деревянные брусья сечением 15 × 15 *см*; *5* — непучинистый крупноскелетный грунт

Компенсаторные ниши и камеры управления. При канальной надземной и подземной прокладке трубопроводов на сети устраиваются компенсаторные ниши и камеры управления. В принципе конструкция их отличается от конструкции самих каналов только габаритами. Если трубопроводы в каналах уложены в теплоизоляции, то компенсаторные ниши устраиваются холодными и трубы пропускаются по ним также в слое теплоизоляции. Стенки и днище камер управления при

---

* В задачу настоящей книги не входит описание такой арматуры. Желающих ознакомиться с ней отсылаем к статье А. В. Лютова. «Незамерзающая водопроводная арматура» в сб.: «Строительство в районах Восточной Сибири и Крайнего Севера», № 3, 1962 (Красноярск) и к «Альбому санитарно-технических коммуникаций населенных мест в районах распространения вечномерзлых грунтов». Изд. Промстройниипроекта, Красноярск, 1967.

совместной прокладке сетей тепло- и водоснабжения утепляются с внутренней стороны. На сетях, предназначенных только для теплоснабжения, камеры управления не теплоизолируются.

На рис. 31 показана компенсаторная ниша, устраиваемая на сетях канальной надземной прокладки в сборных железобетонных каналах прямоугольного сечения (см. рис. 18). Ниша опирается на железобетонные сваи, заглубленные в вечномерзлую толщу грунтов на расчетную глубину. Сверху она

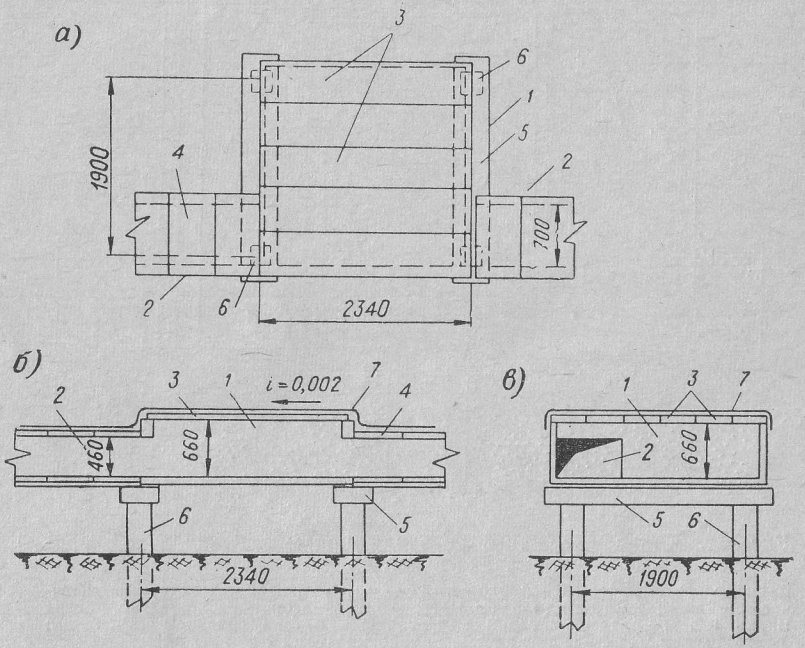


Рис. 31. Компенсаторная ниша на надземных сетях тепло- и водоснабжения

а — план; *б* — продольный разрез по оси канала; *в* — поперечный разрез; *1* — компенсаторная ниша; *2* — канал для совмещенной прокладки трубопроводов; *3* — железобетонные плиты покрытия компенсаторной ниши; *4* — то же, покрытия канала; *5* — железобетонные балки; *6* — железобетонные сваи квадратного сечения; *7* — слой гидроизоляции

перекрывается сборными железобетонными плитами. Стенки и днища выполняются монолитными из железобетона марки 200.

Пример устройства камеры управления на надземных каналах, сооружаемых по типу рис. 18, приведен на рис. 32. Перекрытие камер несъемное, устраиваемое из железобетонных плит. В нем предусматривается лаз. Последний перекрывается дощатым щитом из двух слоев досок толщиной 2,5 *см* с прослойкой из войлока толщиной 2 *см*. Для отепляемых камер управления стенки, днище и плиты верхнего перекрытия с внутренней стороны покрываются слоем теплоизоляции.

Устройство компенсаторных ниш в подземных каналах сложно. Поэтому желательно их не делать, что возможно при применении сальниковых компенсаторов. Однако последние в условиях Крайнего Севера работают плохо, так как очень чувствительны к перекосам и смещениям труб. На водоводах смерзание сальниковых компенсаторов приводит к разрывам трубопроводов. Этих недостатков не имеет самоуплотняющийся компенсатор А. В. Лютова (см. примечание на стр. 47), где уплотнение происходит под давлением жидкости, протекающей по трубопроводу.

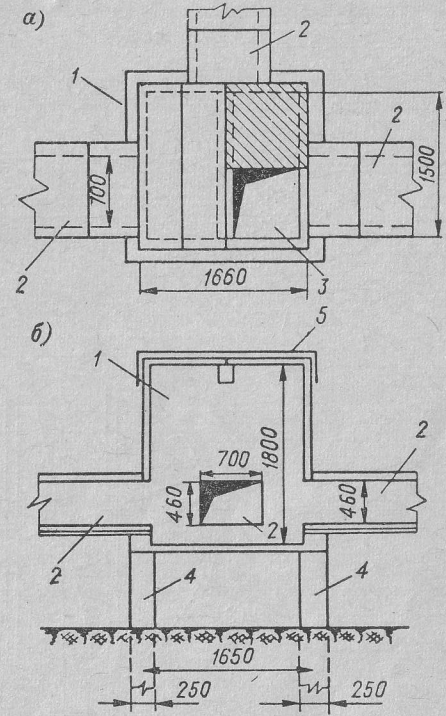


Рис. 32. Камера управления на надземных сетях тепло- и водоснабжения

а — план; *б* — разрез; *1* — камера управления; *2* — канал для прокладки теплосети; *3* — лаз, перекрытый утепленным деревянным щитом; *4* — железобетонные сваи квадратного сечения; *5* — слой гидроизоляции

§ 13. Резервуары для сбора сточных вод

При отсутствии централизованной канализации для приема сточных вод от группы зданий или от одного здания устраиваются сборные резервуары. Они представляют собой колодец определенной расчетной емкости, из которого сточная жидкость периодически удаляется путем откачки ассенизационными машинами. К резервуарам предъявляются два основных требования: они должны быть хорошо теплоизолированы, чтобы сточная вода не замерзала, и хорошо гидроизолированы для предотвращения эксфильтрации и инфильтрации через стенки резервуара. Сточная жидкость в резервуаре всегда должна иметь положительную температуру, поэтому в резервуар пар или горячая вода подается по трубам, которые укладываются вместе с подающими канализационными трубами в общей теплоизоляции. Пар и вода поступают в обогревательные змеевики, устанавливаемые непосредственно в самом резервуаре. Вопрос о поддержании необходимой температуры сточной жидкости может быть также решен с помощью

электрообогрева путем применения трубчатых электронагревателей.

Площадки для устройства сборных резервуаров желательно выбирать в пониженных местах, чтобы обеспечить

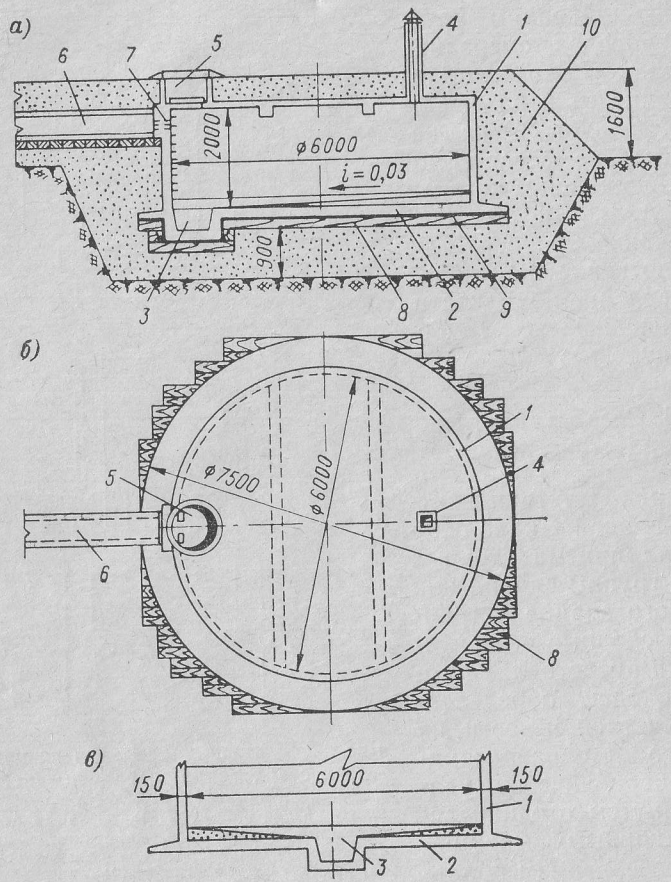


Рис. 33. Полузаглубленный железобетонный резервуар для сбора сточных вод

а — разрез резервуара по оси подводящей трубы; *б* — вид сверху; *в* — поперечный разрез; *1* — железобетонная стенка; *2* — днище резервуара; *3* — приямок глубиной 40 *см*; *4* — утепленная деревянная шахта; *5* — люк; *6* — канал для прокладки подводящей трубы канализации; *7* — сальники в месте ввода трубы; *8* — деревянные брусья 20 × 20 *см*; *9* — слой рубероида на битумной мастике; *10* — засыпка крупноскелетным грунтом

необходимый уклон для подводящих труб, а само сооружение можно выполнять наземным или полуподземным. В этих случаях отпадает необходимость защиты от надмерзлотных вод. Пример такого сооружения приведен на рис. 33, где показан

сборный резервуар для сточных вод, отводимых от здания аэровокзала арктического аэропорта. Сооружение представляет собой железобетонный полузаглубленный колодец с внутренним диаметром 6 *м*. Под колодцем местный грунт заменен непучинистым крупноскелетным грунтом на глубину 90 *см*. Таким же грунтом сделана и засыпка стенок колодца. Наружные стенки резервуара покрыты горячим битумом за

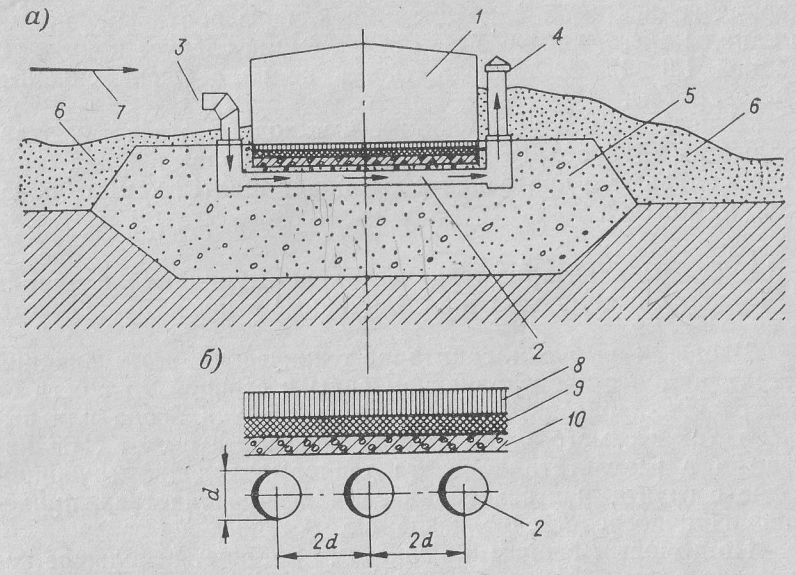


Рис. 34. Резервуар для сбора сточных вод на подсыпке

а — резервуар; *б* — деталь укладки вентиляционных труб в подсыпке; *1* — резервуар для сточной жидкости; *2* — трубы для охлаждения основания сооружения морозным воздухом; *3* — приток воздуха; *4* — вытяжка; *5* — подсыпка из крупноскелетного грунта; *6* — снегоотложения; *7* — направление ветра; *8* — днище резервуара; *9* — слой теплоизоляции; *10* — плита основания

два раза, внутри колодец торкретирован цементным раствором на пуццолановом цементе. Подводящий канал с канализационной трубой и тепловым сопровождением уложен наземно с обсыпкой грунтом. Для теплоизоляции днища и уменьшения глубины замены грунта под колодцем уложены пропитанные креозотом сосновые брусья. Такие же брусья уложены и под дном канала.

В описанном случае мы имели дело с грунтами II категории и можно было ограничиться незначительной глубиной замены грунта в основании сооружения. При грунтах IV категории, а в большинстве случаев и при грунтах III категории можно сооружать только наземные резервуары с сохранением мерзлого состояния грунта в их основании, т. е. с устройством под резервуаром вентиляционных каналов из стальных или

асбоцементных труб, уложенных в песчано-гравийной подсыпке под сооружением (рис. 34). Зимой по этим трубам циркулирует морозный воздух, промораживая слои грунта, оттаявшие за лето. Число труб и их диаметр определяются расчетом и зависят от характера грунтов и климатических условий местности*.

В каналах необходимо иметь задвижки, чтобы не увеличивать глубину оттаивания грунта под резервуаром в теплый период года. Зимой надо принимать меры против попадания в каналы снега, для чего высоту подсыпки следует принимать равной 1,2—1,5 *м*, если местность не подвержена сильным снегозаносам.

В последнем случае входные и выходные отверстия охлаждающих труб объединяются общими каналами и над ними устанавливаются приточная и вытяжная шахты, как это показано на рис. 34.

§ 14. Вводы санитарно-технических коммуникаций в здания и домовые канализационные выпуски

Вводы и выпуски санитарно-технических коммуникаций устраиваются с предохранением воды и сточной жидкости от замерзания и обеспечением устойчивости как ввода или выпуска, так и самого здания. Устойчивость эта может быть нарушена в результате контакта тепловыделяющих трубопроводов с грунтами в основании здания и на участках, прилегающих непосредственно к зданию.

По домовым вводам и выпускам протекает небольшое количество воды или сточной жидкости и неравномерность расхода по часам суток отмечается в большей степени, чем на уличных сетях. Во время минимального отведения сточных вод трубы обрастают отложениями инея и в них начинают образовываться наледи. Для предотвращения замерзания вводов и выпусков принимают следующие меры:

1) принудительный сброс водопроводной воды в канализационную сеть через домовые приборы (так называемые «холостые сбросы»);

2) прокладку труб канализационного выпуска с «тепловым сопровождением», т. е. прокладку специального трубопровода с теплоносителем рядом с канализационной трубой в общей теплоизоляции;

3) постоянную циркуляцию воды в водопроводном вводе, когда весь расход или часть его непрерывно циркулирует через ввод благодаря устройству его по типу «петли»;

* Расчет таких охлаждающих труб в подсыпке дается в «Пособии по проектированию оснований и фундаментов зданий и сооружений на вечномерзлых грунтах». Стройиздат, 1969.

4) электрообогрев канализационных выпусков и водопроводных вводов;

5) надежную теплоизоляцию труб.

Холостые сбросы и тепловое сопровождение. Холостые сбросы как средство защиты вводов и выпусков от замерзания достаточно эффективны, но требуют дополнительного расхода воды. В зависимости от этажности и степени благоустройства зданий на холостые сбросы требуется от 15 до 125 *л/сутки* воды на 1 человека. Поэтому такой способ следует допускать в исключительных случаях, если другие средства защиты от замерзания вводов и выпусков окажутся по местным условиям экономически неоправданными.

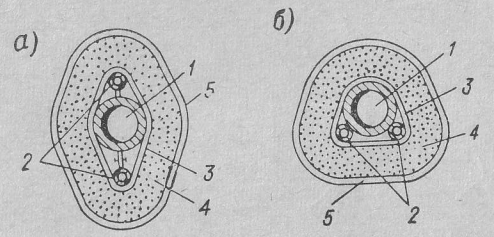


Рис. 35. Совместная прокладка труб в одной теплоизоляции при тепловом сопровождении

а — при подвеске трубопровода на крюках; *б* — при укладке трубопровода на отдельных опорах; *1* — канализационная труба; *2* — трубы теплового сопровождения; *3* — металлическая сетка; *4* — теплоизоляция; *5* — асбестоцементная штукатурка

Тепловое сопровождение канализационных труб и водопроводных вводов — способ очень надежный и часто применяемый в условиях Крайнего Севера, но требует дополнительного расхода тепла на обогрев труб, который может быть определен расчетом (см. § 32). Тепловое сопровождение представляет собой петлю, отводимую от сети теплоснабжения здания, причем обе трубы — подающая и обратная — укладываются вместе с обогреваемой трубой в общей теплоизоляции (рис. 35). Метод расчета теплоизоляции вводов и выпусков изложен ниже (см. § 30).

Постоянная циркуляция воды в вводах. Устройство водопроводного ввода по типу «петля» для постоянной циркуляции воды в вводе осуществляется по трем возможным схемам (рис. 36). Первая схема (рис. 36, *а*) применяется при диаметре наружной магистрали до 100 *мм*. Достоинство ее заключается в том, что циркуляция воды в вводе происходит независимо от расхода ее в самом здании даже при ничтожно малых скоростях в наружной сети. Недостатки схемы — необходимость выключения наружной магистрали при аварии на вводе. Схема вторая и третья (рис. 36, *б* и *в*) применяются

при диаметре наружной сети более 100 *мм*. Недостаток их — ненадежность работы при малых расходах в питающей сети. Общим недостатком конструкции типа «петля» является значительное увеличение сопротивлений в наружной сети при пожарных расходах.

Обеспечение незамерзаемости воды в вводе при помощи устройства «петли» было опробовано в Норильске, но опыт оказался не вполне удачным: не обеспечивался пропуск пожарных расходов и имели место случаи замерзания вводов в часы минимального водоразбора. Однако опытом Фэрбенкса (Аляска) доказано, что такая система может работать

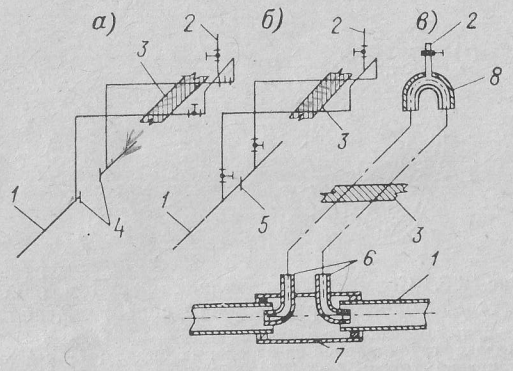


Рис. 36. Устройство водопроводного ввода по типу „петли“

а — при диаметре наружной магистрали до 100 *мм*; *б* и *в* — при диаметре наружной магистрали более 100 *мм*; *1* — наружная сеть; *2* — к разводящей сети здания; *3* — стена здания; *4* — заглушки; *5* — диафрагма; *6* — вставка типа Пито — Дарси; *7* — муфта; *8* — петля ввода

вполне удовлетворительно в климатических условиях, сходных с условиями Норильска. Там ввод осуществлен двойными медными трубами с петлей у места водопотребления.

Подземные и надземные вводы-выпуски. Как и уличные сети санитарно-технических коммуникаций, вводы и выпуски прокладываются подземно и надземно, в каналах и без каналов. При этом во всех случаях прокладки следует сокращать количество домовых вводов и выпусков путем соответствующего проектирования внутридомовых и наружных питающих сетей. Вводы и выпуски следует располагать посередине между соседними опорами фундаментных балок и, по возможности, в увеличенных пролетах, а сами опоры — сваи, стойки, кусты свай, ближайшие к вводам и выпускам, заглублять в мерзлую толщу грунтов на бóльшую величину по сравнению с другими фундаментами здания. При всех конструктивных решениях вводов и выпусков принимаются меры, предохраняющие от попадания воды в грунты основания зданий при утечках и опорожнении сетей.

Подземная бесканальная прокладка вводов и выпусков устраивается, как это показано на рис. 37, и возможна только в грунтах I и II категорий. Конструкция канализационного выпуска возможна в двух вариантах: с выпуском за пределы здания (рис. 37, *а*) и с выпуском в подполье здания

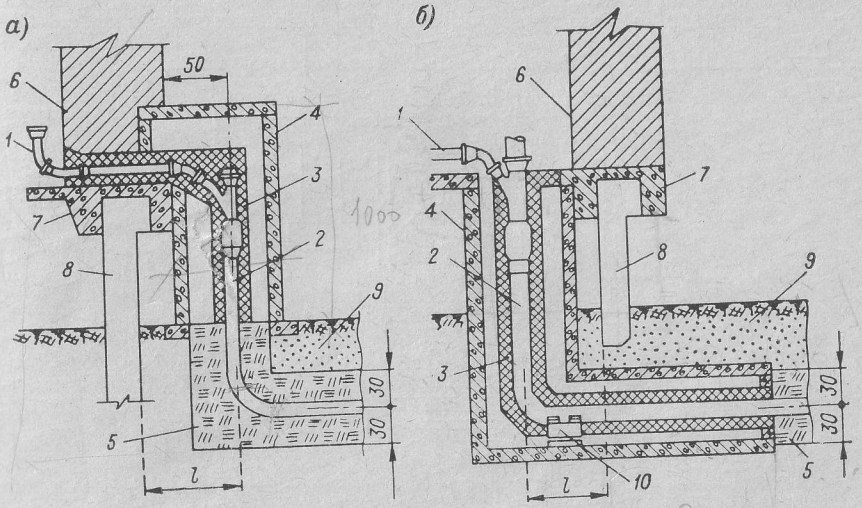


Рис. 37. Подземный канализационный выпуск

а — выпуск за пределами здания; *б* — выпуск в подполье здания; *1* — чугунная труба; *2* — стальная труба; *3* — теплоизоляция; *4* — железобетонное ограждение; *5* — глинобетон; *6* — наружная стена здания; *7* — перекрытие над вентилируемым подпольем *l*; *8* — столбчатый фундамент; *9* — засыпка талым грунтом; *10* — скользящая опора

(рис. 37, *б*). Безопасное расстояние от трубопровода до фундаментов здания (расстояние *l* на рис. 37) должно назначаться по расчету (см. § 39). Стальную трубу выпуска теплоизолируют и защищают железобетонным ограждением. За пределами последнего труба не теплоизолируется и укладывается в слое глинобетона толщиной 30 *см*, что предохраняет грунты от попадания в них сточной жидкости при возможных утечках. Возможность прокладки выпуска по всей длине до контрольного колодца уличной сети без теплоизоляции должна быть проверена расчетом. Во всяком случае такая конструкция ненадежна без принятия дополнительных мер против замерзания сточной жидкости, например без принудительных сбросов водопроводной воды в канализационную сеть. В грунтах III и IV категорий конструкция будет разрушаться силами морозного пучения и деформироваться от просадок при протаивании грунтов в теплый период года.

Надземный бесканальный выпуск или ввод по конструкции мало отличается от надземной бесканальной прокладки трубопроводов на отдельных опорах (см. § 7). Трубы укладываются в теплоизоляции, которая рассчитывается так, чтобы вода или сточная жидкость на участке ввода или выпуска

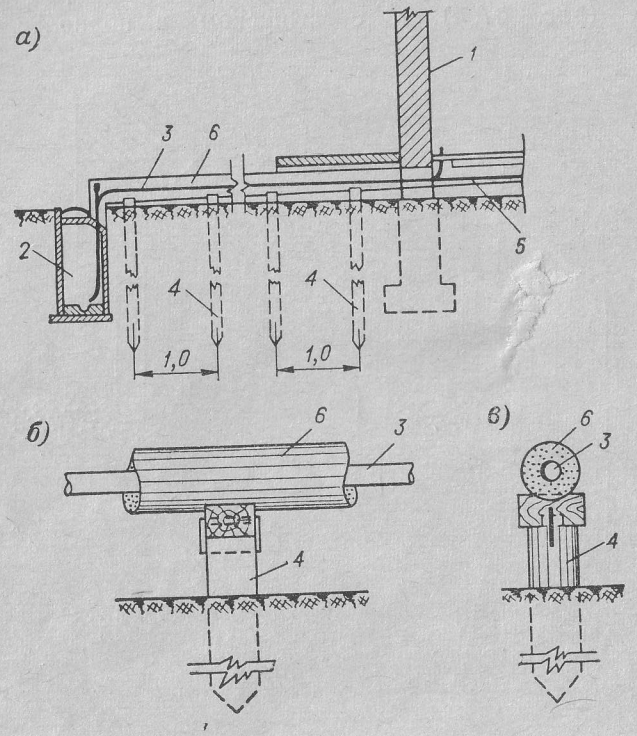


Рис. 38. Надземный канализационный выпуск на отдельных опорах

а — продольный разрез; *б* и *в* — детали наружной прокладки; *1* — стена здания; *2* — канализационный колодец; *3* — канализационная труба выпуска; *4* — деревянные сваи диаметром 18 *см*; *5* — канализационная труба на подвесках к цокольному перекрытию здания; *6* — теплоизоляция трубы

не замерзала (см. § 30). Благодаря отсутствию контакта тепловыделяющих труб с грунтом конструкция не влияет на термический режим мерзлой толщи последних, поэтому такая система может применяться в любых грунтах, в том числе и в грунтах IV категории.

В качестве примера надземного бесканального канализационного выпуска на рис. 38 приведен выпуск, примененный в Воркуте. Он сооружен на свайных опорах на участке от магистрального подземного коллектора до наружной стены здания. Выпуск в пределах здания решен путем подвески труб

к цокольному перекрытию над вентилируемым подпольем. К недостаткам описанной конструкции относятся загромождение проезда вдоль здания и необходимость частых ремонтов термоизоляции труб (см. § 7), поэтому бесканальную надземную прокладку вводов-выпусков не следует рекомендовать в обычных условиях, допуская ее устройство лишь для временных зданий или во временных поселках. В постоянных населенных местах лучше всегда идти на более дорогую, но зато надежную в эксплуатации надземную прокладку вводов-выпусков в каналах, как это указано на рис. 39, где пред-

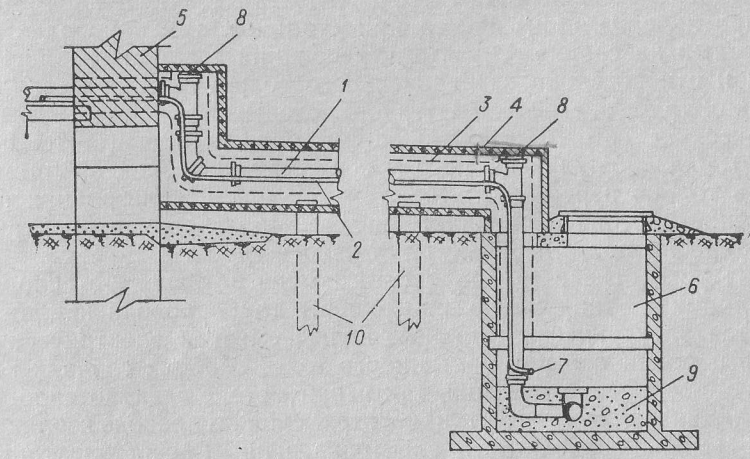


Рис. 39. Надземный канализационный выпуск в канале

1 — канализационная труба; *2* — труба теплового сопровождения диаметром 32 *мм*; *3* — теплоизоляция; *4* — защитный короб; *5* — стена здания; *6* — канализационный колодец; *7* — кран для опорожнения петли теплового сопровождения; *8* — прочистка; *9* — бетон марки 90; *10* — опоры

ставлен надземный канализационный выпуск с тепловым сопровождением. Канализационная труба здесь помещена в общей теплоизоляции с трубами теплового сопровождения (см. рис. 35, *б*).

Если уличная сеть санитарно-технических трубопроводов укладывается в надземных каналах, в которых совмещены трубы различного назначения, то вводы-выпуски в здания устраиваются как ответвления от магистральных линий в виде надземных каналов той же конструкции. Обычно стараются дать лишь один ввод-выпуск с разводкой труб непосредственно под зданием в вентилируемом подполье, где трубы подвешиваются к цокольному перекрытию.

Если санитарно-технические коммуникации прокладываются в подземных каналах, то вводы-выпуски устраиваются также в подземных каналах той же конструкции, но меньших габаритов.

§ 15. Электрический обогрев трубопроводов

Способ электрического обогрева трубопроводов за последнее время нашел широкое применение как у нас в стране, так и за рубежом. Одним из основных преимуществ электрообогрева является возможность применения дистанционного управления и полной автоматизации.

Электрообогрев трубопроводов осуществляется двумя путями: способом сопротивления и способом электротепловой изоляции. В первом способе труба играет роль сопротивления и непосредственно включается в электрическую цепь. Метод сопротивления применяется при стальных трубопроводах со стыками на сварке. С учетом требований техники безопасности и относительно незначительного сопротивления металлических труб, обогреваемые трубопроводы включаются в электрическую сеть при пониженном напряжении (не свыше 65 *в*). Для обогрева по методу сопротивления следует применять только переменный ток, так как при использовании постоянного тока возникает явление электролиза, ведущее к коррозии металла и быстрому износу труб.

При обогреве трубопроводов по способу электротепловой изоляции на наружную поверхность трубопровода накладывается электрический провод, включаемый в электрическую сеть переменного или постоянного тока. В обоих случаях как при методе сопротивления, так и при методе электротепловой изоляции поверх трубы наносится слой тепловой изоляции для уменьшения затрат электроэнергии. Расчет электрического обогрева трубопроводов приведен ниже (см. § 33).

На рис. 40 и 41 приведены схемы электрообогрева канализационных выпусков по типовым проектам, разработанным для Арктики и Крайнего Севера Ленаэропроектом. При обогреве по методу сопротивления (рис. 40) электрический провод для обогрева стального трубопровода присоединен к домовой электрической сети с помощью трансформатора, обеспечивающего необходимое напряжение. Распределительный щит установлен на стене внутри здания. Провод сечением 120—150 *мм*^{2} проложен в газовой трубе диаметром 3 *дм* и идет вдоль трубы канализационного выпуска. Трубы выпуска и обогревающего провода помещены в общей теплоизоляции. Переходные контактные зажимы — один на выходе канализационного выпуска из здания и второй в канализационном колодце — выполнены из латунного или стального кольца с прокладкой между зажимом и трубой полоски рольного свинца (рис. 40, *б*). Для уменьшения утечки токов прогреваемый трубопровод электрически изолируется от контакта с землей, стенами и полами здания. Схема обеспечивает автоматическое управление с помощью контактора и датчика температуры.

Второй вариант электрообогрева трубопровода разработан для чугунных труб (рис. 41), в нем использован метод электротепловой изоляции. Поверх трубы сделана намотка из нихромовой проволоки диаметром 2 *мм*. Концы проволоки прикреплены к медным кольцам (рис. 41, *б*), к которым подключаются питающие провода марки ПРТО сечением 6 *мм*^{2},

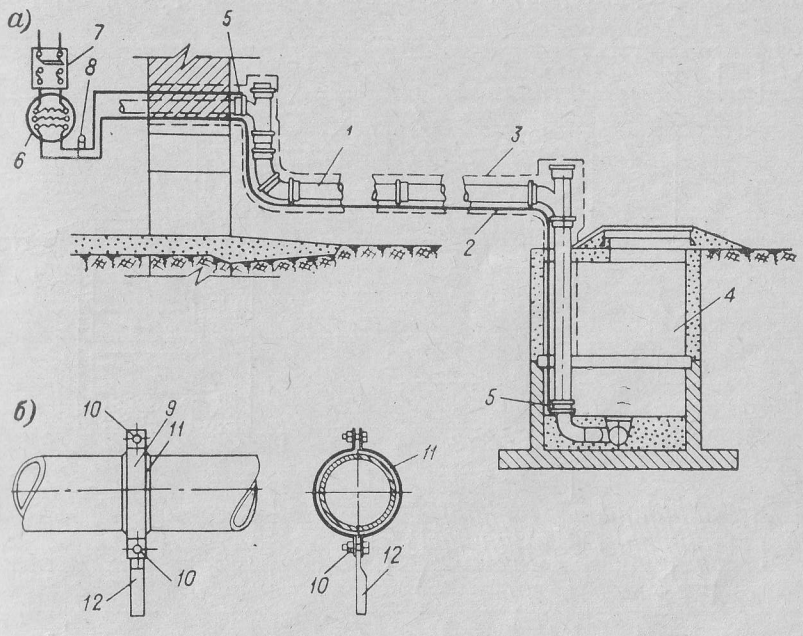


Рис. 40. Электрообогрев трубопровода по методу сопротивления

а — трасса обогрева трубопровода: *1* — стальная канализационная труба; *2* — провод ПРТО-500 сечением 120—150 *мм*^{2} в газовой трубе диаметром 3 *дм*; *3* — теплоизоляция; *4* — канализационный колодец; *5* — контактные зажимы провода на трубе; *6* — трансформатор; *7* — распределительный щит; *8* — сигнальная лампа; *б* — присоединение провода к трубе: *9* — хомут латунный или стальной; *10* — болты и гайки зажима; *11* — свинцовая прокладка; *12* — медный провод

проложенные в газовой трубе диаметром 25 *мм*. Понизительный трансформатор и распределительный щит устанавливаются на стене внутри здания. До намотки нихрома трубопровод проверяется на герметичность и затем покрывается асбестовым листом толщиной 2 *мм*. Нихромовая проволока наматывается с числом витков от 8 до 20 на один метр трубы. Поверх намотки укладывается второй слой асбеста из листа толщиной 5 *мм*, затем труба теплоизолируется (рис. 41, *в*). Система работает автоматически, для чего на трубопроводе устанавливаются датчики температуры. С помощью их регулируется мощность, поглощаемая установкой, в зависимости от температуры наружного воздуха, что дает экономию в расходе электроэнергии. Обогревающий провод разделен на две

самостоятельные секции. Автоматическое управление обеспечивает параллельную работу обеих секций при включенном переключателе.

Новый оригинальный способ электрообогрева водопроводной магистральной трубы в 1965 г. был применен в Канаде для водоснабжения горняцкого поселка Элса (Северо-Западные территории)*. Водовод из стальных труб диаметром

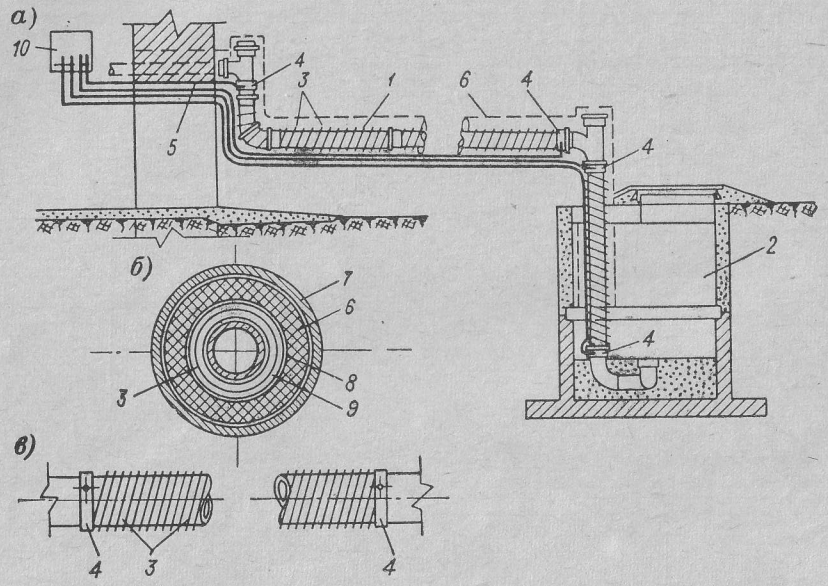


Рис. 41. Электрообогрев трубопровода по методу электротепловой изоляции

а — трасса обогрева; *б* — разрез по трубопроводу; *в* — намотка и крепление обогревательного провода; *1* — чугунная канализационная труба; *2* — канализационный колодец; *3* — намотка из нихромовой проволоки толщиной 2 *мм*; *4* — соединительные зажимы из медных колец; *5* — провода ПРТО сечением 6 *мм*² в газовой трубе диаметром 25 *мм*; *6* — теплоизоляция трубопровода; *7* — защитный слой теплоизоляции; *8* — асбест 2 *мм*; *9* — асбест 5 *мм*; *10* — распределительный щит

114 *мм* со сварными стыками в теплоизоляции из уретанового пенопласта толщиной 5 *см* проложен в обочине автомобильной дороги всего на глубине 20—30 *см* от поверхности. Длина водовода 5,6 *км*. Для предохранения от механических повреждений трубы с теплоизоляцией помещены в защитный чехол шестигранного сечения из алюминия. Вода подается в трубопровод с насосной станции без подогрева. Для того чтобы она не замерзала, применен электрический обогрев по всей длине водовода.

* W. R. Cheriton. Electrical heating of a water supply pipeline under Arctic conditions. — «The Engineering Journal» (Canada), Vol. 49, № 9, 1966.

В данном случае обмотка трубы проволокой по методу тепловой изоляции была бы малоэффективна, так как труба уложена близко к поверхности, а температура воздуха в дан-

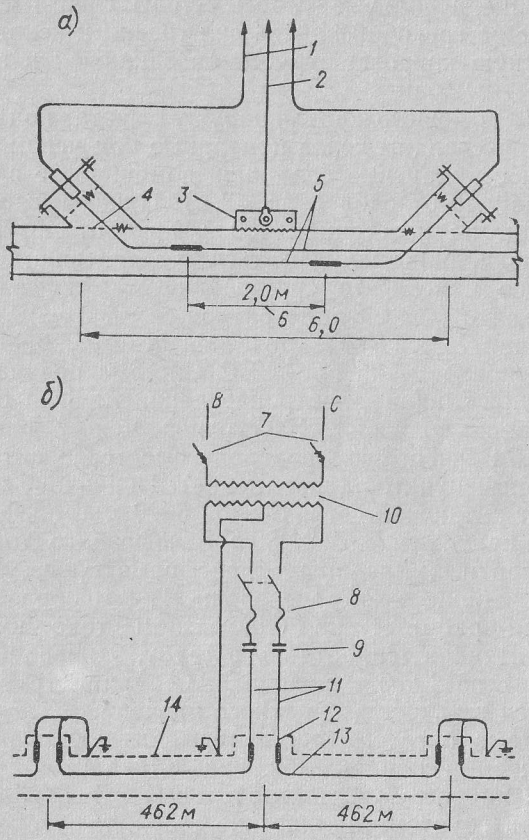


Рис. 42. Электрообогрев кабелем, проложенным внутри трубопровода

а — схема устройства питательного пункта: *1* — кабель с изоляцией для „холодных" участков; *2* — кабель для заземления; *3* — стальная приварная лапка для присоединения заземляющего кабеля; *4* — сварной шов; *5* — греющий кабель; *6* — перекрытие стыка; *б* — принципиальная схема электрической цепи: *7* — предохранительный патрон 50 *а* и плавкая вставка 10 *а*; *8* — типовое реле на 100 *а*; *9* — контактор; *10* — трансформатор 6900—460/230 *в*, нагрузка 38 *ква*, номинальная мощность 25 *ква*; *11* — „холодные" участки цепи; *12* — сращивание кабелей; *13* — греющий кабель; *14* — водопроводная стальная труба диаметром 4 *дм*

ном районе зимой падает до —55° С. Перепад температуры между поверхностью трубы и атмосферой достигает 56° С, так что бóльшая часть подводимого тепла бесполезно уходила бы через слой теплоизоляции в атмосферу. Поэтому было решено проложить греющий кабель внутри самой трубы. Кабель

с неорганической изоляцией заключен в цельнотянутую медную зашитную оболочку. При такой укладке кабель может выдерживать большие механические нагрузки, включая резкое изгибание и сильные удары. Чтобы свести к минимуму воздействие на греющий кабель сил трения и исключить электрохимическую коррозию трубы, он заключен в найлоновую оболочку.

Выводы греющего кабеля наружу в местах подачи питания и заземления сделаны через приварные под углом 45° отростки трубы и стандартные сальники, помещенные в отверстиях крышек-фланцев отводов (рис. 42, *а*). Пункты вывода кабеля расположены на расстоянии 460 *м* друг от друга. Так как сальники не должны подвергаться воздействию температуры от греющего кабеля, то сращивание участков «горячего» и «холодного» кабелей сделано внутри самой трубы.

Принципиальная электрическая схема обогревающего устройства показана на рис. 42, *б*. Система получает питание от воздушной линии электропередачи, идущей от насосной станции вдоль водовода. Расстояние между питательными пунктами 924 *м*. На всем водоводе имеется 6 питательных и 7 нейтральных пунктов (заземление). Первичное напряжение трехфазной питающей сети, равное 6900 *в*, трансформируется на второе напряжение 460/230 *в* однофазного тока с помощью стандартных масляных трансформаторов, укрепленных на опорах линии электропередачи. Таким образом, система обогревания работает на однофазном токе напряжением 230 *в*, обеспечивая теплоотдачу в трубу, эквивалентную мощности 11,2 *вт* на 1 *пог. м* водовода. Стальная труба водовода используется в качестве обратного провода.

В системе предусмотрены меры, не допускающие опасного повышения напряжения как в стальной трубе, так и в греющем кабеле. У всех питательных и нейтральных пунктов вбиты в грунт металлические стержни заземления. Нейтральная (нулевая) точка каждого трансформатора присоединена к соответствующему заземляющему стержню и к трубе. Медная защитная оболочка кабеля соединена со стальной трубой и с заземлением в каждой нейтральной точке.

Система обогрева работает автоматически, для чего в питательных пунктах установлены двухполюсные контакторы, управляемые с помощью температурного регулятора или термостата. Критическая контрольная температура принята от 2,2° С у насосной станции до 0,5° С на конечном участке водовода.

Глава третья

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА КОНСТРУКЦИЙ

§ 16. Методы расчета при проектировании инженерных коммуникаций

При проектировании инженерных коммуникаций на вечномерзлых грунтах мы встречаемся с четырьмя видами расчетов: с гидравлическим и тепловым расчетами сети, расчетом строительных конструкций и расчетом по устойчивости инженерных сетей на вечномерзлых грунтах. Гидравлический расчет производится обычными методами и в настоящей книге не рассматривается. Здесь также не приводятся расчеты строительных конструкций инженерных коммуникаций, которые производятся по обычным правилам и нормам и не являются специфическими для районов с залеганием вечномерзлых грунтов.

Таковы, например, расчеты температурных деформаций и связанных с ними напряжений в трубопроводах, определение сечения каналов, подбор арматуры железобетонных элементов и т. п.

Тепловыми расчетами, которые рассмотрены в следующей главе, определяются теплопотери трубопроводов и санитарно-технических каналов, рассчитываются теплоизоляция труб и остывание жидкости по длине сети, степень обледенения труб, мощность источников для подогрева жидкости и т. п. Тепловые расчеты не являются специфичными для проектирования инженерных коммуникаций на вечномерзлых грунтах. Они необходимы и для районов с умеренным климатом, где вечномерзлых грунтов нет, например при воздушной прокладке санитарно-технических сетей или при прокладке труб в слое сезонного промерзания грунтов. Тем не менее наличие вечномерзлых грунтов вносит значительные особенности в тепловые расчеты. К тому же, тепловые расчеты тесно связаны с определением температурного поля прогрева мерзлого грунта вокруг подземного трубопровода или канала и, таким образом,

влияют на расчеты, связанные с устойчивостью инженерных коммуникаций, возводимых в области вечномерзлых грунтов.

Тепловые расчеты ведутся на основе теории теплопередачи с учетом теплофизических свойств мерзлых и талых грунтов.

Расчеты по обеспечению устойчивости инженерных коммуникаций на вечномерзлых грунтах, приводимые в гл. 5 книги, строятся на рассмотрении теплового и механического взаимодействия мерзлых, промерзающих и оттаивающих грунтов с сооружением. С их помощью определяются размеры таликов, образующихся вокруг трубы или канала в мерзлой толще грунта, производится расчет деформаций подземных трубопроводов или каналов при оттаивании грунтов в их основании, рассчитываются основания и опоры инженерных сетей. В основу этих расчетов положена теория температурного поля прогрева грунта.

Расчетные схемы. Средствами математического анализа, равно как и решениями на интеграторах, невозможно охватить всю сложность физических явлений при теплообмене. Поэтому при решении задач теплового расчета и расчета по устойчивости инженерных коммуникаций, как, впрочем, и при любых инженерных расчетах, реальную конструкцию приходится заменять некоторой условной упрощенной схемой.

Многие процессы, непрерывно изменяющиеся во времени, при расчетах принимаются как стационарные. Так например, температура теплоносителя в трубопроводе, непрерывно изменяющаяся по длине сети, при расчетах принимается постоянной на определенном участке. Граница талой и мерзлой зон вокруг трубопровода или канала будет непрерывно, хотя и медленно, меняться, даже при сохранении постоянной температуры в трубопроводах, так как на положение этой границы влияет постоянно меняющаяся температура на поверхности грунта.

Почти во все формулы теплового расчета входит температура грунта на глубине заложения трубопровода. Эту температуру можно рассматривать только как приближенную. Она постоянно меняется и зависит не только от сезона года, но и от целого ряда других факторов, например таких, как степень обживания территории, характер растительности, толщина снегового покрова и др.

Грунты по трассе трубопровода будут, как правило, неоднородны. Различие их, в особенности по количеству содержащейся влаги, почти всегда отмечается по глубине. Решение же задач температурного поля в неоднородной среде крайне сложно. Сами теплофизические характеристики грунтов основаны пока еще на немногочисленных и несовершенных опытах, поэтому в расчетах грунты осредняют и по их виду, и по влажности.

При расчетах магистральные и разводящие сети разбиваются на участки, в пределах которых глубина заложения труб, расходы, теплофизические характеристики грунтов и температурный режим грунтового массива принимаются постоянными.

В настоящей главе, равно как и в последующих главах, будут рассмотрены формулы и методика расчета, пригодные для инженерных сетей любого назначения: водопровода, канализации, тепловых сетей, газопроводов и нефтепроводов.

§ 17. Исходные данные для инженерных расчетов

Ниже будут рассмотрены основные исходные данные, необходимые для расчетов санитарно-технических сетей и магистральных трубопроводов, прокладываемых на вечномерзлых грунтах. Эти данные получают в процессе инженерно-геологических изысканий на строительной площадке или по трассе трубопровода. Часть из них, как будет видно в дальнейшем, можно получить и расчетным путем.

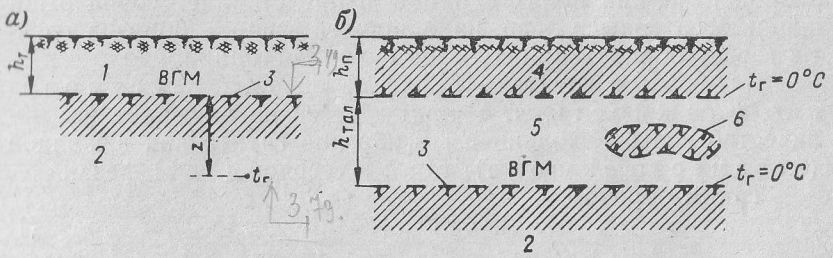


Рис. 43. Характерные виды залегания вечномерзлых грунтов в верхних слоях криолитозоны

а — сливающаяся криолитозона; *б* — несливающаяся криолитозона; *1* — слой сезонного оттаивания; *2* — вечномерзлая толща грунтов; *3* — верхняя граница вечномерзлых грунтов; *4* — слой сезонного промерзания; *5* — массив талого грунта; *6* — перелеток

В практике проектирования различных сооружений на вечномерзлых грунтах в первую очередь необходимо знать, на какой глубине от поверхности залегает вечномерзлая толща (криолитозона), т. е. знать положение верхней границы вечномерзлой толщи грунтов (ВГМ).

На бóльшей части территории распространения вечномерзлых грунтов эта граница располагается неглубоко от поверхности земли, так что криолитозона сливается зимой со слоем летнего оттаивания грунтов (рис. 43, *а*). Это случай сливающейся криолитозоны. Здесь различают два слоя грунтов: слой сезонного оттаивания $h_т$ и вечномерзлую толщу.

В южной зоне области вечномерзлых грунтов верхняя граница вечномерзлой толщи может залегать на значительной глубине от поверхности, иногда на 30—40 *м*. В этом случае промерзающий зимой и оттаивающий летом слой грунта с поверхности будет отделен от криолитозоны слоем постоянно талого грунта (рис. 43, *б*). Такой характер залегания грунтов носит название несливающейся криолитозоны. Здесь рассматривают уже три слоя грунтов: слой сезонного промерзания $h_п$, слой постоянно талый $h_{тал}$ и вечномерзлую толщу.

Физические характеристики мерзлых грунтов. Основными физическими характеристиками грунта, определяемыми мерзлотно-грунтовыми изысканиями, являются объемный вес и влажность. Объемный вес мерзлого грунта γ_0 (в *т/м*³ или *кг/м*³) — вес единицы объема в условиях природного залегания при сохранении естественной пористости и влажности образца (образец ненарушенной структуры). Обычно объемный вес мерзлых грунтов изменяется от 1,3 до 2,1 *т/м*³. Чем больше в грунте содержится льда, тем объемный вес грунта меньше.

Влажность грунта определяется на образцах нарушенной структуры как весовая влажность W. Измеряется она в процентах или долях единицы и представляет собой отношение веса воды и льда, находящихся в порах образца грунта, к весу образца в абсолютно сухом состоянии.

В мерзлых грунтах W рассматривается как суммарная влажность, т. е. принимается во внимание все количество воды, находящейся в образце грунта как в жидкой (незамерзшая вода), так и в твердой (лед) фазах.

Таким образом

$$W = W_л + W_н, \qquad (1)$$

где W — влажность мерзлого грунта;
$W_л$ — количество льда в грунте;
$W_н$ — количество незамерзшей воды в грунте.

Количество незамерзшей воды в мерзлом грунте $W_н$ зависит от вида грунта и его температуры. Оно может быть определено по табл. 3.

Важной для инженерных расчетов физической характеристикой мерзлого грунта является объемный вес скелета мерзлого грунта $\gamma_м$, представляющий собой вес минеральных частиц (в *т/м*³ или *кг/м*³) в единице объема образца грунта. Он определяется по обычной формуле механики грунтов:

$$\gamma_м = \frac{\gamma_0}{1 + W}, \qquad (2)$$

где γ_0 — объемный вес мерзлого грунта;
W — его влажность в долях единицы.

Таблица 3

Количество незамерзшей воды $W_н$ в грунте

Температура грунта в °С	$W_н$ в долях единицы от веса скелета грунта			
	песок	супесь	суглинок	глина
—0,3	0,002	0,060	0,120	0,170
—0,6	0,002	0,050	0,100	0,150
—1	0,0	0,045	0,095	0,140
—2	0,0	0,040	0,085	0,125
—3	0,0	0,037	0,078	0,118
—4	0,0	0,036	0,073	0,113
—6	0,0	0,035	0,068	0,108
—8	0,0	0,035	0,065	0,100
—10	0,0	0,035	0,065	0,093

Для мерзлых грунтов объемный вес, объемный вес скелета и влажность связаны между собой довольно устойчивой зависимостью, которая выражается графиком на рис. 44. Им можно пользоваться при инженерных расчетах и для контроля данных, получаемых при полевых и лабораторных испытаниях грунтов.

Состояние глинистых грунтов после оттаивания во многом определяется их влажностью в мерзлом состоянии, в зависимости от которой они могут переходить в твердую, пластичную или текучую консистенцию. Для оценки пластичных свойств оттаявших мерзлых грунтов пользуются теми же характеристиками, что и для талых, т. е. пределами Аттерберга: $W_т$ — влажность грунта на границе текучести; $W_р$ — влажность грунта на границе раскатывания; $W_п$ — число пластичности.

Температура мерзлого грунта. В инженерных расчетах сооружений, возводимых на вечномерзлых грунтах, различают два вида температуры грунтов: температуру грунта на заданной глубине от поверхности $t_г$ (она может быть как отрицательной, так и положительной) и температуру вечномерзлой толщи грунтов t_0, которую считают практически неизменяющейся во времени.

Температура t_0 может быть получена непосредственным измерением температуры грунта на глубине 10 *м* от поверхности или по карте изолиний температуры криолитозоны (см. прилож. 1). В местах перехода через водотоки, где термический режим вечномерзлых грунтов под влиянием тепла в массах воды нарушается, этой картой пользоваться нельзя.

Теплофизические характеристики грунтов. Основными количественными характеристиками теплофизических свойств грунта являются коэффициент теплопроводности и объемная теплоемкость.

Теплопроводность мерзлых грунтов обычно на 20—30% больше, чем талых, поэтому в расчетах различают коэффициенты теплопроводности талого $\lambda_т$ и мерзлого $\lambda_м$ грунтов. Большое влияние на величину коэффициента теплопроводности оказывает влажность грунта. С возрастанием влажности теплопроводность быстро увеличивается.

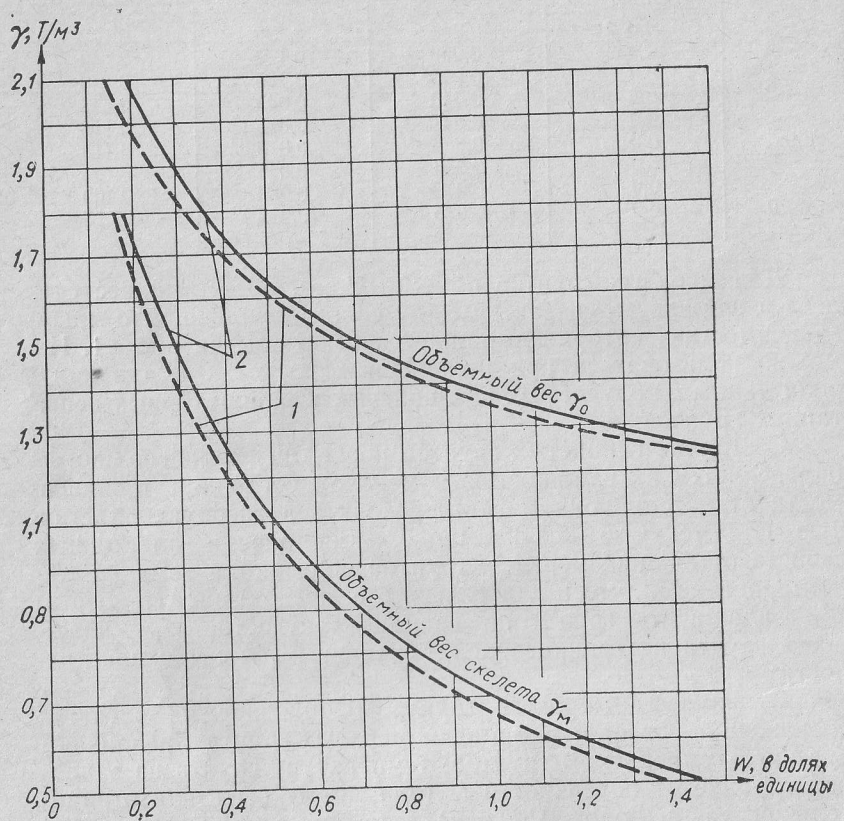


Рис. 44. Зависимость объемного веса и веса скелета мерзлого грунта от его влажности

1 — для песчаных грунтов; *2* — для глинистых грунтов

Теплоемкость мерзлых грунтов ниже теплоемкости талых, поэтому в расчетах различают объемную теплоемкость талого $C_т$ и мерзлого $C_м$ грунтов.

Расчетные значения теплофизических характеристик грунта берутся по табл. 4 в зависимости от объемного веса и влажности грунта (таблица взята из СНиП II-Б.6—66).

Коэффициент теплопроводности грунта почти не меняется при изменении температуры последнего. Теплоемкость же

Таблица 4

Расчетные значения теплофизических характеристик грунтов

Объемный вес грунта в т/м³	Влажность в долях единицы W	Коэффициент теплопроводности в ккал/(м·ч·град)						Объемная теплоемкость в ккал/м³·град	
		пески		супеси		суглинки и глины			
		$\lambda_т$	$\lambda_м$	$\lambda_т$	$\lambda_м$	$\lambda_т$	$\lambda_м$	$C_т$	$C_м$
1,2	0,05	0,40	0,52	—	—	—	—	285	260
	0,10	0,62	0,79	0,38	0,45	—	—	320	270
1,4	0,05	0,57	0,69	—	—	—	—	330	300
	0,10	0,87	1,08	0,52	0,69	0,44	0,68	370	315
	0,15	1,00	1,25	0,71	0,88	0,56	0,84	410	330
	0,20	—	—	0,84	1,05	0,65	0,94	450	345
	0,25	—	—	0,92	1,16	0,72	1,00	490	360
1,6	0,05	0,75	0,91	—	—	—	—	380	340
	0,10	1,05	1,35	—	—	—	—	430	360
	0,15	1,25	1,60	0,93	1,10	0,72	0,98	470	370
	0,20	1,36	1,73	1,05	1,29	0,88	1,12	520	395
	0,25	1,41	1,82	1,16	1,44	0,96	1,24	565	410
	0,30	—	1,93	1,20	1,55	1,00	1,30	610	430
	0,35	—	—	1,30	1,65	1,05	1,35	650	445
	0,40	—	—	—	1,72	1,10	1,41	700	465
	0,60	—	—	—	—	—	1,50	800	500
1,8	0,10	1,30	1,60	—	—	—	—	480	400
	0,15	1,55	1,90	1,19	1,31	0,72	0,98	530	420
	0,20	1,65	2,10	1,34	1,52	0,88	1,12	580	440
	0,25	1,75	2,23	1,43	1,70	0,96	1,24	640	460
	0,30	—	2,32	1,48	1,82	1,00	1,30	690	480
	0,35	—	—	1,51	1,93	1,05	1,35	740	500
	0,40	—	—	—	2,00	1,10	1,41	795	520
	0,60	—	—	—	—	—	1,58	900	560
2,0	0,15	1,76	2,20	1,40	1,50	—	—	590	470
	0,20	2,00	2,42	1,56	1,75	1,24	1,50	650	490
	0,25	2,26	2,72	1,73	1,93	1,35	1,65	705	510
	0,30	—	—	1,80	2,10	1,44	1,75	770	530
	0,35	—	—	—	—	1,53	1,86	820	555

грунта с изменением температуры будет меняться значительно. Значения $C_м$ в табл. 4 даны для температуры грунта —10° С.

Расчетное значение объемной теплоемкости мерзлого грунта с учетом заданной температуры $C'_м$ определяется по формуле

$$C'_м = \frac{1}{W}[C_м(W - W_н) + C_т W_н], \qquad (3)$$

где $W_н$ берется по табл. 3, а $C_м$ и $C_т$ — по табл. 4.

Для песчаных грунтов $C'_м = C_м$. В этом случае объемная теплоемкость мерзлого грунта берется без учета его температуры прямо по табл. 4.

§ 18. Расчет сезонного оттаивания и промерзания грунтов

При расчете конструкций инженерных коммуникаций (как, впрочем, и при расчете любых сооружений) на вечномерзлых грунтах необходимо знать глубину залегания верхней границы вечномерзлой толщи грунтов (ВГМ), т. е. величину $h_т$ (см. рис. 43). Она определяется расчетным путем на момент максимального оттаивания с поверхности (сентябрь, а в южных районах области вечномерзлых грунтов начало октября) в наиболее теплое лето за срок 10—15 лет. Расчет ведется с помощью карт, приведенных в приложениях 2—5, по формуле

$$h_т = k_w S, \qquad (4)$$

где S — глубина оттаивания грунта, взятая по соответствующей карте для данного географического пункта. Карты даются различные — для глинистых и для песчаных грунтов при определенной их влажности (15% для глинистых и 5% для песчаных), поэтому для перехода на фактическую влажность грунтов в рассматриваемом месте в формулу (4) введен коэффициент k_w, который берется из графика, указанного на картах.

Пример 1. Определить расчетную глубину залегания ВГМ на площадке со снятым растительным покровом в Якутске. Площадка сложена супесями с влажностью 30%. По карте прилож. 2 для Якутска находим $S = 2{,}10$ *м*. Коэффициент перехода от влажности 15% к влажности 30% по графику, помещенному на той же карте, $k_w = 0{,}90$. По формуле (4) получаем $h_т = 0{,}90 \cdot 2{,}10 = 1{,}89$ *м*.

Глубина сезонного оттаивания органических грунтов (торфов и мохо-растительного слоя) определяется по карте, приведенной в прилож. 5. Глубина оттаивания торфяного грунта почти не изменяется при любом увеличении влажности свыше 70—100%. Влажность же торфяных слоев в области вечномерзлых грунтов, как правило, превышает эти значения, поэтому здесь отпадает необходимость перехода от одной влажности к другой. Влажность грунтов в данном случае просто не учитывается.

Когда требуется определить положение ВГМ в грунтах, состоящих из различных слоев, следует пользоваться методом эквивалентного слоя и расчет вести по формулам:

для двухслойной толщи:

$$S_2 = S'' - \frac{S''}{S'} h' + h'; \qquad (5)$$

для трехслойной толщи:

$$S_3 = S''' - \frac{S'''}{S'} h' - \frac{S'''}{S''} h'' + h' + h''; \qquad (6)$$

для четырехслойной толщи:

$$S_4 = S^{IV} - \frac{S^{IV}}{S'} h' - \frac{S^{IV}}{S''} h'' - \frac{S^{IV}}{S'''} h''' + h' + h'' + h''' \qquad (7)$$

и т. д.

Глубины сезонного оттаивания грунта каждого слоя (S', S'', S''' и т. д.) определяются по картам с поправкой на влажность по формуле (4); h', h'', h''' — мощности слоев.

Если рассчитывается глубина протаивания песчаного слоя, подстилаемого глинистым грунтом, то вместо карты, данной в прилож. 3, следует пользоваться картой, учитывающей изменение теплооттока в нижележащие слои глинистого мерзлого грунта (прилож. 4). Поправку на влажность в этом случае берут с карты прилож. 3.

Пример 2. Определить расчетную глубину сезонного оттаивания естественной толщи грунтов в районе Жиганска (на реке Лене у Северного полярного круга), имеющей следующее сложение: мох и торф мощностью 0,15 *м*; песок пылеватый с влажностью 20% мощностью 0,9 *м*; суглинок средний с влажностью 40%.

Для первого слоя, состоящего из органических грунтов, по карте прилож. 5 находим $S' = 0{,}57$ *м*. Для второго слоя по карте прилож. 4 и формуле (4) получаем $S'' = 0{,}82 \cdot 2{,}2 = 1{,}80$ *м*. Для третьего слоя, использовав карту прилож. 2, находим $S''' = 0{,}86 \cdot 1{,}7 = 1{,}46$ *м*. По формуле (6) для трехслойной толщи получаем:

$$h_т = S_3 = 1{,}46 - \frac{1{,}46}{0{,}57} \cdot 0{,}15 - \frac{1{,}46}{1{,}80} \cdot 0{,}90 + 0{,}15 + 0{,}90 = 1{,}4 \text{ м}.$$

Верхняя граница вечномерзлой толщи (ВГМ) расположится в слое суглинка на глубине 1,4 *м* от поверхности.

Если рассчитывается конструкция с насыпями, например при обваловании трубопроводов (см. рис. 15 и 21), или с пульсирующими опорами (см. рис. 19), то положение ВГМ под насыпями определяется с помощью формул (5) — (7). В процессе мерзлотно-грунтовых изысканий нельзя получить данных о влажности насыпей, поэтому она принимается как нормативная:

	Нормативная влажность в %
гравийно-галечный и щебенистый грунт	5
песок средней крупности	7
» мелкий	8
» пылеватый	10
супесь легкая	10
» тяжелая	12
суглинок легкий	13
» средний	15
» тяжелый	17

Глубина промерзания грунта с поверхности $h_п$ (см. рис. 43, *б*) на оголенных площадках (свободных от снега и со снятым растительным слоем) определяется по формуле

$$h_п = \sqrt{\frac{-2\lambda_м t_в \tau_x}{\rho (W - W_н)\gamma_м - 0{,}5 C'_м t_в}}, \qquad (8)$$

где $t_в$ — средняя температура воздуха за период промерзания грунта в °С;

τ_x — период промерзания, принимаемый равным периоду года с отрицательной среднемесячной температурой, в *ч*;

$\rho = 80$ *ккал/кг* — теплота льдообразования.

Остальные символы в формуле рассмотрены в § 17, причем $W_н$ и $C'_м$ определяются при температуре $0{,}5t_в$. Объемный вес скелета мерзлого грунта следует брать в *кг/м*³.

Если известны физические характеристики только талого грунта, то для расчета его промерзания по формуле (8) влажность следует увеличить на 20%.

Пример 3. Определить расчетную глубину зимнего промерзания грунта в районе Охотска. Грунты представлены суглинками с влажностью в талом состоянии 25%.

Увеличим влажность на 20% и примем для мерзлого грунта $W = 30\%$. Для этой влажности по графику на рис. 44 находим: $\gamma_0 = 1{,}85$ *т/м*³ и $\gamma_м = 1{,}45$ *т/м*³ = 1450 *кг/м*³.

Зная объемный вес и влажность грунта, по табл. 4 находим его теплофизические характеристики: $\lambda_м = 1{,}41$ *ккал/м · ч · град*, $C_т = 710$ и $C_м = 492$ *ккал/м*³ *· град*.

Время промерзания для Охотска длится с 1 октября по 1 мая, так что $\tau_x = 212$ дням = 5088 *ч*. Средняя температура воздуха за этот период $t_в = -14{,}7°$ С.

Для температуры $-14{,}7°$ С : 2 = $-7{,}3°$ С по табл. 3 находим количество незамерзшей воды в грунте $W_н = 0{,}067$. По формуле (3) уточняем объемную теплоемкость мерзлого грунта:

$$C'_м = \frac{1}{0{,}30}\,[492\,(0{,}30 - 0{,}067) + 710 \cdot 0{,}067] = 540 \text{ ккал/м}^3 \cdot \text{град}.$$

По формуле (8) находим глубину промерзания грунта:

$$h_п = \sqrt{\frac{-2 \cdot 1{,}41\,(-14{,}7) \cdot 5088}{80\,(0{,}30 - 0{,}067) \cdot 1450 - 0{,}5 \cdot 540\,(-14{,}7)}} = 2{,}61 \text{ м}.$$

Если надо знать, насколько промерзнет грунт, лежащий под слоем естественной теплоизоляции, например под слоем снега или торфа, то можно воспользоваться той же формулой (8), вычтя из полученного значения толщину фиктивного слоя грунта $h_{из}$, т. е.

$$h'_п = h_п - h_{из}, \qquad (9)$$

где $h'_п$ — промерзание грунта, считая от дневной поверхности, в *м*;

$h_{из}$ — фиктивный слой грунта:

$$h_{из} = \delta \frac{\lambda_м}{\lambda}; \qquad (10)$$

δ — толщина слоя теплоизоляции в *м*:

λ — коэффициент теплопроводности теплоизолирующего слоя в *ккал/м · ч · град* (значения его для расчетов приведены ниже):

	Коэффициент теплопроводности λ в *ккал/м · ч · град*
Торф талый влажный	0,30
» мерзлый	0,45
Мох уплотненный талый	0,08
» мерзлый	0,22
Снег рыхлый	0,20
» плотный	0,50
Лед	1,54

Пример 4. Для условий предыдущего примера определить глубину промерзания в предположении, что суглинок прикрыт слоем мха толщиной 8 *см* и слоем снега толщиной 40 *см*.

По формуле (9), зная λ для мха и снега, находим

$$h'_п = 2{,}61 - \left[0{,}08\,\frac{1{,}41}{0{,}22} + 0{,}40\,\frac{1{,}41}{0{,}50}\right] = 0{,}97 \text{ м}.$$

§ 19. Расчетная температура грунта

Температура грунта непрерывно изменяется по глубине и во времени. Она зависит от целого ряда факторов, из которых многие трудно поддаются учету. К последним, например, относятся: характер растительности, экспозиция склона по странам света, затененность, снеговой покров, характер самих грунтов, наличие надмерзлотных вод и др. Однако температура грунта, как по величине, так и по характеру распределения, сохраняется из года в год достаточно устойчиво, и решающее влияние здесь остается за температурой воздуха.

Температура грунта на разных глубинах и в различные периоды года может быть получена непосредственными измерениями в термоскважинах, которые закладываются в процессе изысканий. Но такой способ требует длительных наблюдений и значительных расходов, что не всегда оправдано. Полученные по одной-двум скважинам данные распространяют на большие площади и протяжения, значительно искажая действительность, так что расчетные данные о температуре грунта во многих случаях оказываются более надежными.

Температура грунта вечномерзлой толщи на любой глубине (до 10 *м* от поверхности) и на любой

период года может быть определена по формуле *

$$t_г = mt_0\left[1 - \exp\left(-z\sqrt{\frac{\pi C'_м}{\lambda_м \tau_г}}\right)\cos\left(\frac{2\pi\tau}{\tau_г} - z\sqrt{\frac{\pi C'_м}{\lambda_м \tau_г}}\right)\right], \quad (11)$$

где z — глубина, отсчитываемая от ВГМ (см. рис. 43), в *м*;
$t_г$ — температура грунта на глубине z в *град*;
$\tau_г$ — время, равное году (8760 *ч*);
τ — время, отсчитываемое вперед (через 1 января) от момента начала осеннего замерзания грунта до момента, для которого ведется расчет температуры, в *ч*;
exp x — экспонента (показательная функция e^x берется по таблицам прилож. 6);
m — коэффициент, зависящий от периода года (для периода октябрь — май $m = 1{,}5 - 0{,}05z$, а для периода июнь — сентябрь $m = 1$).

Самая низкая температура на заданной глубине будет тогда, когда косинус в формуле (11) станет равным —1, т. е. минимальная температура грунта за год на данной глубине

$$t_{г,\,мин} = (1{,}5 - 0{,}05z)\,t_0\left[1 + \exp\left(-z\sqrt{\frac{\pi C'_м}{\lambda_м \tau_г}}\right)\right]. \quad (12)$$

Максимальная температура грунта на глубине z будет тогда, когда косинус примет значение, равное единице, т. е.

$$t_{г,\,макс.} = t_0\left[1 - \exp\left(-z\sqrt{\frac{\pi C'_м}{\lambda_м \tau_г}}\right)\right]. \quad (13)$$

Во всех трех формулах значение объемной теплоемкости $C'_м$ следует рассчитывать для температуры грунта t_0 по формуле (3).

Температуру грунта в слое сезонного оттаивания можно также определить расчетом, приняв во внимание, что изменение температуры в этом слое достаточно точно аппроксимируется линейной зависимостью при следующих температурных градиентах (табл. 5).

Рассчитав по одной из формул (11) — (13) температуру грунта на уровне ВГМ, т. е. положив в формулах $z = 0$, затем с помощью табл. 5 определяем температуру грунта на заданной глубине в слое сезонного оттаивания. В самых верхних слоях грунта, примерно до 1 *м* от поверхности, характер температурных колебаний очень сложен.

* Формула является модификацией формулы В. В. Докучаева, выведенной им на основании предположения о гармоническом характере колебаний температуры в грунте, описываемом круговыми функциями с коэффициентом Фурье (В. В. Докучаев, Г. С. Факторович. Максимальные температуры оснований, сложенных вечномерзлыми грунтами. Труды Союзморниипроекта № 3/9. Изд-во «Морской транспорт», 1963).

В формулу введен эмпирический коэффициент m, позволяющий распространить ее и на холодный период года.

Таблица 5

Температурный градиент в слое сезонного оттаивания на глубине ниже 1 *м* от поверхности земли

Месяцы	Температурный градиент в °С/*м*	Месяцы	Температурный градиент в °С/*м*
Январь	—4	Июль	+4
Февраль	—4	Август	+3
Март	—4	Сентябрь	+3
Апрель	—2,5	Октябрь	—0,5
Май	+2	Ноябрь	—3
Июнь	+3	Декабрь	—4

Примечание. Знак градиента показан в направлении к дневной поверхности.

Чтобы получить расчетную температуру грунта в метровом слое от поверхности, можно поступить следующим образом. Вычислить температуру на глубине 1 *м* и температуру дневной поверхности грунта, а затем путем интерполяции по этим двум значениям определить температуру на заданной глубине.

Температуру на поверхности грунта $t_п$ в холодный период года можно принимать равной температуре воздуха. В летний период

$$t_п = 2 + 1{,}15t_в, \quad (14)$$

где $t_п$ — температура на поверхности в *град*;
$t_в$ — температура воздуха в *град*.

Пример 5. Определить температуру грунта в пос. Тура (центр Эвенкийского национального округа) на глубинах 0,4; 1,0; 2,0 и 4,0 *м* от поверхности в июле и феврале. Найти также минимальную за год температуру грунта на этих глубинах. Грунты — супеси с объемным весом в мерзлом состоянии $\gamma_0 = 1{,}8$ *т/м*³ и влажностью 30%.

Положение ВГМ определяем по формуле (4): $h_т = 0{,}9 \cdot 2{,}1 = 1{,}89$ *м*. Температура вечномерзлой толщи грунта $t_0 = -2°$ С (по карте прилож. 1). Теплофизические характеристики взяты по табл. 4: $\lambda_м = 1{,}82$ *ккал/м·ч·град* и $C_м = 480$ *ккал/м³·град*. Последнее значение приводим к температуре t_0. Сделав расчет по формуле (3), получим $C'_м = 508$ *ккал/м³·град*.

Среднемесячные температуры воздуха в пос. Тура: в феврале $t_в^{II} = -30{,}6°$ С, в июле $t_в^{VII} = 16{,}4°$ С.

Первым осенним месяцем с отрицательной температурой (среднемесячной) будет октябрь. Поэтому отсчет времени τ начинаем с 1 октября. Тогда до 15 февраля $\tau = 138$ дн. $= 3312$ *ч* и до 15 июля $\tau = 288$ дн. $= 6912$ *ч*.

По формуле (11) находим температуру грунта в феврале на глубине 2 *м* от поверхности:

$$z = 2 - h_т = 2 - 1{,}89 = 0{,}11 \text{ м};$$

$$t_2^{II} = (1{,}5 - 0{,}05 \cdot 0{,}11) \cdot (-2)\left[1 - \exp\left(-0{,}11\sqrt{\frac{3{,}14 \cdot 508}{1{,}82 \cdot 8760}}\right) \times \right.$$

$$\left. \times \cos\left(\frac{2 \cdot 3{,}14 \cdot 3312}{8760} - 0{,}11\sqrt{\frac{3{,}14 \cdot 508}{1{,}82 \cdot 8760}}\right)\right] =$$

$$= -2{,}99\,[1 - \exp(-0{,}035)\cos 2{,}340] = -5{,}0^\circ \text{ С}.$$

Значение экспоненты взято по таблице функций (прилож. 6). В нашем случае $\exp(-0{,}035) = e^{-0{,}035} = 0{,}965$. На той же глубине температура в июле будет равна

$$t_2^{VII} = -2\left[1 - \exp\left(-0{,}11\sqrt{\frac{3{,}14 \cdot 508}{1{,}82 \cdot 8760}}\right) \times \right.$$

$$\left. \times \cos\left(\frac{2 \cdot 3{,}14 \cdot 6912}{8760} - 0{,}11\sqrt{\frac{3{,}14 \cdot 508}{1{,}82 \cdot 8760}}\right)\right] =$$

$$= -2\,[1 - \exp(-0{,}035)\cos 4{,}920] = -1{,}6^\circ \text{ С}.$$

Аналогично вычисляем температуру грунта на глубине 4 *м* от поверхности, для чего подставляем в формулу (11) значение $z = 4 - h_т = 4 - 1{,}89 = 2{,}11$ *м*. Произведя вычисления, получим $t_4^{II} = -3{,}0^\circ$ С и $t_4^{VII} = -2{,}4^\circ$ С.

Рассчитаем теперь минимальную температуру на глубинах 2 и 4 *м*, для чего воспользуемся формулой (12):

$$t_{2,\,мин} = (1{,}5 - 0{,}05 \cdot 0{,}11) \cdot (-2)\left[1 + \exp\left(-0{,}11\sqrt{\frac{3{,}14 \cdot 508}{1{,}82 \cdot 8760}}\right)\right] = -5{,}9^\circ \text{ С}.$$

Аналогичным расчетом для глубины 4 *м* получим $t_{4,\,мин} = -4{,}2^\circ$ С.

Чтобы получить температуру грунта на глубине 1 *м* от поверхности, т. е. в слое сезонного оттаивания, предварительно определяем температуру на уровне ВГМ. В данном случае это будет соответствовать глубине $h_т = 1{,}89$ *м* от поверхности. Полагая в формуле (11) величину $z = 0$, получаем

$$t_{z=0}^{II} = 1{,}5\,(-2)\left[1 - \exp 0 \cdot \cos\frac{2 \cdot 3{,}14 \cdot 3312}{8760}\right] = -3\,[1 - \cos 2{,}37] = -5{,}1^\circ \text{ С},$$

так как $\exp 0 = 1$. Соответственно для июля $t_{z=0}^{VII} = -1{,}5^\circ$ С.

Далее, воспользовавшись табл. 5, находим температуру грунта на глубине 1 *м*:

$$t_1^{II} = -5{,}1 + 0{,}89\,(-4) = -8{,}7^\circ \text{ С};$$

$$t_1^{VII} = -1{,}5 + 0{,}89 \cdot 4 = 2{,}1^\circ \text{ С}.$$

Для нахождения температуры грунта на глубине 0,4 *м* сначала определяем температуру на поверхности грунта:

$t_п^{II} = t_в^{II} = -30{,}6^\circ$ С, а для июля — по формуле (14), т. е. $t_п^{VII} = 2 + 1{,}15 \times 16{,}4 = 20{,}9^\circ$ С.

Зная температуру грунта на поверхности и на глубине 1 *м*, интерполяцией находим температуру грунта на глубине 0,4 *м*:

$$t_{0,4}^{II} = -8{,}7 + (1 - 0{,}4)\,[-30{,}6 - (-8{,}7)] = -21{,}8^\circ \text{ С};$$

$$t_{0,4}^{VII} = 2{,}1 + (1 - 0{,}4)\,(20{,}9 - 2{,}1) = 13{,}4^\circ \text{ С}.$$

Температура грунта при несливающейся криолитозоне (см. рис. 43, *б*) рассчитывается иначе, чем при сливающейся. Практически можно считать, что температура на уровне ВГМ будет равна 0° С в течение всего года. Расчетную температуру грунта вечномерзлой толщи на заданной глубине можно определить интерполяцией, считая, что она меняется на глубине по линейному закону от t_0 на глубине 10 *м* до 0° С на глубине залегания ВГМ. Температуру в талом слое $h_{тал}$ можно принимать от 0,5 до 1,5° С.

В слое сезонного промерзания $h_п$ температуру грунта можно вычислять так же, как для слоя сезонного оттаивания сливающейся криолитозоны, т. е. в слое $h_п - 1$ *м* по температурному градиенту (табл. 5), считая температуру на глубине $h_п$ равной 0° С в холодный период года и 1° С в летнее время. В верхнем метровом слое грунта температура определяется по интерполяции между температурой на глубине 1 *м* и температурой на поверхности.

Глава четвертая

ТЕПЛОВЫЕ РАСЧЕТЫ

§ 20. Теплопотери трубопроводов и каналов при надземной прокладке

Теплопотери на 1 *м* трубы определяются по известной в теории теплопередачи формуле

$$Q = \kappa_т \pi (t_ж - t_в), \tag{15}$$

где Q — потери тепла трубой на длине 1 *м* в *ккал/м·ч*;
$t_ж$ — температура жидкости (или газа) в трубе в *град*;
$t_в$ — температура внешней среды (воздуха) в *град*;
$\kappa_т$ — линейный коэффициент теплопередачи трубы в *ккал/м·ч·град*:

$$\kappa_т = \frac{1}{\frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 d_2}}, \tag{16}$$

где d_1 — внутренний диаметр трубы в *м*;
d_2 — наружный диаметр трубы, включая теплоизоляцию, если она имеется, в *м*;
λ — коэффициент теплопроводности стенки трубы (или теплоизоляции) в *ккал/м·ч·град*;
α_2 — коэффициент теплопередачи на наружной поверхности трубы в *ккал/м²·ч·град*.

Для расчета коэффициента теплоотдачи на наружной поверхности надземных трубопроводов или каналов можно принимать формулу

$$\alpha_2 = 2{,}94 \frac{v^{0{,}6}}{d_2^{0{,}4}}, \tag{17}$$

которую для удобства расчета лучше записать так:

$$\alpha_2 = \exp(1{,}08 + 0{,}6 \ln v - 0{,}4 \ln d_2), \tag{18}$$

где v — скорость ветра в *м/сек*;
d_2 — наружный диаметр трубы, включая теплоизоляцию, в *м*. Экспонента (exp) берется по таблице прилож. 6.

В ряде расчетов необходимо знать температуру на наружной поверхности трубы $t_т$. Ее можно вычислять по формуле (19), вытекающей из формулы (15):

$$t_т = t_в + \frac{Q}{\pi \alpha_2 d_2}. \tag{19}$$

В расчетах теплопотерь трубопроводов при канальной прокладке внешней средой будет не наружный воздух, а воздух в канале. В этом случае, пользуясь формулой (15), следует вместо температуры наружного воздуха $t_в$ ставить температуру воздуха в канале;

$$t_к = \frac{\kappa_к t_в + \sum_{i=1}^{i=n} \kappa_{т,\,i} t_{ж.\,i}}{\kappa_к + \sum_{i=1}^{i=n} \kappa_{т,\,i}}, \tag{20}$$

где $t_к$ — температура воздуха в канале в *град*;
$\kappa_{т,\,i}$ и $t_{ж,\,i}$ — соответственно линейный коэффициент теплопередачи и температура транспортируемой жидкости для каждой трубы, уложенной в канале;
$\kappa_к$ — линейный коэффициент теплопередачи стенок канала в *ккал/м·ч·град*; рассчитывают также по формуле (16), считая условно канал трубой с диаметром

$$d_2 = \frac{2(a+b)}{\pi}, \tag{21}$$

где a и b — ширина и высота канала в *м*.

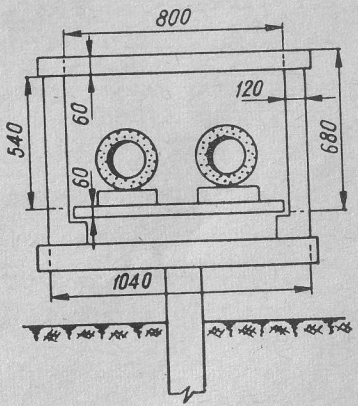


Рис. 45. Поперечный разрез надземного сборного железобетонного канала

Пример 6. Вычислить потери тепла трубопроводов водяной тепловой сети, уложенных в надземном железобетонном канале (рис. 45), при следующих исходных данных: температура воды в подающем трубопроводе $t_ж = 120°$ С, в обратном $t_ж = 70°$ С; температура наружного воздуха $t_в = -35°$ С при ветре со скоростью $v = 2$ *м/сек*; трубы стальные с внешним диаметром 159 *мм*, изолированные минеральной ватой с толщиной слоя теплоизоляции 80 *мм*; коэффициенты теплопроводности: теплоизоляции $\lambda = 0{,}06$ и стенок канала $\lambda_{жб} = 1{,}33$ *ккал/м·ч·град*.

Приводим канал к расчетной трубе с диаметром, определяемым по формуле (21):

$$d_2 = \frac{2(1{,}04 + 0{,}68)}{3{,}14} = 1{,}096 \text{ м}.$$

Толщина стенок расчетной трубы равна средней толщине стенок канала по его периметру, т. е.

$$\frac{2 \cdot 60(800 + 120) + 2 \cdot 120(540 + 60)}{2(800 + 120) + 2(540 + 60)} = 84 \text{ мм} = 0{,}084 \text{ м}.$$

Коэффициенты теплоотдачи определяем по формуле (18):
для канала

$$\alpha_2 = \exp(1{,}08 + 0{,}6 \ln 2 - 0{,}4 \ln 1{,}096) =$$
$$= \exp(1{,}08 + 0{,}6 \cdot 0{,}693 - 0{,}4 \cdot 0{,}095) = \exp 1{,}12 = 3{,}07 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град};$$

для труб, принимая скорость движения воздуха в канале 0,2 м/сек,

$$\alpha_2 = \exp(1{,}08 + 0{,}6 \ln 0{,}2 - 0{,}4 \ln 0{,}319) = \exp[1{,}08 + 0{,}6(-1{,}610) -$$
$$- 0{,}4(-1{,}143)] = \exp 0{,}57 = 1{,}77 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град}.$$

По формуле (16) определяем линейные коэффициенты теплопередачи:
для канала

$$\kappa_к = \frac{1}{\frac{1}{2 \cdot 1{,}33} \ln \frac{1{,}096}{0{,}928} + \frac{1}{3{,}07 \cdot 1{,}096}} = 2{,}76 \text{ ккал/м} \cdot \text{ч} \cdot \text{град};$$

для труб ($\kappa_т$ будет иметь одно и то же значение для обеих труб, так как конструкция их и условия работы идентичны)

$$\kappa_т = \frac{1}{\frac{1}{2 \cdot 0{,}06} \ln \frac{0{,}319}{0{,}159} + \frac{1}{1{,}77 \cdot 0{,}319}} = 0{,}13 \text{ ккал/м} \cdot \text{ч} \cdot \text{град}.$$

Находим температуру воздуха в канале по формуле (20):

$$t_к = \frac{2{,}76(-35) + 0{,}13 \cdot 120 + 0{,}13 \cdot 70}{2{,}76 + 0{,}13 + 0{,}13} = -23{,}8^\circ \text{C}.$$

Зная температуру воздуха в канале, можно по формуле (15) рассчитать потери тепла в трубопроводах. Для подающего трубопровода в нашем примере теплопотери с одного метра трубы

$$Q = 0{,}13 \cdot 3{,}14[120 - (-23{,}8)] = 58{,}7 \text{ ккал/м} \cdot \text{ч}.$$

Температуру на поверхности подающей трубы можно найти по формуле (19):

$$t_т = -23{,}8 + \frac{58{,}7}{3{,}14 \cdot 1{,}77 \cdot 0{,}319} = 9{,}4^\circ \text{C}.$$

Тем же путем определяются теплопотери обратного трубопровода и канала, а также температура на поверхности обратного теплопровода и на наружной поверхности канала.

§ 21. Теплопотери трубопроводов при подземной прокладке

В теории теплопередачи при определении теплопотерь трубы, заложенной в грунт, рассматривается известная формула Форхгеймера. Она выведена в предположении стационарного температурного поля грунта и из условия, что окружающий грунтовый массив однороден на всей глубине от поверхности массива. В таком предположении формула Форхгеймера имеет вид:

$$Q = \frac{\pi(t_т - t_п)}{\frac{1}{2\lambda_г} \ln\left[\frac{2h}{d_2} + \sqrt{\left(\frac{2h}{d_2}\right)^2 - 1}\right]}, \qquad (22)$$

где $t_п$ — температура на поверхности грунта в *град*;
$\lambda_г$ — коэффициент теплопроводности в *ккал/м·ч·град*;
h — глубина заложения оси трубы в грунт в *м*.

Остальные обозначения те же, что и в предыдущем параграфе.

Формула Форхгеймера не учитывает отепляющего воздействия трубопровода и образования вследствие этого зоны талого грунта вокруг трубы. Различными авторами был предложен ряд модификаций формулы (22), где учитывалось появление талика в мерзлой толще грунта. Укажем на одну из последних таких формул, предложенную С. В. Томирдиаро в 1963 г.:

$$Q = \frac{2\pi(\lambda_т t_т - \lambda_м t_г)}{\ln\left(\frac{2h}{d_2} + \sqrt{\frac{4h^2}{d_2^2} - 1}\right)}. \qquad (23)$$

Здесь $\lambda_т$ и $\lambda_м$ соответственно коэффициенты теплопроводности талого и мерзлого грунта, а $t_г$ — температура грунта на глубине заложения оси трубы.

В формуле (23) температуру на поверхности трубы $t_т$ в случае использования стальных труб без теплоизоляции можно принимать равной температуре жидкости (или газа) в трубе. При прокладке труб в теплоизоляции необходимо знать температуру на поверхности теплоизоляции, что, учитывая полуэмпирический характер формулы (23), можно сделать только приближенно. Поэтому проще воспользоваться методом эквивалентного слоя, заменяя в формуле (23) слой грунта над трубой приведенным слоем,

$$h_{пр} = h + \delta \frac{\lambda_г}{\lambda}, \qquad (24)$$

где $h_{пр}$ — приведенная высота слоя грунта над трубой в *м*;
δ — толщина слоя теплоизоляции трубы в *м*;
$\lambda_г$ — коэффициент теплопроводности в *ккал/м·ч·град* (принимается для мерзлого грунта, если температура грунта $t_г$ отрицательна, и для талого грунта, если она положительна);
λ — коэффициент теплопроводности теплоизоляции в *ккал/м·ч·град*.

Пример 7. Определить теплопотери канализационной трубы при минимальной за год температуре грунта. Такая задача может встретиться при решении вопроса, на какой длине канализационной сети сточная жидкость не замерзнет.

Трубы стальные диаметром 200 *мм* уложены на глубине 2,25 *м* от поверхности (см. рис. 9). Минимальная температура грунта на глубине укладки трубы, определенная по формуле (12), получилась —13° С. Коэффициенты теплопроводности грунта $\lambda_м = 1{,}48$ и $\lambda_т = 1{,}06$ *ккал/м·ч·град*. Температура сточной жидкости $t_ж = 11°$ С. Коэффициент теплопроводности теплоизоляции (стекловолокно с защитным слоем из стеклопластика) $\lambda = 0{,}05$ *ккал/м·ч·град*.

Внутренний диаметр трубы $d_1 = 0{,}2$ *м*. Толщина теплоизоляции 0,02 *м*. Приведенная высота грунта над трубой по формуле (24)

$$h_{пр} = 2{,}25 + 0{,}02 \cdot \frac{1{,}48}{0{,}05} = 2{,}84 \text{ м}.$$

Определяем теплопотери по формуле (23), полагая в ней $h = h_{пр}$:

$$Q = \frac{2 \cdot 3{,}14\,[1{,}06 \cdot 11 - 1{,}48\,(-13)]}{\ln\left(\frac{2 \cdot 2{,}84}{0{,}24} + \sqrt{\frac{4 \cdot 2{,}84^2}{0{,}24^2} - 1}\right)} = 50 \text{ ккал/м·ч}.$$

Итак, при замене фактической глубины заложения трубы в грунт на приведенную глубину можно рассчитывать теплопотери трубопровода, не зная температуры на его поверхности. Тем не менее знание этой температуры необходимо для дальнейших расчетов, а именно: для определения ореола протаивания грунта вокруг трубопровода (см. § 34 и 36). Температуру на поверхности изоляции можно получить обратным расчетом, зная уже значение Q. Для этого следует решить уравнение (23), приняв за неизвестную величину температуру на поверхности трубы,

$$t_т = \frac{\frac{Q}{2\pi}\ln\left(\frac{2h}{d_2} + \sqrt{\frac{4h^2}{d_2^2} - 1}\right) + \lambda_м t_г}{\lambda_т}. \qquad (25)$$

В нашем примере, подставив в формулу (25) величину $Q = 50$ *ккал/м·ч*, получим температуру на поверхности изоляции трубы $t_т = 9{,}3°$ С. В этом расчете в формулу (25) надо подставлять уже значение $h = 2{,}25$ *м* — фактическую глубину заложения трубы в грунт, а не $h = h_{пр}$.

§ 22. Теплопотери в подземных каналах

Теплопотери подземного канала при совмещенной прокладке различных трубопроводов можно определить по формуле, аналогичной формуле (23):

$$Q = \frac{2\pi\,(\lambda_т t_к - \lambda_м t_г)}{\ln\left(\frac{2h_{пр}}{d_2} + \sqrt{\frac{4h_{пр}^2}{d_2^2} - 1}\right)}. \qquad (26)$$

Здесь $h_{пр}$ — приведенная глубина заложения оси канала в грунт, определенная по формуле (24), где δ принята равной толщине стенки канала, в *м*.

Температура воздуха в канале $t_к$ неизвестна, но ее можно найти следующим расчетом. Суммарные теплопотери всех трубопроводов, уложенных в канале, согласно формуле (15),

$$\sum Q = \pi \sum \kappa_{т,\,i}\,(t_{ж,\,i} - t_к). \qquad (а)$$

Так как потери тепла всех трубопроводов должны равняться теплопотерям канала, то, приравнивая уравнения (26) и (а), найдем выражение для температуры воздуха в канале:

$$t_к = \frac{\lambda_м t_г + a \sum k_{т,\,i}\, t_{ж,\,i}}{\lambda_т + a \sum \kappa_{т,\,i}}, \qquad (27)$$

где $k_{т,\,i}$ — линейный коэффициент теплопередачи данной трубы в *ккал/м·ч·град*;

$t_{ж,\,i}$ — температура жидкости в данной трубе в *град*;

$$a = \frac{1}{2}\ln\left(\frac{2h_{пр}}{d_2} + \sqrt{\frac{4h_{пр}^2}{d_2^2} - 1}\right). \qquad (28)$$

Определив теплопотери канала по формуле (26) и подставив найденное значение в формулу (25), можно найти температуру на поверхности канала, необходимую, как увидим ниже, для расчета протаивания грунта под каналом.

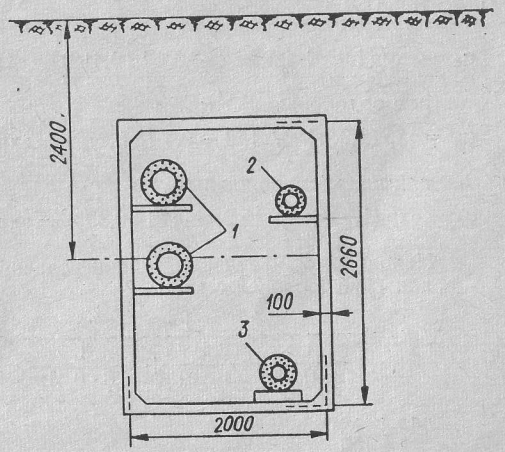


Рис. 46. Подземный санитарно-технический канал

1 — теплосеть; *2* — водопровод; *3* — канализация

Пример 8. Рассчитать теплопотери и температуру в подземном проходном канале, где уложены сети теплоснабжения, водоснабжения и канализации (рис. 46), при следующих исходных данных. Тепловые сети — трубы стальные с наружным диаметром 219 *мм*, слой теплоизоляции толщиной 100 *мм*; температура теплоносителя $t_ж = 105°$ С в подающей трубе и $t_ж = 70°$ С в обратной трубе. Водопровод — труба стальная с наружным диаметром 159 *мм*; слой теплоизоляции толщиной 60 *мм*; температура воды $t_ж = 10°$ С. Канализация — трубы стальные с наружным диаметром 219 *мм*, слой теплоизоляции толщиной 60 *мм*; температура сточных вод $t_ж = 14°$ С. Коэффициент теплопроводности теплоизоляции труб $\lambda = 0{,}08$ *ккал/м·ч·град*. Канал

из сборных железобетонных элементов. Коэффициент теплопроводности стенок канала $\lambda_{жб} = 1{,}30$ *ккал/м·ч·град*.

В расчеты входит температура грунта на глубине заложения оси канала. На ней следует остановиться особо. Если расчет теплопотерь делается для определения остывания жидкостей в трубах или для нахождения необходимой толщины теплоизоляции труб, то температуру грунта $t_г$ следует брать как минимальную за год, т. е. вычислять по формуле (12). Если же определение теплопотерь ведется для расчета глубины протаивания грунта под каналом (см. § 36 и 40), то следует рассматривать два случая: первый — когда канал не вентилируется зимой для промораживания грунтов основания канала морозным воздухом. В этом случае температуру грунта следует брать как среднюю за год, иначе говоря ее можно принять $t_г = t_0$, т. е. приравнять температуре вечномерзлой толщи грунтов (см. стр. 67). При вентилируемом канале $t_г$ следует брать как среднюю за теплый период года. Для этого необходимо по формуле (11) рассчитать температуру грунта на глубине заложения оси канала на 15 число мая, июня, июля, августа и сентября и из полученных значений найти среднюю температуру за теплый период года.

Пусть в нашем примере мы имеем именно этот последний случай и расчетом получили, что температура (средняя) за теплый период года на глубине 2,4 *м* от поверхности $t_г = -5{,}5°$ С. По табл. 4 берем коэффициенты теплопроводности грунта. Пусть в нашем случае они получились следующими: $\lambda_м = 1{,}54$ и $\lambda_т = 1{,}18$ *ккал/м·ч·град*.

По формуле (21) приводим канал к расчетной схеме — трубе диаметром

$$d_2 = \frac{2\,(2100 + 2760)}{3{,}14} = 3096\ мм = 3{,}10\ м.$$

Для определения коэффициента теплоотдачи α_2 на поверхности труб скорость движения воздуха в канале примем равной 1 *м/сек*. Тогда по формуле (18) получим:

для труб тепловой сети

$$\alpha_2 = \exp(1{,}08 + 0{,}6 \ln 2 - 0{,}4 \ln 0{,}419) = \exp 1{,}84 = 6{,}3\ ккал/м^2 \cdot ч \cdot град;$$

для водопроводной трубы

$$\alpha_2 = \exp(1{,}08 + 0{,}6 \ln 2 - 0{,}4 \ln 0{,}279) = \exp 2{,}01 = 7{,}5\ ккал/м^2 \cdot ч \cdot град;$$

для канализационной трубы

$$\alpha_2 = \exp(1{,}08 + 0{,}6 \ln 2 - 0{,}4 \ln 0{,}339) = \exp 1{,}93 = 6{,}9\ ккал/м^2 \cdot ч \cdot град.$$

Находим коэффициенты теплопередачи труб по формуле (16):
для труб тепловой сети

$$\kappa_т = \frac{1}{\frac{1}{2 \cdot 0{,}08} \ln \frac{0{,}419}{0{,}219} + \frac{1}{6{,}3 \cdot 0{,}419}} = 0{,}23\ ккал/м \cdot ч \cdot град;$$

для водопровода

$$\kappa_т = \frac{1}{\frac{1}{2 \cdot 0{,}08} \ln \frac{0{,}279}{0{,}159} + \frac{1}{7{,}5 \cdot 0{,}279}} = 0{,}25\ ккал/м \cdot ч \cdot град;$$

для канализации

$$\kappa_т = \frac{1}{\frac{1}{2 \cdot 0{,}08} \ln \frac{0{,}339}{0{,}219} + \frac{1}{6{,}9 \cdot 0{,}339}} = 0{,}32\ ккал/м \cdot ч \cdot град.$$

Приведенный слой грунта по формуле (24)

$$h_{пр} = 2{,}4 + 0{,}1 \frac{1{,}54}{1{,}30} = 2{,}52\ м.$$

Вычисляем значение величины a по формуле (28):

$$a = \frac{1}{2} \ln \left(\frac{2 \cdot 2{,}52}{3{,}10} + \sqrt{\frac{4 \cdot 2{,}52^2}{3{,}10^2} - 1} \right) = \frac{1}{2} \ln 3{,}12 = 0{,}53.$$

По формуле (27) находим температуру воздуха в канале:

$$t_к = \frac{1{,}54\,(-5{,}5) + 0{,}53\,(0{,}23 \cdot 105 + 0{,}23 \cdot 70 + 0{,}25 \cdot 10 + 0{,}32 \cdot 14)}{1{,}18 + 0{,}53\,(0{,}23 + 0{,}23 + 0{,}25 + 0{,}32)} = 9{,}6°\ С.$$

Отметим, что полученная расчетом температура в канале близко сходится с фактическими измерениями. Так, в Норильске среднегодовая температура воздуха в каналах составляла в среднем 6,3° С для одноярусных и 3,4° С для двухъярусных каналов *. По другим данным среднегодовая температура двухъярусных каналов была 2,5° С и среднезимняя —2,2° С **. Средняя температура за четыре летних месяца (т. е. именно наш случай) в каналах Норильска, по данным Ленгипроарктики, колебалась от 8 до 10° С.

Зная температуру воздуха в канале, легко подсчитать по формуле (26) и теплопотери канала:

$$Q = \frac{2 \cdot 3{,}14\,[1{,}18 \cdot 9{,}6 - 1{,}54\,(-5{,}5)]}{\ln \left(\frac{2 \cdot 2{,}52}{3{,}10} + \sqrt{\frac{4 \cdot 2{,}52^2}{3{,}10^2} - 1} \right)} = 105\ ккал/м \cdot ч.$$

Теперь можно определить теплопотери каждой трубы в отдельности, так как все данные для этого уже известны. Расчет ведется по формуле (15), в которой следует положить температуру внешней среды $t_в = t_к = 9{,}6°$ С.

Температура на поверхности канала по формуле (25)

$$t_т = \frac{\frac{105}{2 \cdot 3{,}14} \ln \left(\frac{2 \cdot 2{,}4}{3{,}10} + \sqrt{\frac{4 \cdot 2{,}4^2}{3{,}10^2} - 1} \right) + 1{,}54\,(-5{,}5)}{1{,}18} = 8{,}8°\ С.$$

§ 23. Теплопотери трубопроводов, уложенных в насыпи

Теплопотери трубопроводов, уложенных в насыпи (в грунтовом обваловании) будут неодинаковы по периметру трубы. Потери тепла вверх от шелыги трубы $Q_в$ можно рассматривать как теплопотери трубы в теплоизоляции при наземной прокладке и рассчитывать по формуле (15), а потери тепла вниз $Q_н$ определять как теплопотери трубопровода, заложенного в грунт на глубину h от поверхности (рис. 47).

---

* В. А. Орлов. Вопросы проектирования и строительства инженерных сетей на вечномерзлых грунтах. В кн.: Строительство в районах Восточной Сибири и Крайнего Севера. Сб. 2. Красноярск, 1962.

** П. А. Лавров. Промышленные и городские коммуникации в условиях Крайнего Севера. В кн.: Инженерные сети в условиях вечной мерзлоты. Сб. научных работ АКК, вып. XII, Госстройиздат, 1962.

В этом случае можно пользоваться формулой Форхгеймера (22). Тогда потери тепла с 1 *пог. м* трубы, уложенной в насыпи, определятся по формуле

$$Q = Q_{\text{в}} \frac{\beta}{360} + Q_{\text{н}} \frac{360 - \beta}{360}. \qquad (29)$$

Величина линейного коэффициента теплопередачи $\kappa_{\text{т}}$, входящего в формулу (15), будет зависеть от конструкции прокладки трубопровода (труба может быть уложена в теплоизоляции из мха или торфа или без теплоизоляции), а также

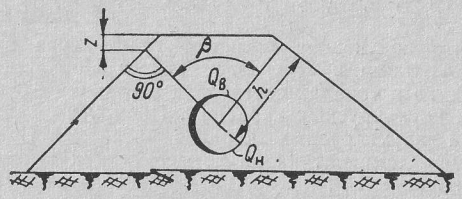


Рис. 47. Схема для расчета теплопотерь трубой, уложенной в насыпи

от времени года. В общем случае теплоизоляцию труб можно рассматривать состоящей из ряда концентрических слоев (рис. 48).

В зимнее время, когда грунтовая обсыпка трубы находится в мерзлом состоянии, эти слои будут следующие, считая сверху вниз: $\delta_{\text{с}}$ — слой снега; $\delta_{\text{м}}$ — слой мерзлого грунта обсыпки; $\delta_{\text{из, м}}$ — слой изоляции (мха или торфа) в мерзлом состоянии; $\delta_{\text{из, т}}$ — слой теплоизоляции в талом состоянии (благодаря ореолу оттаивания от тепла, выделяемого трубопроводом). Летом, когда грунт обсыпки трубы будет находиться в талом состоянии, слои соответственно будут: $\delta_{\text{т}}$ — слой талого грунта обсыпки и $\delta_{\text{из, т}}$ — слой теплоизоляции (мха или торфа) в талом состоянии.

Для случая многослойной теплоизоляции значение линейного коэффициента теплопередачи, согласно формуле (16), составит (см. рис. 48):

для зимнего периода

$$\kappa_{\text{т}} = \frac{1}{\frac{1}{2\lambda_{\text{с}}} \ln \frac{d_{\text{с}}}{d_{\text{м}}} + \frac{1}{2\lambda_{\text{м}}} \ln \frac{d_{\text{м}}}{d_{\text{из}}} + \frac{1}{2\lambda_{\text{из, м}}} \ln \frac{d_{\text{из}}}{d_{\text{т}}} + \frac{1}{2\lambda_{\text{из, т}}} \ln \frac{d_{\text{т}}}{d_2} + \frac{1}{\alpha_2 d_{\text{с}}}}; \qquad (30)$$

для летнего периода

$$\kappa_{\text{т}} = \frac{1}{\frac{1}{2\lambda_{\text{т}}} \ln \frac{d_{\text{г}}}{d_{\text{из}}} + \frac{1}{2\lambda_{\text{из, т}}} \ln \frac{d_{\text{из}}}{d_2} + \frac{1}{\alpha_2 d_{\text{г}}}}. \qquad (31)$$

Если теплоизоляции нет и труба засыпается непосредственно грунтом, то формулы для линейного коэффициента теплопередачи упрощаются:

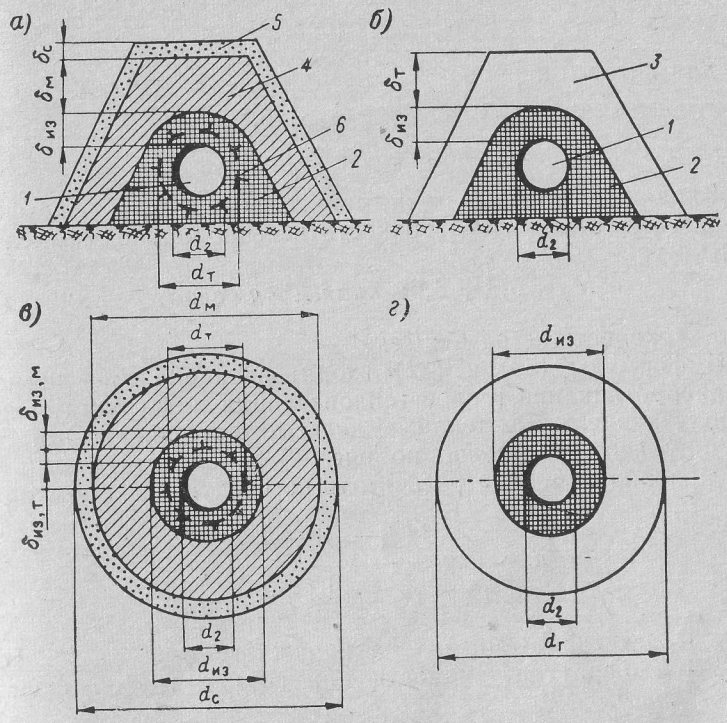


Рис. 48. Расчетные схемы для трубопроводов, уложенных в насыпи

а и *в* — для зимнего периода; *б* и *г* — для летнего периода; *1* — трубопровод; *2* — теплоизоляция из мха или торфа; *3* — грунт насыпи в талом состоянии; *4* — то же, в мерзлом состоянии; *5* — снежный покров; *6* — граница ореола оттаивания вокруг трубы

для зимнего периода

$$\kappa_{\text{т}} = \frac{1}{\frac{1}{2\lambda_{\text{с}}} \ln \frac{d_{\text{с}}}{d_{\text{м}}} + \frac{1}{2\lambda_{\text{м}}} \ln \frac{d_{\text{м}}}{d_{\text{т}}} + \frac{1}{2\lambda_{\text{г}}} \ln \frac{d_{\text{т}}}{d_2} + \frac{1}{\alpha_2 d_{\text{с}}}}; \qquad (32)$$

для летнего периода

$$\kappa_{\text{т}} = \frac{1}{\frac{1}{2\lambda_{\text{т}}} \ln \frac{d_{\text{г}}}{d_2} + \frac{1}{\alpha_2 d_{\text{г}}}}. \qquad (33)$$

Диаметры, входящие в формулы значений $\kappa_{\text{т}}$, легко находятся по рис. 48:

для зимнего периода

$$d_c = d_2 + 2(\delta_{из} + \delta_м + \delta_c); \quad (34)$$

$$d_м = d_2 + 2(\delta_{из} + \delta_м); \quad (35)$$

$$d_{из} = d_2 + 2\delta_{из}; \quad (36)$$

для летнего периода

$$d_г = d_2 + 2(\delta_{из} + \delta_т); \quad (37)$$

$$d_{из} = d_2 + 2\delta_{из}. \quad (38)$$

Входящую в формулы расчета $\kappa_т$ величину α_2 — коэффициент теплоотдачи на поверхности насыпи можно определять по формуле

$$\alpha_2 = 5{,}3 + 3{,}6v \ ккал/м^2 \cdot ч \cdot град, \quad (39)$$

где v — скорость ветра в *м/сек*.

В формулы (30) и (32) входит величина $d_т$ — диаметр ореола протаивания в слое теплоизоляции или грунта засыпки, получающегося от тепла, выделяемого трубопроводом. Эту величину непосредственно по рис. 48 определить нельзя, но приближенно ее можно рассчитать по следующей формуле:

$$d_т = \exp \frac{\ln d_c - 1{,}4 \frac{t_в}{t_ж} \ln d_2}{1 - 1{,}4 \frac{t_в}{t_ж}}, \quad (40)$$

где $t_в$ — расчетная температура наружного воздуха в *град*;

$t_ж$ — температура жидкости или газа в трубопроводе в *град*;

$\exp x = e^x$ — экспонента (значения экспоненциальных функций даются в прилож. 6).

При расчете по формуле (40) может получиться, что $d_т$ окажется меньше d_2. Это будет указывать на то, что нулевая изотерма проходит внутри трубы и, следовательно, талого слоя вокруг трубопровода нет. В этом случае формула (30) примет вид:

$$\kappa_т = \frac{1}{\frac{1}{2\lambda_c} \ln \frac{d_c}{d_м} + \frac{1}{2\lambda_м} \ln \frac{d_м}{d_{из}} + \frac{1}{2\lambda_{из,\,м}} \ln \frac{d_{из}}{d_2} + \frac{1}{\alpha_2 d_c}}, \quad (41)$$

а формула (32) запишется так:

$$\kappa_т = \frac{1}{\frac{1}{2\lambda_c} \ln \frac{d_c}{d_м} + \frac{1}{2\lambda_м} \ln \frac{d_м}{d_2} + \frac{1}{\alpha_2 d_c}}. \quad (42)$$

Расчетные значения коэффициентов теплопроводности снега, мха и торфа можно брать из § 18. Толщину снежного покрова δ_c для расчетов следует принимать как среднюю из

наибольших декадных высот снежного покрова на зиму с коэффициентом 0,25.

Для расчета теплопотерь трубопроводов вниз $Q_н$ по формуле Форхгеймера (22) надо привести величину h (см. рис. 47) к однородной среде по теплопроводности насыпи. Тогда величина h выразится следующими формулами:

для зимнего периода

$$h = \frac{1}{\cos \frac{\beta}{2}} \left[\lambda_м \left(\frac{\delta_c}{\lambda_c} + \frac{\delta_{из,\,м}}{\lambda_{из,\,м}} + \frac{\delta_{из,\,т}}{\lambda_{из,\,т}} \right) + \delta_м + \frac{d_2}{2} - z \right]; \quad (43)$$

для летнего периода

$$h = \frac{1}{\cos \frac{\beta}{2}} \left(\lambda_т \frac{\delta_{из}}{\lambda_{из,\,т}} + \delta_т + \frac{d_2}{2} - z \right). \quad (44)$$

При отсутствии теплоизоляции из торфа или мха будем иметь:

для зимнего периода

$$h = \frac{1}{\cos \frac{\beta}{2}} \left[\lambda_м \left(\frac{\delta_c}{\lambda_c} + \frac{d_т - d_2}{2\lambda_т} \right) + \delta_м - \frac{d_т}{2} + d_2 - z \right]; \quad (45)$$

для летнего периода

$$h = \frac{1}{\cos \frac{\beta}{2}} \left(\delta_т + \frac{d_2}{2} - z \right). \quad (46)$$

Символы в этих формулах ясны из рис. 47 и 48 и из предыдущих формул настоящего параграфа. Величина z берется графически с чертежа конструкции для данного типа прокладки трубопровода.

Пример 9. В районе Вилюйска по слою подготовки из грунта в теплоизоляции из торфа уложен нефтепровод диаметром $d_2 = 0{,}274$ *м*. Сверху трубопровод засыпан мелкозернистым песком с толщиной слоя грунта над теплоизоляцией 0,4 *м* (рис. 49). Температура нефти на расчетном участке $t_ж = 15°$ С. Определить теплопотери нефтепровода в июле и январе.

Климатические данные для Вилюйска: в январе температура воздуха $t_в = -38{,}2°$ С, скорость ветра 1,8 *м/сек*; в июле $t_в = 18°$ С, скорость ветра 2,3 *м/сек*; средняя из наибольших декадных высот снежного покрова 50 *см*. Согласно сказанному выше, расчетную высоту снежного покрова принимаем $\delta_c = 0{,}50 \cdot 0{,}25 = 0{,}12$ *м*. Зная скорость ветра, по формуле (39) определяем коэффициенты теплоотдачи на поверхности насыпи:

в январе $\alpha_2 = 5{,}3 + 3{,}6 \cdot 1{,}8 = 11{,}8$ *ккал/м² · ч · град*;

в июле $\alpha_2 = 5{,}3 + 3{,}6 \cdot 2{,}3 = 13{,}6$ *ккал/м² · ч · град*.

Для расчета по формуле Форхгеймера надо знать температуру на поверхности насыпи (грунтовой засыпки) $t_п$. В зимнее время она будет равна температуре воздуха, т. е. $t_п = t_в = -38{,}2°$ С. Для летнего периода температуру на поверхности вычисляем по формуле (14):

$$t_п = 2 + 1{,}15 \cdot 18 = 22{,}7 \ °C.$$

Для установления коэффициентов теплопроводности предположим, что данных для грунтов засыпки, кроме наименования грунта (мелкий песок), у нас нет. Поэтому берем нормативную влажность для таких грунтов 8% (см. стр. 71) и увеличиваем ее на 25% (тем самым учитываем мерзлое состояние грунта). Следовательно, $W = 10\%$. Для этой влажности по графику на рис. 44 находим объемный вес мерзлого грунта $\gamma_0 = 2{,}1$ *т/м*³. По этим данным из табл. 4 находим: $\lambda_м = 2{,}20$ и $\lambda_т = 1{,}76$ *ккал/м · ч · град* (взяты ближайшие из табличных данных). Коэффициенты теплопроводности снега и торфа берем из § 18: $\lambda_с = 0{,}50$, $\lambda_{из,\,м} = 0{,}45$ и $\lambda_{из,\,т} = 0{,}30$ *ккал/м · ч · град*.

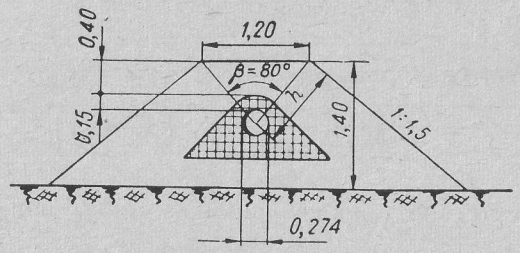


Рис. 49. Нефтепровод с теплоизоляцией из торфа, уложенный в насыпи (расчетная схема к примеру 9)

Далее, пользуясь рис. 48 и 49 и формулами (34)—(38), находим диаметры колец теплоизоляции трубы:

$$d_с = 0{,}274 + 2\,(0{,}15 + 0{,}40 + 0{,}12) = 1{,}61 \text{ м};$$

$$d_м = 0{,}274 + 2\,(0{,}15 + 0{,}40) = 1{,}37 \text{ м};$$

$$d_{из} = 0{,}274 + 2 \cdot 0{,}15 = 0{,}57 \text{ м}.$$

Соответственно для летнего периода:

$$d_г = 0{,}274 + 2\,(0{,}15 + 0{,}40) = 1{,}37 \text{ м};$$

$$d_{из} = 0{,}274 + 2 \cdot 0{,}15 = 0{,}57 \text{ м}.$$

По формуле (40) вычисляем диаметр ореола оттаивания вокруг трубы в зимнее время:

$$d_т = \exp\frac{\ln 1{,}61 - 1{,}4\dfrac{-38{,}2}{15} \cdot \ln 0{,}274}{1 - 1{,}4\dfrac{-38{,}2}{15}} = \exp(-1{,}16) = 0{,}31 \text{ м}.$$

Таким образом, вокруг трубы образуется талый слой толщиной всего $\left(\dfrac{0{,}31 - 0{,}27}{2}\right) = 0{,}02$ *м*, т. е. практически его можно в расчетах не принимать во внимание и для вычисления линейного коэффициента теплопередачи пользоваться формулой (41) *.

* Во многих случаях при больших диаметрах трубопровода и высокой температуре транспортируемого продукта, например в газопроводах, талый слой вокруг трубы будет значительной толщины и пренебрегать им в расчетах нельзя.

Имея все исходные данные, вычисляем значения $\kappa_т$:
для зимнего периода по формуле (41)

$$\kappa_т = \frac{1}{\dfrac{1}{2 \cdot 0{,}50}\ln\dfrac{1{,}61}{1{,}37} + \dfrac{1}{2 \cdot 2{,}20}\ln\dfrac{1{,}37}{0{,}57} + \dfrac{1}{2 \cdot 0{,}45}\ln\dfrac{0{,}57}{0{,}274} + \dfrac{1}{11{,}8 \cdot 1{,}61}} =$$

$$= 0{,}815 \text{ ккал/м · ч · град};$$

для летнего периода по формуле (31)

$$\kappa_т = \frac{1}{\dfrac{1}{2 \cdot 1{,}76}\ln\dfrac{1{,}37}{0{,}57} + \dfrac{1}{2 \cdot 0{,}30}\ln\dfrac{0{,}57}{0{,}274} + \dfrac{1}{13{,}6 \cdot 1{,}37}} =$$

$$= 0{,}656 \text{ ккал/м · ч · град}.$$

Теплопотери верхней части трубы по формуле (15) будут: в январе $Q_в = 0{,}815 \cdot 3{,}14\,[15 - (-38{,}2)] = 136{,}14$ *ккал/м · ч*; в июле $Q_в = 0{,}656 \cdot 3{,}14\,(15 - 18) = -6{,}18$ *ккал/м · ч* (т. е. летом будет происходить нагревание нефти).

Для определения теплопотерь с нижней части трубы необходимо вычислить величину h — условную глубину заложения трубы в грунт (см. рис. 47). В нашем случае (см. рис. 49) $z = 0$. Кроме того, как указывалось выше, можно пренебречь слоем талого торфа вокруг трубы толщиной 2 *см* и считать, что зимой весь слой теплоизоляции вокруг трубы будет находиться в мерзлом состоянии. Тогда для зимнего периода по формуле (43)

$$h = \frac{1}{\cos 40°}\left[2{,}20\left(\frac{0{,}12}{0{,}50} + \frac{0{,}15}{0{,}45}\right) + 0{,}40 + \frac{0{,}274}{2}\right] = 2{,}34 \text{ м},$$

соответственно для летнего периода по формуле (44)

$$h = \frac{1}{\cos 40°}\left(1{,}76\,\frac{0{,}15}{0{,}30} + 0{,}40 + \frac{0{,}274}{2}\right) = 1{,}85 \text{ м}.$$

Полученное значение h подставляем в формулу Форхгеймера (22), учитывая, что температуру на поверхности трубы можно считать равной температуре нефти в трубе, так как последняя стальная, т. е. $t_т = t_ж$. Для зимнего периода следует принимать $\lambda_г = \lambda_м$, для летнего периода $\lambda_г = \lambda_т$. Температуры на поверхности грунта $t_п$ были определены ранее, при выборе исходных данных.

Теплопотери трубопровода в грунт составят:
для января

$$Q_н = \frac{3{,}14\,[15 - (-38{,}2)]}{\dfrac{1}{2 \cdot 2{,}20}\ln\left[\dfrac{2 \cdot 2{,}34}{0{,}274} + \sqrt{\left(\dfrac{2 \cdot 2{,}34}{0{,}274}\right)^2 - 1}\right]} = 206{,}23 \text{ ккал/м · ч};$$

для июля

$$Q_н = \frac{3{,}14\,(15 - 22{,}7)}{\dfrac{1}{2 \cdot 1{,}76}\ln\left[\dfrac{2 \cdot 1{,}85}{0{,}274} + \sqrt{\left(\dfrac{2 \cdot 1{,}85}{0{,}274}\right)^2 - 1}\right]} = -25{,}83 \text{ ккал/м · ч}.$$

Окончательно теплопотери трубопровода находим по формуле (29):
для января

$$Q = 136{,}14\,\frac{80}{360} + 206{,}23\,\frac{360 - 80}{360} = 190{,}5 \text{ ккал/м · ч};$$

для июля

$$Q = -6{,}18\,\frac{80}{360} + \left(-25{,}83\,\frac{360 - 80}{360}\right) = -21{,}4 \text{ ккал/м · ч}.$$

§ 24. Расчетная температура жидкостей в трубопроводах

Для предохранения водопроводной сети от замерзания производится подогрев воды. Для районов с суровым климатом приходится прибегать к обогреву не только водопроводной воды, но и сточных вод канализации, нефтепроводов и трубопроводов, подающих смазочные материалы.

При подогреве водопроводной воды верхний предел для начальной температуры ее не должен превышать 17° С по санитарно-гигиеническим условиям. В Норильске температура воды колеблется от 8 до 14° С, но даже такая температура считается излишне высокой, так как приводит к образованию значительных таликов вокруг труб, укладываемых в грунте. В Якутске вода подогревается до 10—15° С из расчета падения температуры воды на 1—4° С на километре сети. Согласно нормам СН 353—66 «Указания по проектированию населенных мест, предприятий, зданий и сооружений в северной строительно-климатической зоне» (Госстрой СССР, 1967 г.), в системах хозяйственно-питьевого водопровода на вводах в здания температура должна быть не выше 20° С.

Минимальная температура воды в водоводах не должна быть ниже 0,5° С для труб диаметром 600 *мм* и менее и ниже 0,3° С для труб бо́льшего диаметра. Для разводящих сетей минимальная температура воды по санитарно-гигиеническим соображениям должна быть не ниже 3° С. Вода, подаваемая непосредственно в охладительные системы промышленных предприятий, может иметь температуру, близкую к 0° С.

СН 353—66 дают несколько другие указания, а именно: при теплотехнических расчетах минимальную температуру воды в водоводах и разводящих сетях рекомендуется принимать:

для труб диаметром до 300 *мм*	3° С
» » » 300—500 »	1° С

В целях снижения затрат на подогрев воды и тепловую изоляцию трубопроводов в водоводах диаметром более 500 *мм* допускается образование ледяной корки на внутренней поверхности трубопровода.

Температура сточной жидкости, поступающей в канализацию, на основании опыта Норильска, колеблется от 10 до 15° С для домов без горячего водоснабжения и от 20 до 25° С для домов с горячим водоснабжением. Следует учитывать, что температура сточной жидкости не зависит от среднегодовой температуры воздуха, а меняется главным образом от степени благоустройства населенного пункта и отчасти от температуры воды в водопроводной сети. В Магадане температура сточной жидкости на выпуске из жилых домов с горячим водоснабжением колеблется в теплый период года от

19 до 26° С и в холодный период — от 18 до 21° С. Соответственно для домов без горячего водоснабжения имеем: в теплый период года температуру 5—11° С и в холодный период года — 4—8° С.

Минимальную температуру в местах выпусков канализации (общегородских) лучше принимать не ниже 4° С. Сточная же вода, поступающая на очистные сооружения, не должна иметь температуру ниже 7° С. Нормы СН 353—66 разрешают расчетную температуру сточной жидкости в местах выпуска из самотечного коллектора принимать не ниже 1° С.

Согласно СН 353—66, температуру воды в подающем трубопроводе теплосети допускается принимать ниже 130° С, с целью повышения гидравлической устойчивости тепловых сетей и повышения теплоаккумулирующей способности трубопроводов.

§ 25. Остывание жидкостей и газов в трубопроводах

Теорию остывания жидкостей при постоянном их движении по трубопроводу разработал В. Г. Шухов. Им была получена следующая формула:

$$\ln \frac{t_{нач} - t_в}{t_{кон} - t_в} = \frac{\kappa_т \pi l}{cG}, \qquad (47)$$

где $t_{нач}$ и $t_{кон}$ — соответственно начальная и конечная температуры жидкости в трубопроводе в °С;

l — длина рассматриваемого участка трубопровода в *м*;

$t_в$ — температура среды, омывающей трубу (наружного воздуха или воздуха в канале), в *град*;

$\kappa_т$ — линейный коэффициент теплопередачи трубы в *ккал/м·ч·град*;

G — весовой расход жидкости в *кг/ч*;

c — удельная теплоемкость любой жидкости в *ккал/кг·град* (для воды $c = 1$, для нефти $c = 0{,}4 \div 0{,}5$).

Для расчета остывания жидкости формулу Шухова удобнее представить в виде:

$$\frac{t_{нач} - t_в}{t_{кон} - t_в} = \exp \frac{\kappa_т \pi l}{cG}, \qquad (48)$$

где $\exp x = e^x$ — экспонента, значения которой берутся по таблице (прилож. 6).

Если расход жидкости в трубопроводе задан в *л/сек*, то весовой расход ее находим по формуле

$$G = 3600 q \gamma \ [кг/ч], \qquad (49)$$

где q — расход жидкости в *л/сек*;

γ — объемный вес жидкости в *кг/л* (для воды и сточной жидкости можно принимать $\gamma = 1$, а для нефтепродуктов $\gamma = 0{,}75 \div 1{,}0$ в зависимости от сорта).

Пример 10. Определить остывание воды в водопроводной трубе, уложенной в подземном канале совместно с сетями теплоснабжения и канализации (см. рис. 46). Условия те же, что и в примере 8 (см. § 22). Начальная температура воды $t_{нач} = 10°$ С, расход $q = 5$ *л/сек*, длина участка $l = 5$ *км*.

По формуле (49) весовой расход воды $G = 3600 \cdot 5 \cdot 1 = 18\,000$ *кг/ч*. Удельная теплоемкость воды $c = 1$ *ккал/кг·град*. Коэффициент теплопередачи трубы $k_т = 0{,}25$ *ккал/м·ч·град* (см. пример 8). По формуле (48), учитывая, что в данном случае $t_в = t_к = 9{,}6°$ С (см. пример 8), получаем

$$\frac{10 - 9{,}6}{t_{кон} - 9{,}6} = \exp \frac{0{,}25 \cdot 3{,}14 \cdot 5000}{1 \cdot 18\,000} = \exp 0{,}22.$$

По таблице значений экспонент (прилож. 6) находим $\exp 0{,}22 = 1{,}25$. Следовательно,

$$\frac{10 - 9{,}6}{t_{кон} - 9{,}6} = 1{,}25,$$

откуда $t_{кон} = 9{,}9°$ С.

Точно так же определяется остывание жидкости в трубопроводах, уложенных в надземных каналах или при надземной бесканальной прокладке. В последнем случае в формуле (48) $t_в$ будет не температура воздуха в канале, а температура наружного воздуха, омывающего трубу.

Расчет остывания газа производится также по формуле (48). Укладка газопроводов на участках, примыкающих к компрессорным станциям в грунтах III и IV категорий (см. табл. 1), требует серьезного технико-экономического анализа для решения вопроса, какой тип прокладки следует принять. Для такого анализа надо знать, насколько быстро будет происходить охлаждение газа в газопроводе, что можно рассчитать по формуле (48), приняв для газа $c = 0{,}5$ *ккал/кг·град*.

В табл. 6* приводится расход газа в зависимости от диаметра газопровода и рабочего давления в нем. Взяв q из данных этой таблицы и приняв объемный вес газа $\gamma = 0{,}6$ *кг/м*^{3}, находим весовой расход газа по формуле (49).

Пример 11. Определить охлаждение газа, выходящего из компрессорной станции при рабочем давлении 20 *ата* с температурой $t_{нач} = 40°$ С, в стальном газопроводе с наружным диаметром 529 *мм*. Среднемесячная температура воздуха самого теплого месяца в году $t_в = 12°$ С, расчетная скорость ветра $v = 5$ *м/сек*. Газопровод проложен надземно на отдельных опорах без теплоизоляции. Найти температуру газа на расстоянии 3 и 10 *км* от компрессорной станции.

---

* Таблица заимствована из статьи Л. Н. Мироненковой «Температурный режим газопроводов в районах вечной мерзлоты и влияние его на выбор системы прокладки». В сб. трудов АКХ, вып. XII, 1962.

Таблица 6

Пропускная способность газопроводов

Диаметр газопровода в *мм*	Расход газа в *м*^{3}/*сек* при рабочем давлении в газопроводе в *ата*												
	60	40	35	30	25	20	15	10	5	3			
51×4	0,3	0,193	0,168	0,142	0,116	0,092	0,067	0,042	0,021	0,012			
159×4,5	7,9	5,1	4,3	3,8	3,1	2,4	1,8	1,1	0,6	0,5			
219×6	18,1	11,8	10,2	8,7	7,1	5,6	4,1	2,8	1,3	0,7			
325×6	53,8	35,0	30,0	25,6	21,0	16,5	12,0	7,8	3,7	2,1			
426×6	111,0	72,5	62,5	53,0	43,4	35	25	16	7,6	4,4			
476×6	150,0	98,0	85,0	71,5	59	46	34	22	10,4	6,0			
529×7	200,0	129,0	110,0	94	77,5	61	45	29	13,7	7,9			
630×7	316,0	204,0	177,0	150	123	97	71	46	21,6	12,5			
720×8	440,0	287,0	246,0	212	170	136	100	64	31,6	17,5			
820×8	637,0	415,0	400,0	304	250	195	144	93	44,4	25,4			
920×8	860,0	560,0	485,0	410	338	278	194	125	59	34,3			

По формуле (18) коэффициент теплоотдачи на наружной поверхности трубы $\alpha_2 = \exp(1{,}08 + 0{,}6 \ln 5 - 0{,}4 \ln 0{,}529) = \exp[1{,}08 + 0{,}6 \cdot 1{,}609 - 0{,}4(-0{,}637)] = \exp 2{,}30 = 9{,}97$ *ккал/м²·ч·град*. Линейный коэффициент теплопередачи газопровода по формуле (16), если пренебречь термическим сопротивлением стенок трубы,

$$\kappa_т = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_2 d_2}} = 9{,}97 \cdot 0{,}529 = 5{,}27 \text{ ккал/м·ч·град.}$$

Для заданных диаметра трубы и рабочего давления по табл. 6 находим пропускную способность газопровода $q = 61$ *м³/сек*. По формуле (49) имеем: $G = 3600 \cdot 61 \cdot 0{,}6 = 132\,000$ *кг/ч*. Подставляя найденные значения в формулу (48), получаем:

при $l = 3000$ *м*

$$\frac{40 - 12}{t_{кон} - 12} = \exp \frac{5{,}27 \cdot 3{,}14 \cdot 3000}{0{,}5 \cdot 132\,000} = \exp 0{,}75 = 2{,}12,$$

$$t_{кон} = 25{,}2\ °C;$$

при $l = 10\,000$ *м*

$$\frac{40 - 12}{t_{кон} - 12} = \exp \frac{5{,}27 \cdot 3{,}14 \cdot 10\,000}{0{,}5 \cdot 132{,}000} = \exp 2{,}5 = 12{,}18,$$

$$t_{кон} = 14{,}3\ °C.$$

Задаваясь различными значениями l, можно построить график охлаждения газа по длине газопровода.

Для больших диаметров магистральных газопроводов пропускная способность определяется в зависимости от дальности транспорта газа и конечного давления (табл. 7) *. Для

Таблица 7

Пропускная способность газопроводов

Диаметр газопровода в *мм*	Конечное давление в *ата*	Расход газа в *м³/сек* при дальности транспорта газа в *км*							
		100	300	500	1000	1500	2000	2500	3000
1000	38	368	212	164	116	95	90	73	67
	20	—	274	212	151	124	107	95	88
1200	38	567	326	254	179	146	127	113	104
	20	—	422	326	232	190	163	146	134
1400	38	840	485	377	267	219	186	168	154
	20	—	630	485	344	285	243	218	200

составления этой таблицы было принято, что газопровод работает без компрессорных станций при начальном давлении 56 *ата*.

* Б. В. Барабаш. Рациональные этапы строительства магистральных газопроводов. — «Газовая промышленность», № 2, 1970.

§ 26. Падение температуры в подземных трубопроводах

Для расчета падения температуры жидкости (или газа) в трубе без теплоизоляции, уложенной в грунт, существует формула Грасгофа. Она выведена аналогично формуле (47) с использованием формулы Форхгеймера (22) и может быть приведена к виду

$$\ln \frac{t_{нач} - t_г}{t_{кон} - t_г} = \frac{\kappa_т \pi l}{cG}, \qquad (50)$$

где $t_г$ — температура грунта на глубине заложения оси трубы в предположении, что трубопровод отсутствует; остальные символы в формуле те же, что и в предыдущем параграфе.

Линейный коэффициент теплопередачи трубы $\kappa_т$ в формуле (50) следует рассчитывать из выражения

$$\kappa_т = \frac{1}{\frac{1}{2\lambda_г} \ln\left(\frac{2h}{d_2} + \sqrt{\frac{4h^2}{d_2^2} - 1}\right)}, \qquad (51)$$

где $\lambda_г$ — коэффициент теплопроводности грунта, выраженный в *ккал/м·ч·град*;

h — глубина заложения оси трубы от поверхности земли в *м*;

d_2 — внешний диаметр трубы в *м*.

Формула (51) так же, как формула Форхгеймера, не учитывает образования талика вокруг трубы, к тому же она пригодна только для труб, укладываемых в грунт без теплоизоляции. Чтобы учесть неоднородность грунта вокруг трубы (талый и мерзлый слои), формулу (50) надо представить в следующем виде:

$$\frac{t_{нач} - \frac{\lambda_м}{\lambda_т} t_г}{t_{кон} - \frac{\lambda_м}{\lambda_т} t_г} = \exp \frac{2\pi\lambda_т l}{cG \ln\left(\frac{2h}{d_2} + \sqrt{\frac{4h^2}{d_2^2} - 1}\right)}. \qquad (52)$$

Температуру грунта на глубине заложения оси трубы $t_г$ в предположении, что труба отсутствует, можно получить расчетом по формуле (11) на тот период года, для которого рассчитывается падение температуры в трубопроводе.

Формулу (52) можно применять не только для стальных труб, но и для труб из любого материала, а также для труб в тепловой изоляции. В ней следует заменить лишь h на $h_{пр}$, пользуясь формулой (24).

Пример 12. Рассчитать падение температуры воды в трубопроводе, уложенном в грунт на глубине 1,5 *м* от поверхности земли, при следующих исходных данных: труба стальная без теплоизоляции с наружным диаметром $d_2 = 108$ *мм*; расход воды $q = 3{,}5$ *л/сек*; начальная температура воды $t_{нач} = 8°$ С; температура грунта на глубине заложения трубы

на расчетный период $t_г = -6°$ С; коэффициенты теплопроводности грунта $\lambda_м = 1{,}76$ и $\lambda_т = 1{,}45$ *ккал/м·ч·град*; длина участка $l = 1$ *км*.

По формуле (49) определяем весовой расход воды:

$$G = 3600 \cdot 3{,}5 \cdot 1 = 12\,600 \text{ кг/ч}.$$

Делаем подстановку в формулу (52):

$$\frac{8 - \frac{1{,}76}{1{,}45}(-6)}{t_{кон} - \frac{1{,}76}{1{,}45}(-6)} = \exp \frac{2 \cdot 3{,}14 \cdot 1{,}45 \cdot 1000}{1 \cdot 12\,600 \ln\left(\frac{2 \cdot 1{,}5}{0{,}108} + \sqrt{\frac{4 \cdot 1{,}5^2}{0{,}108^2} - 1}\right)}.$$

Имеем

$$\frac{8 + 7{,}28}{t_{кон} + 7{,}28} = \exp 0{,}179 = 1{,}20; \quad t_{кон} = 5{,}5° \text{ С}.$$

§ 27. Падение температуры в трубопроводах, уложенных в насыпи

Расчет падения (или повышения) температуры жидкости или газа по длине трубопровода, уложенного в насыпи, можно вести приближенно по формуле, аналогичной формуле (48), а именно:

$$\frac{t_{нач} - t_{ср}}{t_{кон} - t_{ср}} = \exp \frac{\kappa_т \pi l}{cG}, \tag{53}$$

где $\kappa_т$ — линейный коэффициент теплопередачи трубы, определяемый различно для разных участков периметра трубы и в зависимости от периода (зимнего или летнего) года, в *ккал/м·ч·град*.

$t_{ср}$ — температура внешней среды, определяемая по особой методике, как будет указано ниже, в *град*.

Линейный коэффициент теплопередачи $\kappa'_т$ для верхней части трубы (см. рис. 47) определяется следующим образом: для летнего периода — по формулам (31) или (33), в зависимости от того, имеется или нет теплоизоляция вокруг трубы (т. е. рассчитывается совершенно так же, как и в § 23); для зимнего периода — соответственно по формулам (30) или (32).

Величина $d_т$ — диаметр талика вокруг трубы (см. рис. 48), входящая в формулы (30) и (32), в данном случае будет величиной переменной, так как зависит от постоянно меняющейся по длине трубопровода температуры жидкости или газа. Однако для инженерных расчетов нет необходимости идти на такие усложнения. Для участков, где температура транспортируемого продукта будет изменяться от начальной положительной до 0° С, можно принимать среднюю температуру жидкости или газа. Ошибка при этом не будет превосходить 5%. Сделав такое допущение, по аналогии с формулой (40) можем написать

$$d_т = \exp \frac{\ln d_с - 2{,}8 \frac{t_в}{t_{нач}} \ln d_2}{1 - 2{,}8 \frac{t_в}{t_{нач}}}. \tag{54}$$

Здесь $t_{нач}$ — начальная температура транспортируемого продукта на расчетном участке в *град*. Остальные обозначения те же, что и в формуле (40).

Для участков трубопровода с отрицательной температурой транспортируемого продукта (что может иметь место в газопроводах) линейный коэффициент передачи $\kappa'_т$ следует определять по формулам (41) или (42), в которые величина $d_т$ не входит.

Линейный коэффициент теплопередачи для нижней части трубы $\kappa''_т$ (см. рис. 47) определяется по формулам, аналогичным формуле (51), а именно:

для летнего периода

$$\kappa''_т = \frac{1}{\frac{1}{2\lambda_т} \ln\left(\frac{2h}{d_2} + \sqrt{\frac{4h^2}{d_2^2} - 1}\right)}, \tag{55}$$

где $\lambda_т$ — коэффициент теплопроводности талого грунта насыпи в *ккал/м·ч·град*;

h — определяется по формуле (43) при наличии теплоизоляции (торф или мох) вокруг трубы и по формуле (46), если теплоизоляции нет;

для зимнего периода

$$\kappa''_т = \frac{1}{\frac{1}{2\lambda_м} \ln\left(\frac{2h}{d_2} + \sqrt{\frac{4h^2}{d_2^2} - 1}\right)}, \tag{56}$$

где $\lambda_м$ — коэффициент теплопроводности мерзлого грунта насыпи в *ккал/м·ч·град*;

h — определяется по формуле (43) при наличии теплоизоляции вокруг трубы или по формуле (45), если теплоизоляции нет.

В обеих формулах d_2 — наружный диаметр трубы в *м*.

На участках с отрицательной температурой транспортируемого по трубопроводу продукта формулы (43) и (45) примут вид:

труба с теплоизоляцией:

$$h = \frac{1}{\cos\frac{\beta}{2}}\left[\lambda_м\left(\frac{\delta_с}{\lambda_с} + \frac{\delta_{из}}{\lambda_{из,\,м}}\right) + \delta_м + \frac{d_2}{2} - z\right]; \tag{57}$$

труба без теплоизоляции:

$$h = \frac{1}{\cos\frac{\beta}{2}}\left[\lambda_м \frac{\delta_с}{\lambda_с} + \delta_м + \frac{d_2}{2} - z\right]. \tag{58}$$

Угол β и величина z берутся по чертежу конструкции прокладки трубопровода (см. рис. 47).

Таким образом, для вычисления падения температуры в трубопроводе, уложенном в насыпи, в общем случае должен быть сделан ряд расчетов коэффициентов $\kappa_т$. Для удобства все возможные варианты определения $\kappa_т$ сведены в табл. 8.

Таблица 8

Способы расчета линейного коэффициента теплопередачи $\kappa_т$

Периоды года, условия прокладки и участки периметра трубы	№ формул, по которым производится расчет	
	основная формула	дополнительная формула
Верхний периметр трубы $\kappa'_т$		
Летний период		
Труба с теплоизоляцией	§ 23 (31)	—
То же, без теплоизоляции	§ 23 (33)	—
Зимний период		
Труба с теплоизоляцией на участке с положительной температурой жидкости (газа)	§ 23 (30)	§ 27 (54)
То же, без теплоизоляции	§ 23 (32)	§ 27 (54)
Труба с теплоизоляцией на участке с отрицательной температурой жидкости (газа)	§ 23 (41)	—
То же, без теплоизоляции	§ 23 (42)	—
Нижний периметр трубы $\kappa''_т$		
Летний период		
Труба с теплоизоляцией	§ 27 (55)	§ 23 (44)
То же, без теплоизоляции	§ 27 (55)	§ 23 (46)
Зимний период		
Труба с теплоизоляцией на участке с положительной температурой жидкости (газа)	§ 27 (56)	§ 23 (43)
То же, без теплоизоляции	§ 27 (56)	§ 23 (45)
Труба с теплоизоляцией на участке с отрицательной температурой жидкости (газа)	§ 27 (56)	§ 27 (57)
То же, без теплоизоляции	§ 27 (56)	§ 27 (58)

В окончательном для подстановки в формулу (53) виде (для соответствующего периода года и принятой конструкции прокладки) величину $\kappa_т$ следует определить по формуле:

$$\kappa_т = \frac{\beta}{360}\kappa'_т + \frac{360-\beta}{360}\kappa''_т. \qquad (59)$$

Температуру $t_{ср}$ в формуле (53) как температуру внешней среды вокруг трубопровода (рис. 50) можно приближенно определять по формуле

$$t_{ср} = \frac{\beta}{360}t_в + \frac{180}{360}t_п + \frac{180-\beta}{360}t_0. \qquad (60)$$

Для зимнего периода, когда температуру на поверхности насыпи можно принимать равной температуре воздуха, формула (60) запишется так:

$$t_{ср} = \frac{180+\beta}{360}t_в + \frac{180-\beta}{360}t_0, \qquad (61)$$

где $t_в$ — температура воздуха на расчетный период в *град*;
$t_п$ — температура поверхности насыпи в *град* (см. стр. 75);
t_0 — температура вечномерзлой толщи грунтов (см. стр. 67).

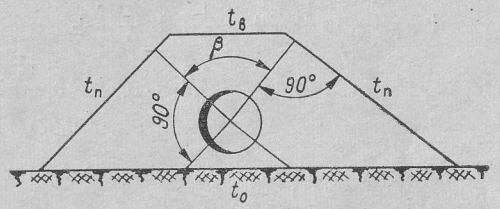


Рис. 50. Расчетная схема для определения температуры внешней среды вокруг трубы, уложенной в насыпи

Пример 13. Для условий примера 9 (см. § 23) определить падение температуры нефти в нефтепроводе в самый холодный и в самый теплый месяцы года.

Температура нефти при входе в нефтепровод $t_{нач} = 40°$ С. Расход $q = 30$ *л/сек*. Объемный вес нефти $\gamma = 0{,}85$ *кг/л*. Удельная теплоемкость ее $c = 0{,}425$ *ккал/кг·град*. Весовой расход нефти по формуле (49) $G = 3600 \cdot 30 \cdot 0{,}85 = 91\,800$ *кг/ч*.

В примере 9 (см. рис. 49) были определены коэффициенты теплопроводности грунта насыпи, теплоизоляции (торфа) и снега, а именно: $\lambda_м = 2{,}20$, $\lambda_т = 1{,}76$, $\lambda_{из,\,м} = 0{,}45$, $\lambda_{из,\,т} = 0{,}30$ и $\lambda_с = 0{,}50$ *ккал/м·ч·град*. Там же были вычислены диаметры колец теплоизоляции трубы:

для зимнего периода

$$d_с = 1{,}61, \quad d_м = 1{,}37 \quad \text{и} \quad d_{из} = 0{,}57 \text{ м};$$

для летнего периода

$$d_г = 1{,}37 \quad \text{и} \quad d_{из} = 0{,}57 \text{ м}.$$

Климатические данные берем из примера 9: температура воздуха в январе $t_в = -38{,}2°$ С, в июле $t_в = 18°$ С; температура на поверхности насыпи в летний период $t_п = 22{,}7°$ С. В примере 9 были вычислены и коэффициенты теплоотдачи на поверхности насыпи, а именно: в январе $\alpha_2 = 11.8$; в июле $\alpha_2 = 13{,}6$ *ккал/м²·ч·град*.

По формуле (54) определяем расчетный диаметр ореола талого грунта вокруг трубы в зимнее время:

$$d_т = \exp \frac{\ln 1{,}61 - 2{,}8 \dfrac{-38{,}2}{40} \ln 0{,}274}{1 - 2{,}8 \dfrac{-38{,}2}{40}} = \exp(-0{,}813) = 0{,}44 \text{ м}.$$

Линейные коэффициенты теплопередачи трубы для верха трубы определяем, пользуясь табл. 8.

Для летнего периода по формуле (31):

$$\kappa'_т = \frac{1}{\frac{1}{2 \cdot 1{,}76} \ln \frac{1{,}37}{0{,}57} + \frac{1}{2 \cdot 0{,}30} \ln \frac{0{,}57}{0{,}274} + \frac{1}{13{,}6 \cdot 1{,}37}} = 0{,}656 \text{ ккал/м} \cdot \text{ч} \cdot \text{град}.$$

Для зимнего периода на участке трубопровода с положительной температурой нефти по формуле (30)

$$\kappa'_т = \frac{1}{\frac{1}{2 \cdot 0{,}50} \ln \frac{1{,}61}{1{,}37} + \frac{1}{2 \cdot 2{,}20} \ln \frac{1{,}37}{0{,}57} + \frac{1}{2 \cdot 0{,}45} \ln \frac{0{,}57}{0{,}44} + \frac{1}{2 \cdot 0{,}30} \ln \frac{0{,}44}{0{,}274} + \frac{1}{11{,}8 \cdot 1{,}61}} = 0{,}671 \text{ ккал/м} \cdot \text{ч} \cdot \text{град}.$$

Для зимнего периода на участке трубопровода с отрицательной температурой нефти по формуле (41)

$$\kappa'_г = \frac{1}{\frac{1}{2 \cdot 0{,}50} \ln \frac{1{,}61}{1{,}37} + \frac{1}{2 \cdot 2{,}20} \ln \frac{1{,}37}{0{,}57} + \frac{1}{2 \cdot 0{,}45} \ln \frac{0{,}57}{0{,}274} + \frac{1}{11{,}8 \cdot 1{,}61}} = 0{,}815 \text{ ккал/м} \cdot \text{ч} \cdot \text{град}.$$

Линейные коэффициенты теплопередачи для низа трубы определяем также, пользуясь табл. 8.

Для летнего периода по формуле (55) и вспомогательной формуле (44) с учетом $\beta = 80°$ и $z = 0$, т. е. сохраняя условия примера 9 (см. рис. 49), получаем

$$h = \frac{1}{\cos 40°}\left(1{,}76 \frac{0{,}15}{0{,}30} + 0{,}40 + \frac{0{,}274}{2}\right) = 1{,}85 \text{ м};$$

$$\kappa''_т = \frac{1}{\frac{1}{2 \cdot 1{,}76} \ln\left(\frac{2 \cdot 1{,}85}{0{,}274} + \sqrt{\frac{4 \cdot 1{,}85^2}{0{,}274^2} - 1}\right)} = 1{,}068 \text{ ккал/м} \cdot \text{ч} \cdot \text{град}.$$

Для зимнего периода на участке трубопровода с положительной температурой нефти по формуле (56) и вспомогательной формуле (43) имеем:

$$\delta_{из.т} = \frac{d_т - d_2}{2} = \frac{0{,}44 - 0{,}274}{2} = 0{,}08 \text{ м};$$

$$\delta_{из.м} = \frac{d_{из} - d_т}{2} = \frac{0{,}57 - 0{,}44}{2} = 0{,}07 \text{ м};$$

$$h = \frac{1}{\cos 40°}\left[2{,}20\left(\frac{0{,}12}{0{,}50} + \frac{0{,}07}{0{,}45} + \frac{0{,}08}{0{,}30}\right) + 0{,}40 + \frac{0{,}274}{2}\right] = 2{,}61 \text{ м}.$$

Здесь, как в примере 9, толщина слоя снега $\delta_с = 0{,}12$ м, а высота грунтовой засыпки над торфяной теплоизоляцией $\delta_м = \delta_т = 0{,}40$ м;

$$k''_т = \frac{1}{\frac{1}{2 \cdot 2{,}20} \ln\left(\frac{2 \cdot 2{,}61}{0{,}274} + \sqrt{\frac{4 \cdot 2{,}61^2}{0{,}274^2} - 1}\right)} = 1{,}211 \text{ ккал/м} \cdot \text{ч} \cdot \text{град}.$$

Для зимнего периода на участке трубопровода с отрицательной температурой нефти по формуле (56) и вспомогательной формуле (57) получаем:

$$h = \frac{1}{\cos 40°}\left[2{,}20\left(\frac{0{,}12}{0{,}50} + \frac{0{,}15}{0{,}45}\right) + 0{,}40 + \frac{0{,}274}{2}\right] = 2{,}35 \text{ м};$$

$$\kappa''_т = \frac{1}{\frac{1}{2 \cdot 2{,}20} \ln\left(\frac{2 \cdot 2{,}35}{0{,}274} + \sqrt{\frac{4 \cdot 2{,}35^2}{0{,}274^2} - 1}\right)} = 1{,}247 \text{ ккал/м} \cdot \text{ч} \cdot \text{град}.$$

Итак, получены следующие значения для линейных коэффициентов теплопередачи трубы (*ккал/м·ч·град*):

		В январе	В июле
$\kappa'_т$	для участка с положительной температурой нефти	0,671	0,656
$\kappa'_т$	для участка с отрицательной температурой нефти	0,815	—
$\kappa''_т$	для участка с положительной температурой нефти	1,211	1,068
$\kappa''_т$	для участка с отрицательной температурой нефти	1,247	—

По этим данным с помощью формулы (59) находим три усредненных значения $\kappa_т$ для расчета падения температуры нефти. Так, для участка с положительными температурами нефти в январе имеем:

$$\kappa_т = \frac{80}{360} \cdot 0{,}671 + \frac{360 - 80}{360} \cdot 1{,}211 = 1{,}091 \text{ ккал/м} \cdot \text{ч} \cdot \text{град}.$$

Подобным же расчетом для участка с отрицательной температурой нефти получаем $\kappa_т = 1{,}150$ и для июля, когда на всей длине нефтепровода температура нефти положительная, $\kappa_т = 0{,}976$ *ккал/м·ч·град*.

Расчетную температуру окружающей среды определяем по формулам (60) и (61). Значения $t_в$ и $t_п$ нам известны. Температуру вечномерзлой толщи грунтов t_0 берем по карте (прилож. 1). Для Вилюйска $t_0 = -4°$ С. Тогда получаем:

для июля

$$t_{ср} = \frac{80}{360} \cdot 18 + \frac{180}{360} \cdot 22{,}7 + \frac{180 - 80}{360}(-4) = 14{,}2° \text{ С};$$

для января

$$t_{ср} = \frac{180 + 80}{360}(-38{,}2) + \frac{180 - 80}{360}(-4) = -28{,}7° \text{ С}.$$

Подставляя найденные значения $\kappa_т$ и $t_{ср}$ в формулу (53), находим:

в январе на участке трубопровода с положительной температурой нефти

$$\frac{40 - (-28{,}7)}{t_{кон} - (-28{,}7)} = \exp \frac{1{,}091 \cdot 3{,}14l}{0{,}425 \cdot 91\,800},$$

или

$$\frac{68{,}7}{t_{кон} + 28{,}7} = \exp(87{,}8 \cdot 10^{-6} l); \qquad (а)$$

в январе на участке трубопровода с отрицательной температурой нефти

$$\frac{40-(-28{,}7)}{t_{кон}-(-28{,}7)}=\exp\frac{1{,}150\cdot 3{,}14l}{0{,}425\cdot 91\,800},$$

или

$$\frac{68{,}7}{t_{кон}+28{,}7}=\exp\left(92{,}6\cdot 10^{-6}l\right); \qquad (б)$$

в июле

$$\frac{40-14{,}2}{t_{кон}-14{,}2}=\exp\frac{0{,}976\cdot 3{,}14l}{0{,}425\cdot 91\,800},$$

или

$$\frac{25{,}8}{t_{кон}-14{,}2}=\exp\left(78{,}6\cdot 10^{-6}l\right). \qquad (в)$$

Легко можно рассчитать температуру нефти $t_ж$ в любой точке нефтепровода, так как правые части уравнений (а), (б) и (в) представляют собой выражения $\exp al$, где a — известная постоянная величина, l — расстояние от начальной точки расчета в метрах.

Подставляя различные значения l, находим температуру нефти в различных точках трубопровода. Расчеты сведены в табл. 9.

Таблица 9

Расчет остывания нефти в нефтепроводе

Длина участка нефтепровода в *м*	Январь			Июль		
	$x=al$	$\exp x$	$t_ж$, °С	$x=al$	$\exp x$	$t_ж$, °С
0	0	1	40	0	1	40
500	0,044	1,045	37,0	0,039	1,040	39,0
1 000	0,088	1,091	34,3	0,079	1,082	38,0
3 000	0,263	1,301	24,1	0,234	1,264	34,6
5 000	0,439	1,551	15,6	0,393	1,482	31,9
10 000	0,878	2,406	—0,1 *	0,786	2,195	26,0
20 000	1,852	6,373	—17,9	1,572	4,816	19,6
30 000	2,778	16,09	—24,4	2,358	10,57	16,6
40 000	3,704	40,61	—27,0	3,144	23,20	15,3
50 000	4,630	102,64	—28,0	3,930	50,91	14,7
100 000	9,26	10 521	—28,7	7,86	2595	14,2

* С этой строки надо переходить к расчету по формуле (б), так как температура нефти становится отрицательной.

По данным этой таблицы построен график изменения температуры нефти по длине нефтепровода (рис. 51). Из графика видно, что в январе нефть остывает до 0° С через 10 *км*. Впрочем, для определения расстояния, на котором температура жидкости упадет до нуля (или до любой интересующей нас температуры), нет необходимости обязательно строить график. Так, определим для нашего примера расстояние, на котором температура нефти упадет в январе с 40 до 0° С. Для этого формулу (а) запишем в виде:

$$\frac{68{,}7}{0+28{,}7}=\exp\left(87{,}8\cdot 10^{-6}l\right).$$

Откуда

$$2{,}39=\exp\left(87{,}8\cdot 10^{-6}l\right), \quad \text{или} \quad \ln 2{,}39=87{,}8\cdot 10^{-6}l.$$

Так как $\ln 2{,}39=0{,}871$, то

$$l=\frac{0{,}871}{87{,}8\cdot 10^{-6}}=9920\ м=9{,}9\ км.$$

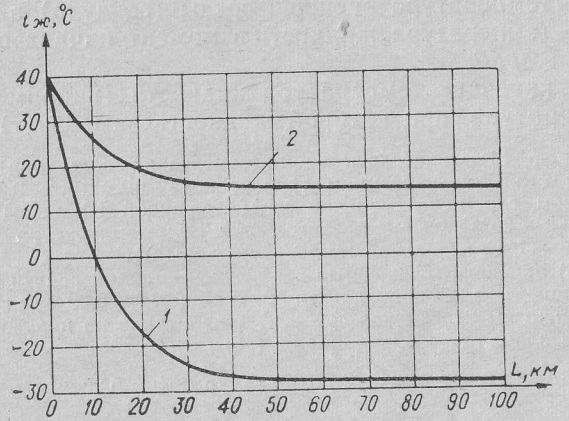


Рис. 51. График падения температуры нефти в нефтепроводе
1 — в январе; *2* — в июле

Расчет падения температуры воды, сточной жидкости канализации или газа производится аналогично расчету, приведенному в данном примере.

§ 28. Остывание жидкости в трубопроводе при отсутствии течения

Пренебрегая теплом трения, которое сказывается лишь при скоростях движения жидкости более 2 *м/сек*, можно считать, что теплопотери трубопровода не зависят от расхода. Тогда, полагая в формуле (47) для трубопроводов, работающих полным сечением,

$$G=\frac{\pi d_1^2}{4}\cdot\frac{l\gamma}{\tau_{ост}},$$

получаем

$$\ln\frac{t_{нач}-t_в}{t_{кон}-t_в}=\frac{\kappa_т}{\frac{cd_1^2}{4\tau_{ост}}},$$

откуда

$$\tau_{ост}=\frac{d_1^2\gamma c}{4\kappa_т}\ln\frac{t_{нач}-t_в}{t_{кон}-t_в}, \qquad (62)$$

где $\tau_{ост}$ — время остывания жидкости при надземной прокладке трубопровода в *ч*;

d_1 — внутренний диаметр трубопровода в *м*;

γ — объемный вес жидкости в *кг/м*³;

c — удельная теплоемкость жидкости в *ккал/кг·град*;

$\kappa_т$ — линейный коэффициент теплопередачи трубы, определяемый по формуле (16), в *ккал/м·ч·град*;

$t_в$ — температура внешней среды (воздуха) в *град*;

$t_{нач}$ — температура жидкости в момент начала остывания в *град*;

$t_{кон}$ — конечная температура жидкости (например, температура, при которой жидкость замерзает) в *град*.

Пример 14. Определить время замерзания воды при отсутствии движения в стальном надземном трубопроводе диаметром 0,2 *м*, теплоизолированном слоем минеральной ваты толщиной 60 *мм*. Температура воздуха $t_в = -30°$ С, скорость ветра 2 *м/сек*; температура замерзания воды $t_{кон} = -1°$ С, начальная температура воды 5° С.

По (16) определяем линейный коэффициент теплопередачи трубы, приняв коэффициент теплопроводности изоляции $\lambda = 0{,}09$ *ккал/м·ч·град* *. Предварительно вычисляем коэффициент теплоотдачи на наружной поверхности теплоизоляции трубы по формуле (18):

$$\alpha_2 = \exp(1{,}08 + 0{,}6 \ln 2 - 0{,}4 \ln 0{,}32) = \exp 1{,}64 = 5{,}2 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град}.$$

Тогда

$$\kappa_т = \frac{1}{\frac{1}{2 \cdot 0{,}09} \ln \frac{0{,}2 + 0{,}12}{0{,}2} + \frac{1}{5{,}2\,(0{,}2 + 0{,}12)}} = 0{,}31 \text{ ккал/м} \cdot \text{ч} \cdot \text{град}.$$

Для воды $c = 1$ *ккал/кг·град* и $\gamma = 1000$ *кг/м*³. По формуле (62) получаем

$$\tau_{ост} = \frac{0{,}2^2 \cdot 1000 \cdot 1}{4 \cdot 0{,}31} \ln \frac{5 - (-30)}{-1 - (-30)} = 32{,}3 \ln 1{,}21 = 6{,}1 \text{ ч}.$$

Аналогичным способом можно вывести формулу для расчета остывания жидкости при отсутствии течения в подземных трубопроводах.

Она будет иметь вид:

$$\tau_{ост} = \frac{d_1^2 \gamma c}{8\lambda_т} \ln\left(\frac{2h}{d_2} + \sqrt{\frac{4h^2}{d_2^2} - 1}\right) \ln \frac{\lambda_т t_{нач} - \lambda_м t_г}{\lambda_т t_{кон} - \lambda_м t_г}, \qquad (63)$$

где d_1 и d_2 — соответственно внутренний и внешний диаметры трубы в *м*;

$\lambda_т$ и $\lambda_м$ — соответственно коэффициенты теплопроводности талого и мерзлого грунтов в *ккал/м·ч·град*;

* Для изоляции трубопроводов при бесканальной прокладке коэффициент теплопроводности следует брать с несколько бо́льшим значением, чем дается в таблицах, для учета вероятного увлажнения и загрязнения теплоизоляции.

$t_г$ — температура грунта на глубине заложения оси трубы, если предположить, что труба отсутствует, в *град*; *

h — глубина заложения трубы от поверхности в *м*.

Остальные символы те же, что и в формуле (62).

Пример 15. Найти время остывания воды в трубе, уложенной без теплоизоляции под землей, при следующих исходных данных: $h = 2$ *м*; $d_1 = 0{,}15$ *м* и $d_2 = 0{,}159$ *м*; $t_г = -6°$ С; $\lambda_м = 2{,}5$ *ккал/м·ч·град* и $\lambda_т = 1{,}5$ *ккал/м·ч·град*; $c = 1$ *ккал/кг·град*; $\gamma = 1000$ *кг/м*³; $t_{нач} = 7°$ С и $t_{кон} = -1°$ С. По формуле (63) находим

$$\tau_{ост} = \frac{0{,}15^2 \cdot 1 \cdot 1000}{8 \cdot 1{,}5} \ln\left(\frac{2 \cdot 2}{0{,}159} + \sqrt{\frac{4 \cdot 2^2}{0{,}159^2} - 1}\right) \ln \frac{1{,}5 \cdot 7 - 2{,}5\,(-6)}{1{,}5\,(-1) - 2{,}5\,(-6)} =$$
$$= 1{,}88 \ln 50{,}3 \cdot \ln 1{,}89 = 4{,}7 \text{ ч}.$$

Формулу (63) можно применять и для случая трубы в теплоизоляции, заменяя в ней h на $h_{пр}$, определяемую по формуле (24), и беря температуру грунта $t_г$ на глубине $h_{пр}$.

Фактические замеры в Якутске показали, что для водопроводной сети с температурой воды от 10 до 15° С, уложенной на глубине 1,5 *м* от поверхности и засыпанной опилками, падение температуры воды за час при отсутствии водоразбора составляло:

для труб диаметром	150 *мм*	1,7—0,85 *град/ч*
» »	100 »	2,25—1,3 »

Исходя из данного примера дополнительный слив воды из тупиковых участков сети при отсутствии водоразбора определяется пятикратным обменом воды за сутки (24 : 4,7 = 5). Практика эксплуатации водопроводов на вечномерзлых грунтах показала, что разводящие сети работают обычно нормально при суточном обмене воды в трубах от 4 до 9 раз, в то время как присоединения к домам, устраиваемые без обогрева, требуют 16—20-кратного обмена воды за сутки.

Если трубопровод работал продолжительное время с постоянным расходом, то к моменту остановки движения жидкости вокруг трубы окажется талая зона, а окружающий ее мерзлый грунт будет значительно прогрет. Для такого случая время остывания жидкости можно рассчитать по времени промерзания талика вокруг трубы, для чего Г. В. Порхаевым была предложена следующая формула **

$$\tau_{ост} = -\frac{\rho G_в d_2^2}{8\lambda_м t_г} \left\{ \left[\frac{(d_2 + 2\xi)^2}{d_2^2} - 1 \right] \ln \frac{6{,}8h}{d_2} - \frac{(d_2 + 2\xi)^2}{d_2^2} \ln \frac{(d_2 + 2\xi)^2}{d_2^2} \right\}, \qquad (64)$$

* Способ определения этой температуры рассмотрен в § 19.

** Р. М. Каменский. Исследование теплового взаимодействия периодически работающих трубопроводов с мерзлыми грунтами. Материалы совещания-семинара по строительству в районах распространения вечномерзлых грунтов. Норильск, ноябрь 1962, том III. Красноярск, 1964.

где $\rho = 80$ *ккал/кг* — теплота плавления льда;

ξ — толщина слоя талого грунта вокруг трубы в *м*;

$G_в$ — вес воды и льда в единице объема грунта в *кг/м*^{3}, определяемый по формуле:

$$G_в = \frac{W}{1+W}\gamma_0, \qquad (65)$$

W — весовая влажность грунта в долях единицы;

γ_0 — объемный вес мерзлого грунта в *кг/м*^{3}.

Остальные символы в формуле (64) те же, что и в формуле (63).

Покажем на примере, какое значение может иметь талик при остывании жидкости в трубопроводе.

Пример 16. Определить время промерзания талика, после которого начнется промерзание воды в трубопроводе. Исходные данные берем те же, что и в примере 15. Пусть, кроме того, дано: $\gamma_0 = 1850$ *кг/м*^{3} и $W = 33\%$.

Методика расчета размеров талика вокруг трубы будет рассмотрена ниже (см. § 35). Если рассчитать талик для данного случая, то получим: размер талика под трубой $\xi_1 = 0{,}28$ *м* и над трубой $\xi_2 = 0{,}20$ *м*; в среднем толщина талого слоя вокруг трубы $\xi = 0{,}24$ *м*. Определяем вес воды и льда в грунте по формуле (65):

$$G_в = \frac{0{,}33}{1+0{,}33}\cdot 1850 = 452 \text{ кг/м}^3.$$

По формуле (64) получаем:

$$\tau_{ост} = \frac{80\cdot 452\cdot 0{,}159^2}{8\cdot 2{,}5\,(-6)}\left\{\left[\frac{(0{,}159+0{,}48)^2}{0{,}159^2}-1\right]\ln\frac{6{,}8\cdot 2}{0{,}159} - \frac{(0{,}159+0{,}48)^2}{0{,}159^2}\ln\frac{(0{,}159+0{,}48)^2}{0{,}159^2}\right\} =$$

$$= 7{,}53\,(15{,}32\ln 85{,}5 - 16{,}32\ln 16{,}32) = 170 \text{ ч}.$$

Ранее, в примере 15, мы получили время замерзания воды 4,7 *ч*, что близко совпадает с экспериментальными данными при прерывной работе сети. Поэтому к расчетам по времени промерзания талика следует подходить с осторожностью. Можно дать следующие рекомендации использования формул для расчета остывания жидкости:

для первых лет эксплуатации сети и для сетей, работающих с перерывами, следует пользоваться формулой (63);

для сети, эксплуатируемой более 5 лет и работающей в основном с постоянным расходом, при определении безопасного срока выключения ее для ремонтов можно использовать формулу (64).

§ 29. Расчет теплоизоляции водоводов

Водоводы в области вечномерзлых грунтов в отличие от разводящей сети водопровода сооружаются, как правило, в виде надземных бесканальных трубопроводов. В зимнее время на внутренних стенках таких водоводов может образоваться слой льда, что уменьшает сечение труб и нарушает нормальный режим работы трубопровода. Поэтому толщину изоляции водовода следует рассчитывать исходя из условий борьбы с оледенением.

Оледенения внутренних стенок трубопровода не происходит, если тепловой поток от воды к стенкам трубы больше и равен количеству тепла, уходящего через внешнюю поверхность трубы в атмосферу. Это условие может быть выражено неравенством

$$-\frac{t_в}{\frac{1}{\alpha_2}+\frac{\delta}{\lambda}} \leqslant \alpha_1 t_ж, \qquad (66)$$

откуда

$$\delta \geqslant -\lambda\left(\frac{t_в}{\alpha_1 t_ж}+\frac{1}{\alpha_2}\right), \qquad (67)$$

где δ — толщина теплоизоляции в *м*;

λ — коэффициент теплопроводности теплоизоляции в *ккал/м·ч·град*;

$t_в$ — температура наружного воздуха в *град*;

$t_ж$ — температура теплоносителя (воды) в конце расчетного участка в *град*;

α_1 — коэффициент теплоотдачи от воды к стенкам трубы в *ккал/м*^{2}*·ч·град*;

α_2 — коэффициент теплоотдачи от трубы к воздуху, определяемый по формуле (18), в *ккал/м*^{2}*·ч·град*.

Коэффициент теплоотдачи от воды к стенкам трубы при температуре воды, близкой к 0° С, по рекомендации б. Института мерзлотоведения АН СССР, можно определить по формуле

$$\alpha_1 = \exp(7{,}11 + 0{,}8\ln v_ж - 0{,}2\ln d_1), \qquad (68)$$

где $v_ж$ — скорость движения воды в *м/сек*;

d_1 — внутренний диаметр трубы в *м*.

При расчете по формуле (67) может возникнуть вопрос, какое значение брать для $t_в$. Температуру воздуха можно принимать как среднемесячную для самого холодного месяца в году или как среднюю за наиболее холодную пятидневку. И те и другие данные получают по климатическому справочнику.

В первом случае расчета, при понижении температуры воздуха против среднемесячной температуры самого холодного месяца, на внутренней стенке трубы будет намерзать корка льда, из-за чего скорость воды может значительно увеличиться. Во втором случае, когда $t_в$ взята как температура наиболее холодной пятидневки, можно не опасаться уменьшения сечения трубы. Исходя из этих соображений, следует дать рекомендации: при сравнительно небольших диаметрах

водовода (до 400 *мм*) надо вести расчет по температуре самой холодной пятидневки, а при больших диаметрах труб — по температуре (средней) самого холодного месяца.

Температуру воды можно определить расчетом лишь после того, как мы примем определенный тип теплоизоляции труб. Поэтому сначала задаемся температурой воды в конце расчетного участка, определяем по формуле (67) толщину изоляции трубы, а затем уже проверяем остывание воды по формуле (48). Учитывая, что зимние температуры воды не велики, лучше принимать температуру воды $t_ж$ в конце расчетного участка равной 0,2° С.

Скорость ветра для расчета коэффициента теплоотдачи с поверхности водовода по формуле (18) можно принимать как среднюю за три самых холодных месяца.

Пример 17. Определить толщину теплоизоляции наземного водовода при следующих исходных данных: труба стальная с внутренним диаметром 300 *мм*; скорость течения воды 0,85 *м/сек*; теплоизоляция — деревянная рейка с коэффициентом теплопроводности $\lambda = 0{,}14$ *ккал/м·ч·град*; средняя температура самой холодной пятидневки —52° С; температура воды в конце расчетного участка 0,2° С; скорость ветра средняя за три холодных месяца 3,6 *м/сек*. Пусть длина водовода $l = 3000$ *м* и температура воды в начале его 2° С.

Принимаем теплоизоляцию из деревянных реек толщиной 2,5 *см*.

Вычисляем коэффициенты теплоотдачи по формулам (68) и (18):

$$\alpha_1 = \exp(7{,}11 + 0{,}8 \ln 0{,}85 - 0{,}2 \ln 0{,}3) =$$

$$= \exp[7{,}11 + 0{,}8(-0{,}16) - 0{,}2(-1{,}2)] = \exp 7{,}22 =$$

$$= 1367 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град};$$

$$\alpha_2 = \exp(1{,}08 + 0{,}6 \ln 3{,}6 - 0{,}4 \ln 0{,}35) =$$

$$= \exp[1{,}08 + 0{,}6 \cdot 1{,}28 - 0{,}4(-1{,}05)] = \exp 2{,}27 = 9{,}68 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град}.$$

Определяем толщину теплоизоляции водовода по формуле (67):

$$\delta \geqslant -0{,}14\left(\frac{-52}{1367 \cdot 0{,}2} + \frac{1}{9{,}68}\right) = 0{,}013 \text{ м}.$$

Расход воды при данных диаметре и скорости течения

$$q = \frac{\pi d_1^2 v_ж}{4} = \frac{3{,}14 \cdot 0{,}3^2 \cdot 0{,}85}{4} = 0{,}06 \text{ м}^3/\text{сек} = 60 \text{ л/сек}.$$

По формуле (16) определяем линейный коэффициент теплопередачи трубы:

$$\kappa_т = \frac{1}{\frac{1}{2 \cdot 0{,}14} \ln \frac{0{,}35}{0{,}30} + \frac{1}{9{,}68 \cdot 0{,}35}} = 1{,}19 \text{ ккал/м} \cdot \text{ч} \cdot \text{град}.$$

Температуру воды в конце водовода находим по формуле (48), предварительно определив весовой расход воды по формуле (49):

$$G = 3600 \cdot 60 \cdot 1 = 216\,000 \text{ кг/ч};$$

$$\frac{2 - (-52)}{t_{кон} - (-52)} = \exp \frac{1{,}19 \cdot 3{,}14 \cdot 3000}{1 \cdot 216\,000} = \exp 0{,}052 = 1{,}053; \quad t_{кон} = -0{,}7° \text{ С}.$$

Итак, температура воды в конце водовода получена отрицательная. Следовательно, необходимо увеличить толщину теплоизоляции и повторить расчет или организовывать подогрев воды в начале водовода.

§ 30. Расчет теплоизоляции канализационных выпусков

Задачей теплового расчета канализационных выпусков является определение таких условий, при которых исключается возможность замерзания сточных вод на участке от здания до первого канализационного колодца на сети.

Толщина теплоизоляции канализационной трубы наземного канализационного выпуска определяется из условия, чтобы падение температуры сточной жидкости на участке от здания до приемного колодца канализационной сети не превосходило допустимой величины.

Выше (§ 24) указывалось, что начальная температура сточных вод для зданий без горячего водоснабжения колеблется от 10 до 15° С. В расчетах лучше принимать эту температуру несколько ниже, а именно: $t_{нач} = 8°$ С. Падение температуры на длине выпуска следует брать не более 1—2° С. Расчетную температуру сточной жидкости в трубе принимают как среднюю между начальным и конечным значениями, т. е.

$$t_ж = \frac{t_{нач} + t_{кон}}{2}. \tag{69}$$

Требуемую толщину слоя теплоизоляции можно найти с помощью вспомогательного квадратного уравнения

$$\frac{a}{2\lambda} x^2 + \left(\frac{a}{2\lambda} - 1\right) x + \left(\frac{a}{\alpha_2 d_1} - 1\right) = 0, \tag{70}$$

где λ — коэффициент теплопроводности теплоизоляции в *ккал/м·ч·град*;

α_2 — коэффициент теплоотдачи на поверхности теплоизоляции канализационного выпуска, определяемый по формуле (18);

d_1 — внутренний диаметр трубы канализационного выпуска в *м*.

Величина a, входящая в формулу (70), находится из выражения

$$a = \frac{cG(t_{нач} - t_{кон})}{\pi l (t_ж - t_в)}, \tag{71}$$

где $c = 1$ *ккал/кг·град* — удельная теплоемкость сточных вод;

G — весовой расход жидкости в *кг/ч*;

l — длина канализационного выпуска (от здания до приемного колодца) в *м*;

$t_в$ — расчетная температура наружного воздуха в *град*.

Определив из уравнения (70) значение x, легко получить и необходимую толщину теплоизоляции трубы, так как

$$\frac{d_2}{d_1} = \exp x; \quad d_2 = d_1 \exp x. \tag{72}$$

Толщина теплоизоляции

$$\delta = \frac{d_2 - d_1}{2}. \tag{73}$$

Пример 18. Найти толщину слоя теплоизоляции наружного канализационного выпуска при следующих условиях (рис. 52): $t_{нач} = 8°$ С; $t_{кон} = 6°$ С; расчетная температура наружного воздуха (средняя за самую

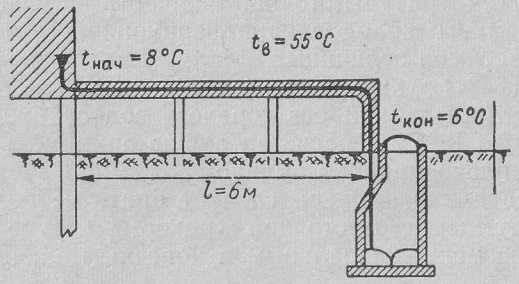


Рис. 52. Схема наземного канализационного выпуска

холодную пятидневку) $t_в = -55°$ С; длина выпуска $l = 6$ *м*; расход сточной жидкости $q = 150$ *л/ч*, т. е. $G = 150$ *кг/ч*; коэффициент теплопроводности теплоизоляции (минеральная вата) $\lambda = 0{,}065$ *ккал/м·ч·град*; внутренний диаметр трубопровода $d_1 = 0{,}1$ *м*; коэффициент теплоотдачи на поверхности теплоизоляции, определенный по формуле (18), $\alpha_2 = 11{,}3$ *ккал/м²·ч·град*.

Определяем величину a по формуле (71):

$$a = \frac{1 \cdot 150\,(8-6)}{3{,}14 \cdot 6\left[\frac{8+6}{2} - (-55)\right]} = 0{,}257.$$

Составляем вспомогательное уравнение (70) и решаем его:

$$\frac{0{,}257}{2 \cdot 0{,}065} x^2 + \left(\frac{0{,}257}{2 \cdot 0{,}065} - 1\right) x + \left(\frac{0{,}257}{11{,}3 \cdot 0{,}1} - 1\right) = 0,$$

или

$$x^2 + 0{,}5x - 0{,}39 = 0; \quad x_1 = 0{,}38 \quad \text{и} \quad x_2 = -0{,}88\ ^*.$$

По формуле (72) имеем: $d_2 = d_1 \exp 0{,}38 = 0{,}1 \cdot 1{,}46 = 0{,}146$ *м*, так что потребная толщина слоя теплоизоляции, согласно формуле (73), будет

$$\delta = \frac{0{,}146 - 0{,}100}{2} = 0{,}023\ м = 2{,}5\ см.$$

* Второй корень уравнения $x_2 = -0{,}88$ не будет удовлетворять нашим условиям, так как натуральный логарифм дроби, у которой числитель больше знаменателя (d_2 всегда больше d_1), не может быть отрицательным числом [см. формулу (72)].

§ 31. Сброс водопроводной воды в канализацию

С помощью теплоизоляции труб далеко не всегда можно обеспечить требуемый тепловой режим канализационного выпуска. При малых расходах сточных вод потребный слой теплоизоляции, определяемый по формуле (73), может оказаться равным метру и более, что, конечно, практически неприемлемо. В таких случаях прибегают к дополнительному сбросу воды из водопровода в канализацию (холостые сбросы).

Выше (стр. 16) указывалось, что обычно в канализацию сбрасывается примерно 0,05—0,08 *л/сек* воды. Эту потребность в сбросе можно определить расчетом с помощью следующего равенства:

$$\frac{cG\,(t_{нач} - t_{кон})}{l} = \kappa_т \pi\,(t_ж - t_в). \tag{74}$$

Условные обозначения здесь те же, что в формулах (69) и (71), а $\kappa_т$ — линейный коэффициент теплопередачи трубы, определяемый по формуле (16).

Как с помощью уравнения (74) определить потребный сброс водопроводной воды в канализацию, покажем на примере.

Пример 19. Сохраним все условия примера 18, но примем расход сточной жидкости в часы минимального водоразбора $q = 20$ *л/ч* ($G = 20$ *кг/ч*), а толщину теплоизоляции из минеральной ваты $\delta = 8$ *см*.

По формуле (16) находим линейный коэффициент теплопередачи трубы:

$$\kappa_т = \frac{1}{\frac{1}{2 \cdot 0{,}065} \ln \frac{0{,}26}{0{,}10} + \frac{1}{11{,}3 \cdot 0{,}26}} = 0{,}14\ ккал/м \cdot ч \cdot град.$$

Записываем равенство (74) в следующем виде:

$$\frac{1G\,(8-6)}{6} = 0{,}14 \cdot 3{,}14\left[\frac{8+6}{2} - (-55)\right]$$

и из него определяем весовой расход жидкости:

$$\frac{G}{3} = 25{,}3; \quad G = 76\ кг/ч.$$

Таким образом, расход, при котором будет обеспечено незамерзание канализационного выпуска, должен быть не менее 76 *л/ч*. Следовательно, необходимый сброс воды из водопровода в канализацию составляет $76 - 20 = 56$ *л/ч* $= 0{,}02$ *л/сек*.

§ 32. Расчет теплового сопровождения

Для предохранения сточной жидкости от замерзания при малом расходе сточных вод вместо принудительного сброса водопроводной воды в канализацию можно применить совмещенную прокладку канализационной трубы с трубопроводами,

подключенными к тепловой сети (см. рис. 35). В этом случае расчетом надлежит определить, какое количество тепла будет затрачиваться на обогрев канализационного трубопровода и какова будет температура среды, в которой уложен канализационный выпуск.

Рассмотрим следующий случай: канализационная труба проложена в общей теплоизоляции (в одном кожухе) с обогревающими трубопроводами-спутниками, по которым циркулирует горячая вода или пар, как это показано на рис. 53, *а*.

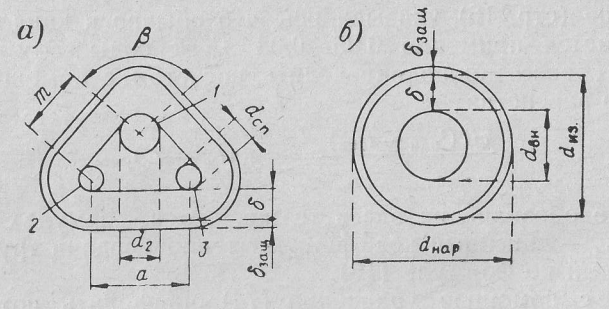


Рис. 53. Схема прокладки канализационного выпуска с тепловым сопровождением

а — поперечный разрез; *б* — расчетная схема; *1* — канализационная труба; *2* — подающая труба теплосети; *3* — обратная труба теплосети

Приводим нашу конструкцию к расчетной схеме — трубе, имеющей следующие диаметры (рис. 53, *б*): внутренний диаметр кожуха $d_{вн} = \frac{u_{вн}}{\pi}$; диаметр по наружной поверхности теплоизоляции $d_{из} = \frac{u_{из}}{\pi}$; наружный диаметр кожуха $d_{нар} = \frac{u_{нар}}{\pi}$.

Периметры соответствующих поверхностей, как видно из рис. 53, *а*, составляют:

$$u_{вн} = a + 2m + \frac{\pi d_2 \beta}{360} + \frac{\pi d_{сп}(360-\beta)}{360};$$

$$u_{из} = a + 2m + \frac{\pi (d_2 + 2\delta)\beta}{360} + \frac{\pi (d_{сп} + 2\delta)(360-\beta)}{360};$$

$$u_{нар} = a + 2m + \frac{\pi (d_2 + 2\delta + 2\delta_{защ})\beta}{360} + \frac{\pi (d_{сп} + 2\delta + 2\delta_{защ})(360-\beta)}{360},$$

где d_2 — наружный диаметр канализационной трубы в *м*;
$d_{сп}$ — наружный диаметр труб теплового сопровождения (теплосети) в *м*,
δ — толщина теплоизоляции в *м*;
$\delta_{защ}$ — толщина защитного слоя кожуха в *м*.

Линейные коэффициенты теплопередачи в *ккал/м·ч·град* согласно формуле (16) будут:

для канализационной трубы

$$\kappa_{кан} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_2' d_2}} = \alpha_2' d_2; \tag{75}$$

для труб теплового сопровождения

$$\kappa_{сп} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_2' d_{сп}}} = \alpha_2' d_{сп}; \tag{76}$$

для кожуха

$$\kappa_к = \frac{1}{\frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_{из}}{d_{вн}} + \frac{1}{2\lambda_{шт}} \ln \frac{d_{нар}}{d_{из}} + \frac{1}{\alpha_2 d_{нар}}}, \tag{77}$$

где α_2' — коэффициент теплоотдачи на наружной поверхности труб в *ккал/м²·ч·град*;
α_2 — коэффициент теплоотдачи на наружной поверхности кожуха в *ккал/м²·ч·град*;
λ — коэффициент теплопроводности теплоизоляции, принятой для данной конструкции, в *ккал/м·ч·град*;
$\lambda_{шт}$ — коэффициент теплопроводности защитного слоя кожуха (штукатурки) в *ккал/м·ч·град*.

Коэффициент α_2 рассчитывают по формуле (18), полагая в ней $d_2 = d_{нар}$. Для коэффициента α_2' формула (18) непригодна*, и его следует рассчитывать по эмпирической формуле Юргенса

$$\alpha_2' = 5{,}3 + 3{,}6v \ \textit{ккал/м}^2 \cdot \textit{ч} \cdot \textit{град}, \tag{78}$$

принимая в ней скорость движения воздуха внутри короба $v = 0$.

Температуру внутри короба определяем по формуле, аналогичной формуле (20):

$$t_к = \frac{\kappa_к t_в + \kappa_{кан} t_ж + \kappa_{сп} t_{под} + \kappa_{сп} t_{обр}}{\kappa_к + \kappa_{кан} + \kappa_{сп} + \kappa_{сп}}, \tag{79}$$

где $t_к$ — температура внутри кожуха в *град*;
$t_в$ — температура наружного воздуха в *град*;
$t_{под}$ — температура теплоносителя подающей трубы в *град*;
$t_{обр}$ — то же, обратной трубы в *град*;
$t_ж$ — температура сточной жидкости в *град*.

* При скорости $v = 0$ получим, что $d_2 = \exp(-\infty) = 0$, так как $\ln(0) = -\infty$.

Расход тепла на обогрев канализационной трубы, т. е. потери тепла трубопроводами-спутниками на длине 1 *м*, находим по формуле, аналогичной формуле (15):

$$Q = \kappa_{сп}\pi[(t_{под} - t_к) + (t_{обр} - t_к)]. \quad (80)$$

Тогда количество тепла, затрачиваемое на обогрев канализационного выпуска,

$$Q' = Ql \ ккал/ч, \quad (81)$$

где l — длина выпуска в *м*.

Аналогичным порядком рассчитывается тепловое сопровождение водопроводного ввода в здание, если водопроводная труба помещается в одной общей теплоизоляции с трубопроводами теплосети.

Пример 20. Определить затраты тепла на обогрев канализационного выпуска при следующих исходных данных: конструкция выпуска надземная, аналогичная конструкции, изображенной на рис. 52, но с поперечным сечением по схеме рис. 53, *а*; $a = 0{,}1$ *м*; $m = 0{,}075$ *м*; $\beta = 120°$; $d_2 = 0{,}108$ *м*, $d_{сп} = 0{,}038$ *м*; толщина теплоизоляции $\delta = 0{,}06$ *м*; штукатурка $\delta_{защ} = 0{,}02$ *м*; $\lambda = 0{,}065$ и $\lambda_{шт} = 0{,}8$ *ккал/м·ч·град*; температура теплоносителя $t_{под} = 95°$ С и $t_{обр} = 70°$ С; температура сточных вод $t_ж = 7°$ С; длина канализационного выпуска $l = 6$ *м*; место строительства — г. Якутск.

Из климатического справочника для Якутска берем расчетную температуру наружного воздуха как среднюю наиболее холодной пятидневки $t_в = -55°$ С и скорость ветра как среднюю за три холодных месяца $v = 1{,}6$ *м/сек*.

Вычисляем периметры конструкции:

$$u_{вн} = 0{,}1 + 2 \cdot 0{,}075 + \frac{3{,}14 \cdot 0{,}108 \cdot 120}{360} + \frac{3{,}14 \cdot 0{,}038\,(360 - 120)}{360} = 0{,}443 \ м.$$

Так же находим:

$$u_{из} = 0{,}820 \ м \quad и \quad u_{нар} = 0{,}883 \ м.$$

Расчетные диаметры конструкции:

$$d_{вн} = \frac{0{,}443}{3{,}14} = 0{,}141 \ м; \quad d_{из} = \frac{0{,}820}{3{,}14} = 0{,}261 \ м;$$

$$d_{нар} = \frac{0{,}883}{3{,}14} = 0{,}281 \ м.$$

Находим коэффициент теплоотдачи на наружной поверхности короба по формуле (18):

$$\alpha_2 = \exp(1{,}08 + 0{,}6 \ln 1{,}6 - 0{,}4 \ln 0{,}281) =$$

$$= \exp[(1{,}08 + 0{,}6 \cdot 0{,}47 - 0{,}4(-1{,}27)] = \exp 1{,}87 = 6{,}49 \ ккал/м^2 \cdot ч \cdot град.$$

Коэффициент теплоотдачи на поверхности труб по формуле (78)

$$\alpha_2' = 5{,}3 + 3{,}6 \cdot 0 = 5{,}3 \ ккал/м^2 \cdot ч \cdot град.$$

Вычисляем линейные коэффициенты теплопередачи труб и кожуха по формулам (75)—(77):

$$\kappa_{кан} = 5{,}3 \cdot 0{,}108 = 0{,}57 \ ккал/м \cdot ч \cdot град;$$

$$\kappa_{сп} = 5{,}3 \cdot 0{,}038 = 0{,}20 \ ккал/м \cdot ч \cdot град;$$

$$\kappa_к = \frac{1}{\frac{1}{2 \cdot 0{,}065} \ln \frac{0{,}261}{0{,}141} + \frac{1}{2 \cdot 0{,}8} \ln \frac{0{,}281}{0{,}261} + \frac{1}{6{,}49 \cdot 0{,}281}} =$$

$$= 0{,}19 \ ккал/м \cdot ч \cdot град$$

По формуле (79) находим температуру внутри кожуха:

$$t_к = \frac{0{,}19(-55) + 0{,}57 \cdot 7 + 0{,}20 \cdot 95 + 0{,}20 \cdot 70}{0{,}19 + 0{,}57 + 0{,}20 + 0{,}20} = 23° \text{ С}.$$

Количество тепла, расходуемого трубопроводами-спутниками, согласно формуле (80),

$$Q = 0{,}20 \cdot 3{,}14\,[(95 - 23) + (70 - 23)] = 75 \ ккал/м \cdot ч.$$

Расход тепла на обогрев канализационного выпуска по формуле (81) составит:

$$Q' = Ql = 75 \cdot 6 = 450 \ ккал/ч.$$

§ 33. Расчет электрического обогрева трубопроводов

Как указывалось выше (§ 15), электрический обогрев трубопроводов может осуществляться двумя способами:

а) путем преобразования по закону Джоуля — Ленца электрической энергии в тепловую в нагреваемом трубопроводе непосредственно включением его как сопротивления в электрическую цепь (см. рис. 40) — метод сопротивления;

б) путем прокладки по наружной поверхности трубопровода обогревающих проводов, включаемых в электрическую сеть (см. рис. 41), — метод электротепловой изоляции.

В обоих случаях для уменьшения затрат электроэнергии поверх трубы и обогревательных проводов наносится слой термоизоляции.

Потребная мощность установки с достаточной для целей практики точностью может быть определена по формуле

$$P = \frac{Q}{60 \cdot 60 \cdot 0{,}24}, \quad (82)$$

где P — потребная мощность установки в *квт*;

Q — потребное количество тепла на обогрев трубопровода в *ккал/ч* (может быть определено по формулам теплопотерь, приведенным в § 20 и 21);

0,24 — механический эквивалент тепла в *ккал/квт-сек*.

Расчет при использовании метода сопротивления. Расчетом надлежит определить потребную мощность установки, силу тока и напряжение на зажимах трубопровода.

Определение электрического сопротивления массивных прямолинейных проводников из ферромагнитного материала, к числу которых относятся и стальные трубы, можно произ-

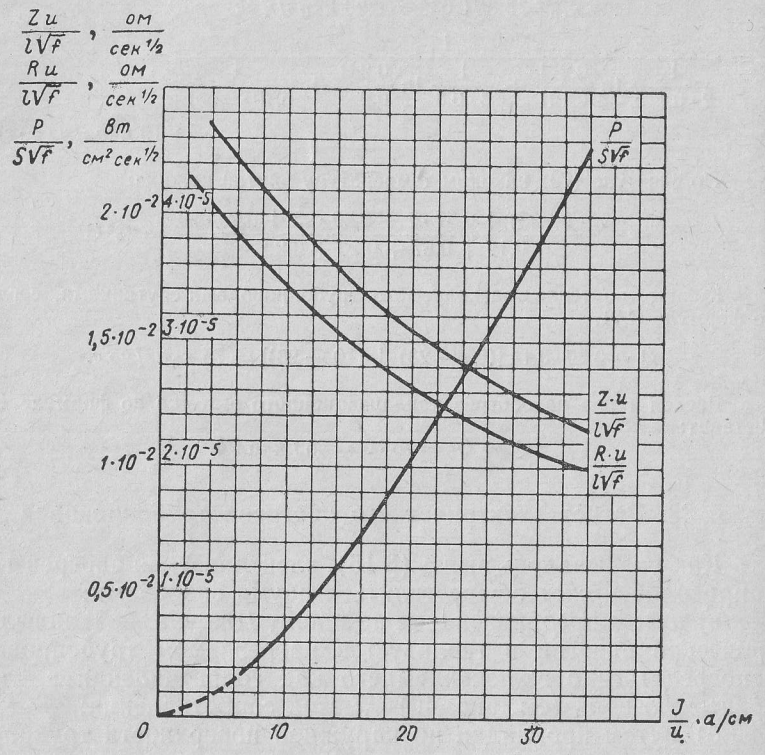


Рис. 54. Зависимость электрического сопротивления массивных проводников от плотности тока

водить по формулам и графику Л. Р. Неймана (рис. 54). Кривые на графике являются функциями плотности тока $\frac{I}{u}$:

$$\frac{P}{S\sqrt{f}} = F_1\left(\frac{I}{u}\right); \tag{83}$$

$$\frac{Ru}{l\sqrt{f}} = F_2\left(\frac{I}{u}\right); \tag{84}$$

$$\frac{Zu}{l\sqrt{f}} = F_3\left(\frac{I}{u}\right), \tag{85}$$

где I — действующее (эффективное) значение силы тока в *а*;
P — поглощаемая мощность в *вт*;
S — внешняя поверхность проводника в *см*^{2};
f — частота переменного тока, равная 50 *гц*;

l — длина проводника в *см*;
u — внешний периметр поперечного сечения проводника в *см*;
R — активное сопротивление в *ом*;
Z — полное сопротивление в *ом*.

Зная потребную мощность установки из формулы (82), частоту тока и площадь наружной поверхности трубопровода, вычисляем ординату $\frac{P}{S\sqrt{f}}$, затем по графику на рис. 54 находим соответствующую ей абсциссу $\frac{I}{u}$. Зная же периметр сечения трубопровода, определяем значение силы тока I.

Потребное напряжение определяется по основной формуле электротехники

$$U = IZ, \tag{86}$$

где U — напряжение в *в*.

Пример 21. Рассчитать установку для электрического обогрева методом сопротивления надземного канализационного выпуска длиной $l = 30$ *м*, в котором необходимо сохранять температуру сточных вод $t_ж = 7°$ С при температуре наружного воздуха $t_в = -55°$ С. Труба стальная, теплоизолированная минеральной ватой с $\lambda = 0{,}065$ *ккал/м·ч·град*. Толщина слоя теплоизоляции 5 *см*. Наружный диаметр трубы (без теплоизоляции) $d_2 = 0{,}109$ *м*. Коэффициент теплоотдачи на наружной поверхности трубы $\alpha_2 = 20{,}6$ *ккал/м*^{2}*·ч·град*.

Теплопотери по формуле (15)

$$Q = \kappa_т \pi (t_ж - t_в),$$

где $\kappa_т$ — линейный коэффициент теплопередачи трубы, определяемый по формуле (16):

$$\kappa_т = \frac{1}{\frac{1}{2 \cdot 0{,}065} \ln \frac{0{,}209}{0{,}109} + \frac{1}{20{,}6 \cdot 0{,}209}} = 0{,}19 \text{ ккал/м·ч·град};$$

$$Q = 0{,}19 \cdot 3{,}14\,[7 - (-55)] = 37 \text{ ккал/м·ч}.$$

Потребная мощность для обогрева 1 *пог. м* трубы по формуле (82)

$$P = \frac{37}{60 \cdot 60 \cdot 0{,}24} = 0{,}043 \text{ квт} = 43 \text{ вт}.$$

Поверхность 1 *пог. м* трубы

$$S = \pi d_2 = 3{,}14 \cdot 0{,}109 = 0{,}342 \text{ м}^2 = 3420 \text{ см}^2.$$

Для пользования графиком рис. 54 вычисляем

$$\frac{P}{S\sqrt{f}} = \frac{43}{3420\sqrt{50}} = 0{,}178 \cdot 10^{-2} \text{ вт/см}^2 \cdot \text{сек}^{\frac{1}{2}}.$$

Значение абсциссы, соответствующей этой ординате, по графику будет $\frac{I}{u} = 7$ *а/см*. Зная периметр поперечного сечения трубы $u = \pi d_2 = 3{,}14 \cdot 10{,}9 = 34{,}2$ *см*, определяем силу тока:

$$I = 7 \cdot 34{,}2 = 239 \text{ а}.$$

По кривой $\frac{Ru}{l\sqrt{f}}$ находим значение ординаты, соответствующей абсциссе $\frac{l}{u} = 7$ *а/см*:

$$\frac{Ru}{l\sqrt{f}} = 3{,}7 \cdot 10^{-5} \text{ ом/сек}^{\frac{1}{2}}$$

и аналогично

$$\frac{Zu}{l\sqrt{f}} = 4{,}36 \cdot 10^{-5} \text{ ом/сек}^{\frac{1}{2}}.$$

Активное сопротивление 1 *пог. м* трубопровода

$$R = 3{,}7 \cdot 10^{-5} \frac{l\sqrt{f}}{u} = 3{,}7 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{100\sqrt{50}}{34{,}2} = 7{,}7 \cdot 10^{-4} \text{ ом.}$$

Полное сопротивление Z 1 *пог. м* трубопровода

$$Z = 4{,}36 \cdot 10^{-5} \frac{l\sqrt{f}}{u} = 4{,}36 \cdot 10^{-5} \frac{100\sqrt{50}}{34{,}2} = 9{,}03 \cdot 10^{-4} \text{ ом.}$$

При потребной для целей обогрева силе тока $I = 239$ *а* к зажимам трубопровода требуется подвести напряжение

$$U = IZl = 239 \cdot 9{,}03 \cdot 10^{-4} \cdot 30 = 6{,}5 \text{ в.}$$

Мощность, потребная для обогрева всего трубопровода,

$$P' = Pl = 43 \cdot 30 = 1290 \text{ вт} = 1{,}3 \text{ квт.}$$

Расчет при использовании метода тепловой изоляции. Расчет сводится к подбору сечения и длины обогревательных проводов по потребной мощности для возмещения теплопотерь трубопровода. Последние определяются так же, как и в случае электрообогрева, по методу сопротивления.

Кажущаяся мощность установки

$$P_z = \frac{P}{\cos\varphi}, \qquad (87)$$

где P_z — кажущаяся мощность в *в-а*;

P — потребная мощность для обогрева трубопровода, определяемая по формуле (82), в *квт*;

$\cos\varphi = 0{,}95$ — коэффициент мощности.

Сила тока

$$I = \frac{P_z}{U}; \qquad (88)$$

здесь U — напряжение в сети в *в*.

Непосредственно в обогревательном проводе на выделение тепла затрачивается мощность

$$P_{об} = I^2R = \frac{P}{1{,}1}, \qquad (89)$$

где $P_{об}$ — доля электрической мощности, поглощаемой непосредственно обогревательным проводом, в *вт*;

R — активное сопротивление обогревательного провода в *ом*.

На основании этих формул, по правилам устройства электротехнических установок, определяется длина обогревательного провода (по допустимой нагрузке на 1 *м* провода в *вт*) и подбирается его сечение.

При проектировании электротепловой изоляции необходимо предусмотреть разделение обогревательного провода на две секции (см. рис. 41), с таким расчетом, чтобы путем включения одной секции, двух секций последовательно и двух секций параллельно в питающую электрическую сеть можно было приспособить систему обогрева к колебаниям температуры окружающей среды (воздуха или грунта).

Пример 22. Определить потребную мощность установки, силу тока и сопротивление обогревательного провода при электротепловой изоляции для исходных данных примера 21: потребная мощность на 1 *пог. м* трубопровода $P = 43$ *вт*; длина трубопровода 30 *м*.

Потребная мощность на всю длину трубопровода

$$P' = 43 \cdot 30 = 1290 \text{ вт.}$$

Кажущаяся мощность установки по формуле (87)

$$P_z = \frac{1290}{0{,}95} = 1358 \text{ в-а.}$$

При включении обогревательного провода в сеть с напряжением 220 *в* в нем установится ток (88)

$$I = \frac{1358}{220} = 6{,}2 \text{ а.}$$

Мощность, поглощаемая обогревательным проводом, по формуле (89) будет

$$P_{об} = \frac{1290}{1{,}1} = 1173 \text{ вт.}$$

Сопротивление обогревательного провода из формулы (89) будет:

$$R = \frac{P_{об}}{I^2} = \frac{1173}{6{,}2^2} = 31 \text{ ом.}$$

Глава пятая

РАСЧЕТ ОПОР И ОСНОВАНИЙ ИНЖЕНЕРНЫХ КОММУНИКАЦИЙ

§ 34. Температурное поле прогрева грунта вокруг трубы или канала

При подземной прокладке инженерных коммуникаций в мерзлых грунтах устойчивость сооружения (его осадки и просадки) тесно связана с характером температурного поля вокруг трубы или канала. Температурным полем, как известно, называется совокупность значений температуры во всех точках изучаемого пространства или плоскости. Температура является величиной скалярной, так как характеризуется одним числом (положительным или отрицательным), поэтому и температурное поле тоже скалярное.

Для трубы, заглубленной в грунт, можно считать, что температура по линиям, параллельным оси трубы, остается постоянной, т. е. не изменяется вдоль одной из координат поля. Поэтому температурное поле вокруг трубы можно рассматривать как плоское (двухмерная задача). Для подземных каналов температурное поле приближенно можно рассматривать таким же, как и для круглой трубы, принимая канал условной (расчетной) трубой с диаметром, определяемым по формуле (21).

Если температура будет меняться со временем, то мы имеем дело с нестационарным температурным полем. При установившемся режиме, когда температура в любой точке поля не зависит от времени, температурное поле рассматривается как стационарное.

При нахождении трубы в мерзлом грунте вокруг нее образуется талик, а следовательно, среда будет неоднородной. Для такой неоднородной мерзло-талой среды стационарное температурное поле приближенно описывается модифицированным уравнением Форхгеймера *

$$t_{x,\,y} = t_{\text{г}} + \frac{\left(\frac{\lambda_{\text{т}}}{\lambda_{\text{м}}} t_{\text{т}} - t_{\text{г}}\right) \ln \frac{x^2 + \left(y + \sqrt{h^2 - r^2}\right)^2}{x^2 + \left(y - \sqrt{h^2 - r^2}\right)^2}}{2 \ln \frac{2h}{r}}, \qquad (90)$$

где $t_{x,\,y}$ — температура грунта (в *град*) в точке с координатами x и y, измеряемыми в *м*;

$\lambda_{\text{т}}$ и $\lambda_{\text{м}}$ — коэффициенты теплопроводности соответственно талого и мерзлого грунтов в *ккал/м·ч·град*;

$t_{\text{т}}$ — температура на поверхности трубы (или на поверхности теплоизоляции трубы, если теплоизоляция имеется) в *град*;

$t_{\text{г}}$ — температура грунта на глубине заложения оси трубы в отсутствии трубопровода в *град*;

h — глубина заложения оси трубы, считая от поверхности грунта, в *м*;

r — наружный радиус трубы (считая с теплоизоляцией, если последняя имеется) в *м*.

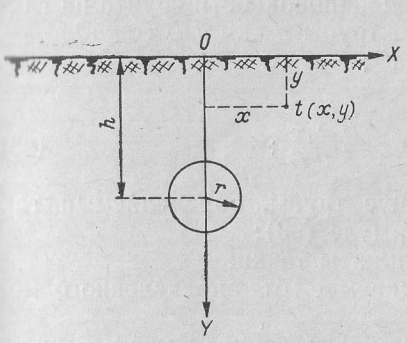


Рис. 55. Расчетная схема для стационарного температурного поля вокруг заглубленной в грунт трубы

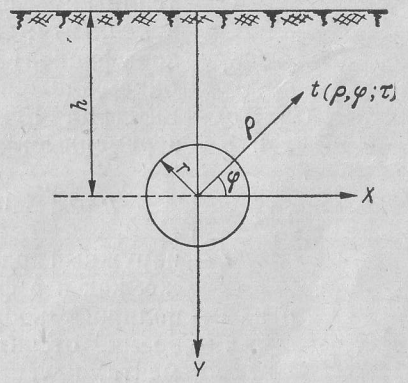


Рис. 56. Расчетная схема для нестационарного температурного поля вокруг заглубленной в грунт трубы

Начало координат для отсчета x и y расположено на вертикальной оси симметрии в месте пересечения ее с поверхностью грунта (рис. 55).

При нестационарном температурном поле температура в любой точке его будет изменяться во времени. Если мощность источника тепла (т. е. температура на поверхности трубы) будет оставаться постоянной, то температура в любой

* С. В. Тормидиаро. Тепловые расчеты оснований в районах вечной мерзлоты. Сиб. отделение АН СССР. Магадан, 1963.

точке грунтового массива в данный момент времени

$$t_\tau = t(x, y, \tau) + t_г, \qquad (91)$$

где $t(x, y, \tau)$ — температура в данной точке с координатами x и y в данный момент времени τ как результат теплового воздействия заглубленной в грунт трубы при нулевой температуре окружающего грунтового массива;

$t_г$ — температура грунта в данной точке, зависящая от сезонных колебаний температуры воздуха на поверхности.

Определение температуры грунта на любой глубине и для любого периода года рассматривалось выше (см. § 19), поэтому ограничимся рассмотрением температурного поля, возникающего в результате теплового воздействия самой трубы. Уравнение, которое описывает нестационарное поле вокруг трубы, удобнее представить в полярных координатах, а именно (рис. 56):

$$t(\rho, \varphi, \tau) = \frac{Q}{\lambda_г} G(z, p), \qquad (92)$$

где $t(\rho, \varphi, \tau)$ — то же, что и $t(x, y, \tau)$;

Q — тепловой поток с поверхности трубы в *ккал/м·ч*;

$\lambda_г$ — коэффициент теплопроводности грунта на глубине заложения трубы в *ккал/м·ч·град*;

$G(z, p)$ — интеграл Егера *;

z и p — переменные:

$$p = \frac{\rho}{r} \quad \text{и} \quad z = \frac{\lambda_г \tau}{C_г r^2}; \qquad (93)$$

r — наружный радиус трубы, определяемый так же, как и в формуле (90);

ρ и φ — полярные координаты точки;

τ — время, отсчитываемое от определенного момента, в *ч*;

$C_г$ — объемная теплоемкость грунта в *ккал/м³·град*.

Интеграл Егера табулирован и значения его приведены ниже (см. табл. 11 в § 40). Как пользоваться формулами для температурных полей, будет указано ниже для каждого конкретного случая.

§ 35. Глубина оттаивания мерзлого грунта под подземной трубой

Для решения вопроса устойчивости подземных инженерных коммуникаций необходимо знать, на какую глубину будет оттаивать грунт под сооружением, так как эта величина в основном определяет осадку трубы или подземного канала.

* L. R. Ingersoll и др. Theory of Eearth Heat Exchange for the Heat Pump. «Heating, Piping and Air Conditioning», vol. 22, № 5, May, 1950.

Если принять, что на границе талого и мерзлого грунтов температура грунта 0° С, то глубину оттаивания под трубой можно найти, определив, на какой глубине изотерма $t = 0°$ С пересекает вертикальную ось симметрии трубы. Для решения этой задачи в формуле (90) следует положить: $t(x, y) = 0°$ С и координата $x = 0$.

Тогда

$$\frac{y + \sqrt{h^2 - r^2}}{y - \sqrt{h^2 - r^2}} = \sqrt{\exp\left(-\frac{2t_г \ln \frac{2h}{r}}{\frac{\lambda_т}{\lambda_м} t_т - t_г}\right)}, \qquad (94)$$

где y — глубина залегания границы талого и мерзлого грунтов, считая от поверхности земли, в *м*. Остальные символы в формуле (94) те же, что и в формуле (90).

Решая уравнение (94), мы получим два значения для y: y_1 и y_2 (рис. 57), так как нулевая изотерма в температурном поле в общем случае пересекает ось ординат в двух точках. Толщина талого слоя под трубой ξ_1 и над трубой ξ_2 находится просто из следующих выражений:

$$\xi_1 = y_1 - h - r; \qquad (95)$$

$$\xi_2 = h - y_2 - r. \qquad (96)$$

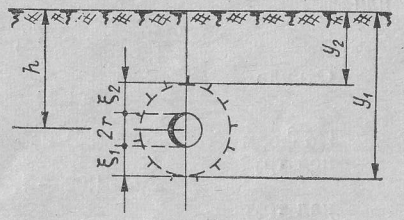


Рис. 57. Ореол протаивания у трубы, уложенной в мерзлом массиве грунта

Формула (94) выведена из условия установившегося теплового процесса, который сформируется после определенного, достаточно продолжительного срока. Практически же мы имеем дело с установившимся периодическим тепловым процессом, который характеризуется гармоническими колебаниями температуры грунта вокруг трубы. Поэтому температуру грунта в формуле (94) для целей инженерной практики следует принимать как среднюю годовую. Это будет (с известным допущением) температура вечномерзлой толщи t_0 (см. стр. 67), которую можно брать по карте (прилож. 1). Когда же мы хотим проверить, будет ли сохраняться вокруг трубы талик в зимнее время, в формулу (94) следует подставлять значение $t_г = t_{мин}$, определяемое по формуле (12).

Если труба стальная и уложена без теплоизоляции, то температуру на поверхности трубы в формуле (94) можно принимать равной температуре транспортируемой жидкости (или газа), т. е. $t_т = t_ж$. В противном случае температура на поверхности трубы или на поверхности теплоизоляции

определяется по формуле (25), как это было показано в примере 7 (см. § 21).

При трубопроводах значительной длины расчет глубины талого слоя под трубой по формуле (94) следует вести отдельными участками в зависимости от температуры жидкости в трубе на данном участке. Эту температуру можно определить по формуле (52), принимая в ней $t_г = t_0$.

Пример 23. Водопроводная труба диаметром 150 *мм* уложена в грунт на глубину 1,6 *м*. Пусть минимальная температура грунта, определенная для этой глубины, согласно методике, данной в § 19, получилась равной $t_{г,\,мин} = -7°$ С. Коэффициенты теплопроводности грунта $\lambda_м = 1{,}08$ и $\lambda_т = 0{,}85$ *ккал/м·ч·град*. Определить, какой образуется вокруг трубы талик на участке сети, где температура воды поддерживается на уровне $t_ж = 5°$ С. Температуру на поверхности трубы, так как она уложена без теплоизоляции, можно принять равной температуре воды, т. е. $t_т = t_ж = 5°$ С.

По формуле (94) получаем

$$\frac{y+\sqrt{1{,}6^2-0{,}075^2}}{y-\sqrt{1{,}6^2-0{,}075^2}} = \sqrt{\exp\left(-\frac{2\,(-7)\ln\frac{2\cdot 1{,}6}{0{,}075}}{\frac{0{,}85}{1{,}08}\cdot 5-(-7)}\right)},$$

или

$$\frac{y+1{,}6}{y-1{,}6} = \sqrt{\exp 4{,}806} = \sqrt{122} = \pm 11{,}05.$$

Откуда

$$y_1 = 1{,}92\ м \quad \text{и} \quad y_2 = 1{,}33\ м.$$

По формулам (95) и (96) находим толщину талика:

под трубой

$$\xi_1 = 1{,}92 - 1{,}60 - 0{,}075 = 0{,}26\ м;$$

над трубой

$$\xi_2 = 1{,}60 - 1{,}33 - 0{,}075 = 0{,}20\ м.$$

При укладке трубопровода в слое сезонного оттаивания глубину талого слоя под трубой можно определить исходя из

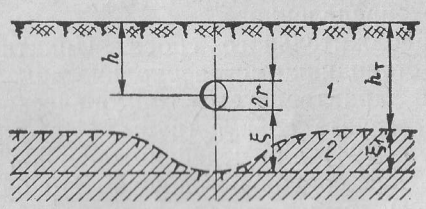


Рис. 58. Оттаивание грунта под трубой, уложенной в слое сезонного оттаивания

1 — талый грунт; *2* — мерзлый грунт

наличия двух температурных полей, образованных отдельными источниками тепла. В этом случае расчетный слой талого грунта под трубой определяется из формулы (рис. 58)

$$\xi = h_т - h - r + \xi_1, \qquad (97)$$

где ξ — глубина талого слоя под трубой в *м*;

$h_т$ — глубина сезонного оттаивания грунта, определяемая по правилам, указанным в § 18, в *м*;

r — радиус трубы в *м*;

ξ_1 — глубина оттаивания (толщина талика) под трубой, находящейся в мерзлом массиве, определяемая по формуле (95), в *м*.

Пример 24. Глубина сезонного протаивания в данном месте $h_т = 2{,}3$ *м*. Температура вечномерзлой толщи грунтов $t_0 = -3°$ С. Все остальные данные те же, что и в примере 23. Определить расчетную глубину протаивания грунта под трубопроводом.

По формуле (94), принимая $t_г = t_0$, находим

$$\frac{y+\sqrt{1{,}6^2-0{,}075^2}}{y-\sqrt{1{,}6^2-0{,}075^2}} = \sqrt{\exp\left(-\frac{2\,(-3)\ln\frac{2\cdot 1{,}6}{0{,}075}}{\frac{0{,}85}{1{,}08}\cdot 5-(-3)}\right)},$$

или

$$\frac{y+1{,}6}{y-1{,}6} = \sqrt{\exp 3{,}114} = \sqrt{22{,}51} = \pm 4{,}74,$$

откуда

$$y_1 = 2{,}48\ м \quad \text{и} \quad y_2 = 1{,}04\ м.$$

Толщина талика определяется по формулам (95) и (96):

под трубой

$$\xi_1 = 2{,}48 - 1{,}6 - 0{,}075 = 0{,}80\ м;$$

над трубой

$$\xi_2 = 1{,}6 - 1{,}04 - 0{,}075 = 0{,}48\ м.$$

Глубина слоя, оттаявшего под трубой за летнее время, по формуле (97) будет:

$$\xi = 2{,}3 - 1{,}6 - 0{,}075 + 0{,}80 = 1{,}42\ м.$$

§ 36. Глубина оттаивания грунтов под подземными каналами

Если подземный канал не вентилируется зимой для промораживания грунтового основания морозным воздухом, то талик под каналом определяется так же, как и для подземной трубы, т. е. по формуле (95) при положении оси канала ниже слоя сезонного протаивания и по формуле (97) при прокладке канала в деятельном слое. При этом канал приводится к расчетной трубе по формуле (21).

Вместо температуры жидкости в трубе в формуле (94) следует принимать температуру на поверхности канала, которую можно найти расчетом по формуле (25), положив в ней температуру грунта $t_г$, равную температуре вечномерзлой толщи грунтов t_0.

Тогда получаем

$$t_т = \frac{\frac{Q}{2\pi}\ln\left(\frac{2h}{d_2}+\sqrt{\frac{4h^2}{d_2^2}-1}\right)+\lambda_м t_0}{\lambda_т}, \qquad (98)$$

где $t_т$ — расчетная температура на поверхности канала в *град*;

Q — теплопотери канала в *ккал/м·ч*;

d_2 — внешний диаметр расчетной трубы, к которой приводится канал по формуле (21), в *м*;

h — глубина заложения оси канала от поверхности земли в *м*;

t_0 — температура вечномерзлой толщи грунта в *град*;

$\lambda_т$ и $\lambda_м$ — коэффициенты теплопроводности соответственно талого и мерзлого грунтов в *ккал/м·ч·град*.

Пример 25. Определить глубину оттаивания грунта под подземным железобетонным каналом теплосети (рис. 59), уложенным в районе, где температура грунта вечномерзлой толщи $t_0 = -2°$ С. Температура воды в подающем трубопроводе 120° С, в обратном 70° С. Трубы стальные с внешним диаметром 159 *мм*, изолированные минеральной ватой толщиной 80 *мм*. Коэффициенты теплопроводности изоляции труб $\lambda = 0{,}06$ и стенок канала $\lambda_{жб} = 1{,}33$ *ккал/м·ч·град*. Приняв скорость движения воздуха в канале около 1 *м/сек*, по формуле (18) получаем коэффициент теплоотдачи на поверхности труб $\alpha_2 = 4{,}7$ *ккал/м·ч·град*.

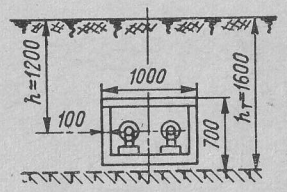


Рис. 59. Схема железобетонного канала теплосети

Пусть мы рассчитали глубину сезонного оттаивания грунта по известным правилам (см. § 18) и получим $h_т = 1{,}6$ *м*. Таким образом, ось канала расположена в слое сезонного оттаивания, поэтому расчет будем вести по формуле (97). Далее предположим, что нами были получены по табл. 4 следующие коэффициенты теплопроводности грунта: $\lambda_м = 1{,}45$ и $\lambda_т = 1{,}12$ *ккал/м·ч·град*.

По формуле (16)

$$\kappa_т = \frac{1}{\frac{1}{2\lambda}\ln\frac{d_{из}}{d_{тр}}+\frac{1}{\alpha_2 d_{из}}}$$

определяем линейные коэффициенты теплопередачи труб, уложенных в канале. В нашем случае, учитывая, что диаметр трубы вместе с теплоизоляцией равен $d_{из} = 0{,}319$ *м* и $d_{тр} = 0{,}159$ *м*, имеем $\kappa_т = 0{,}15$ *ккал/м·ч·град*. Он будет одинаков для обеих труб — подающей и обратной.

Далее надлежит определить температуру воздуха в канале, что можно сделать по формуле (27), предварительно определив коэффициент a по формуле (28). Для этого расчета необходимо получить значения d_2 — внешний диаметр расчетной трубы по формуле (21) и приведенную (по теплопроводности) глубину заложения оси канала $h_{пр}$, определяемую по формуле (24). Для данного примера получим:

$$d_2 = \frac{2(1+0{,}7)}{3{,}14} = 1{,}083\ м;$$

$$h_{пр} = 1{,}2 + 0{,}1\frac{1{,}45}{1{,}33} = 1{,}31\ м,$$

так как $\delta = 0{,}1$ *м* — толщина стенки канала (см. рис. 59). Далее рассчитываем величину a:

$$a = \frac{1}{2}\ln\left(\frac{2\cdot 1{,}31}{1{,}083}+\sqrt{\frac{4\cdot 1{,}31^2}{1{,}083^2}-1}\right) = 0{,}766.$$

По формуле (27), положив в ней $t_г = t_0$, определяем расчетную температуру воздуха в канале:

$$t_к = \frac{1{,}45(-2)+0{,}766(0{,}15\cdot 120+0{,}15\cdot 70)}{1{,}12+0{,}766(0{,}15+0{,}15)} = 14{,}0\ °C.$$

Далее необходимо найти теплопотери канала. Легко доказать [см. формулу (26)], что они могут быть вычислены по формуле

$$Q = \frac{2\pi(\lambda_т t_к - \lambda_м t_0)}{2a}, \qquad (99)$$

где a — та же величина, что и в формуле, по которой определилась температура воздуха в канале, т. е. $a = 0{,}766$.

Следовательно:

$$Q = \frac{2\cdot 3{,}14[1{,}12\cdot 14{,}0 - 1{,}45(-2)]}{2\cdot 0{,}766} = 76{,}2\ ккал/м\cdot ч.$$

Зная теплопотери, можно определить и температуру на внешней поверхности канала по формуле (98):

$$t_т = \frac{\frac{76{,}2}{2\cdot 3{,}14}\ln\left(\frac{2\cdot 1{,}2}{1{,}083}+\sqrt{\frac{4\cdot 1{,}2^2}{1{,}083^2}-1}\right)+1{,}45(-2)}{1{,}12} = 12{,}9\ °C.$$

Только теперь, рассчитав предварительно все необходимые исходные данные, можно перейти к основной формуле (94), положив в ней $r = \frac{d_2}{2} = 0{,}54$ *м* и $t_т = 12{,}9°$ С:

$$\frac{y+\sqrt{1{,}2^2-0{,}54^2}}{y-\sqrt{1{,}2^2-0{,}54^2}} = \sqrt{\exp\left(-\frac{2(-2)\ln\frac{2\cdot 1{,}2}{0{,}54}}{\frac{1{,}12}{1{,}45}\cdot 12{,}9-(-2)}\right)};$$

$$\frac{y+1{,}07}{y-1{,}07} = \sqrt{\exp 0{,}498} = \sqrt{1{,}646} = \pm 1{,}28;$$

$$y_1 = 8{,}71\ м \quad и \quad y_2 = 0{,}13\ м.$$

По формуле (95) $\xi_1 = 8{,}71 - 1{,}2 - 0{,}54 = 6{,}97$ *м*. Глубина оттаивания под каналом (максимальная расчетная после того, как теплообмен приобретает стационарный характер), согласно формуле (97), будет:

$$\xi = 1{,}6 - 1{,}2 - 0{,}54 + 6{,}97 = 6{,}83\ м.$$

§ 37. Глубина оттаивания грунта под насыпью, в которой уложен трубопровод

Глубина оттаивания в летнее время ξ_0 под насыпью с уложенной в ней трубой (рис. 60) складывается из двух величин: глубины оттаивания под насыпью S в предположении, что труба отсутствует, и глубины дополнительного

оттаивания от тепла, выделяемого самой трубой (глубина ξ_1 на рис. 60).

Величина ξ_1 определяется по формуле (95), в которой y_1 находится из уравнения (94), если положить в нем h равным длине перпендикуляра, опущенного из центра трубы на откос обсыпки (аналогично тому, как это указано на рис. 47).

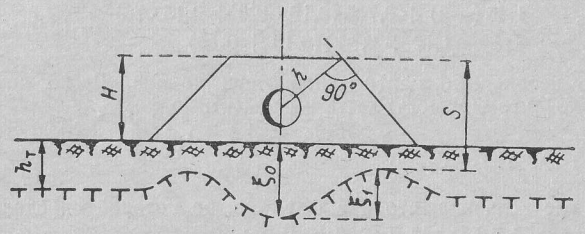


Рис. 60. Расчетная схема для определения глубины оттаивания грунта под насыпью с уложенной в ней трубой

Расчет оттаивания в летнее время насыпи и ее основания S рассмотрено выше (см. § 19). Общая глубина оттаивания грунта под насыпью согласно рис. 62 будет:

$$\xi_0 = S + \xi_1 - H. \qquad (100)$$

Пример 26. В районе Магадана уложен водовод из стальных труб диаметром 0,63 *м* в насыпи высотой $H = 1{,}57$ *м*. Длина перпендикуляра, опущенного из центра трубы на откос насыпи, взятая с чертежа конструкции, $h = 1{,}4$ *м*. Грунты основания — супеси с влажностью 25%. Засыпка трубы произведена пылеватым песком. Для расчетов влажность грунта засыпки возьмем нормативную (см. стр. 71) $W = 10\%$. По табл. 4, приняв объемный вес грунта засыпки равным 1,8 *т/м*^{3}, берем коэффициенты теплопроводности: $\lambda_т = 1{,}30$ и $\lambda_м = 1{,}60$ *ккал/м·ч·град*. На основе данных § 24 среднегодовую температуру воды в водоводе примем $t_ж = t_т = 8°$ С. Температура вечномерзлой толщи грунтов в Магадане по карте (прилож. 1) $t_0 = t_г = -1°$ С. Подставляем эти исходные данные в формулу (94):

$$\frac{y + \sqrt{1{,}4^2 - 0{,}315^2}}{y - \sqrt{1{,}4^2 - 0{,}315^2}} = \sqrt{\exp\left(-\frac{2(-1)\ln\frac{2\cdot 1{,}4}{0{,}315}}{\frac{1{,}30}{1{,}60}\cdot 8 - (-1)}\right)},$$

или

$$\frac{y + 1{,}39}{y - 1{,}39} = \sqrt{\exp 0{,}582} = \sqrt{1{,}79} = \pm 1{,}34.$$

Отсюда $y_1 = 9{,}56$ *м* и по формуле (95)

$$\xi_1 = 9{,}56 - 1{,}4 - 0{,}315 = 7{,}85 \text{ м}.$$

Далее определяем оттаивание насыпи и ее основания за летний период года. Глубина оттаивания грунта насыпи по карте прилож. 4 с коэффициентом поправки на влажность $W = 10\%$:

$$S' = 0{,}91 \cdot 2{,}7 = 2{,}46 \text{ м} \text{ [см. формулу (4)]}.$$

То же, для грунтов основания по карте прилож. 2 при влажности грунта 25%:

$$S'' = 0{,}92 \cdot 2{,}3 = 2{,}12 \text{ м}.$$

По формуле (5) получаем

$$S = 2{,}12 - \frac{2{,}12}{2{,}46} \cdot 1{,}57 + 1{,}57 = 2{,}34 \text{ м}.$$

Расчетная глубина оттаивания основания насыпи по формуле (100)

$$\xi_0 = 2{,}34 + 7{,}85 - 1{,}57 = 8{,}62 \text{ м}.$$

Как видно из примера 26, глубина оттаивания под насыпью в южной области вечномерзлых грунтов, где температура вечномерзлой толщи близка к 0° С, будет значительной. При этом осадки насыпи вместе с трубой в грунтах основания III и IV категорий (см. табл. 1) могут достигать 3 *м* и более, т. е. будут недопустимыми. Поэтому в таких случаях необходимо теплоизолировать трубы путем обкладки их торфом или мхом, как это показано на рис. 15, *б*.

Расчет протаивания под насыпью в случае применения теплоизоляции можно производить по тем же формулам, принимая во внимание следующее: в формуле (94) уже нельзя брать $t_т$ равной расчетной температуре жидкости в трубе. Ее следует принимать как температуру на поверхности слоя теплоизоляции (торфа или мха) и определять по формуле (25), как это показано в примере 7 § 21. Расчет величины глубины оттаивания насыпи и ее основания S в данном случае следует считать для трехслойной толщи грунтов: грунта засыпки, торфа или мха, грунта основания, применяя формулу (6).

§ 38. Оттаивание грунтов в основании газопроводов большого диаметра *

Под наземными газопроводами большого диаметра, укладываемыми в земляной обсыпке, глубина оттаивания основания рассчитывается по методике, отличной от приведенной в § 37. При больших диаметрах газопроводов насыпь обсыпки получается такой высоты, что оттаивания ее основания от тепла солнечной радиации не произойдет вовсе или оно будет пренебрежимо мало. Поэтому глубина оттаивания грунта под трубопроводом определяется только в зависимости от температурного режима самого трубопровода.

В расчетной схеме (рис. 61) труба рассматривается как тепловой штамп бесконечной длины с шириной, равной диаметру трубопровода d_2. Температура на поверхности теплового штампа принимается равной температуре газа в трубе $t_ж$. Для ее определения для каждого расчетного участка

* Этот параграф написан совместно с канд. техн. наук. В. П. Зыряновым.

строятся графики среднемесячных температур газа по трассе газопровода подобно тому, как это показано на рис. 51.

Для участков газопровода, имеющих постоянно положительную температуру («горячие» участки), в расчетах принимается среднегодовая температура $t_ж$. Глубина оттаивания ξ_0 определяется по формуле, подобной формуле В. П. Ушкало-

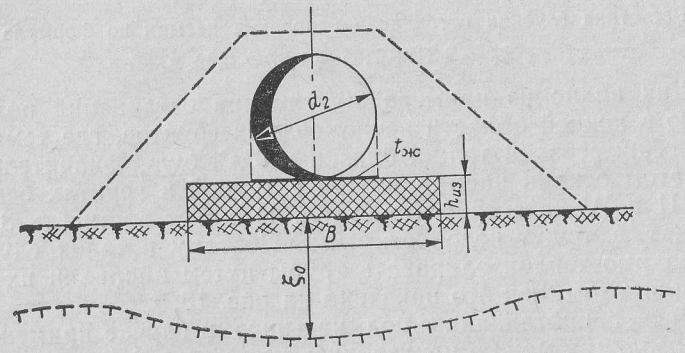


Рис. 61. Расчетная схема для определения глубины оттаивания грунтов основания под газопроводами большого диаметра

ва, выведенной им для определения чаши оттаивания в грунте под тепловыделяющими зданиями *:

$$\xi_0 = \alpha\beta\left[\sqrt{\frac{2\lambda_т t_ж \tau}{\rho\,(W - W_н)\,\gamma_м - 2{,}4C'_м t_0 + 0{,}5C_т t_ж} + \left(\frac{h_{из}\lambda_т}{\lambda_{из}}\right)^2} - \frac{h_{из}\lambda_т}{\lambda_{из}}\right], \quad (101)$$

где $\rho = 80$ *ккал/кг* — теплота плавления льда;

$\lambda_{из}$ — коэффициент теплопроводности слоя теплоизоляции под трубой (талого торфа или мха) или слоя грунтовой подсыпки в *ккал/м·ч·град*;

$h_{из}$ — толщина слоя теплоизоляции или грунтовой подсыпки под трубой в *м*;

τ — время оттаивания грунта основания, отсчитываемое с начала эксплуатации газопровода, в *ч*;

α и β — коэффициенты (см. ниже).

Остальные символы в формуле (101) подробно рассмотрены в § 17 и представляют собой обычные основные характеристики мерзлых грунтов. Влажность грунтов основания W берется осредненная по глубине, а объемный вес скелета грунта $\gamma_м$ (мерзлого) подставляется в формулу (101) в *кг/м*³.

* Указания по проектированию оснований и фундаментов для южной зоны распространения вечномерзлых грунтов. Госстройиздат, 1962.

Подставляя в формулу (101) различные значения τ, можно получить динамику оттаивания основания под газопроводом во времени.

Если под трубой уложен слой теплоизоляции из торфа или мха, то значение $\lambda_{из}$ можно принимать по § 18. Но может быть принята и такая конструкция, где под трубой устраивается просто подсыпка из грунта, идущего на обвалование газопровода. Тогда $\lambda_{из}$ берется по таблице теплофизических характеристик грунтов (табл. 4) при влажности, равной нормативной (см. стр. 71).

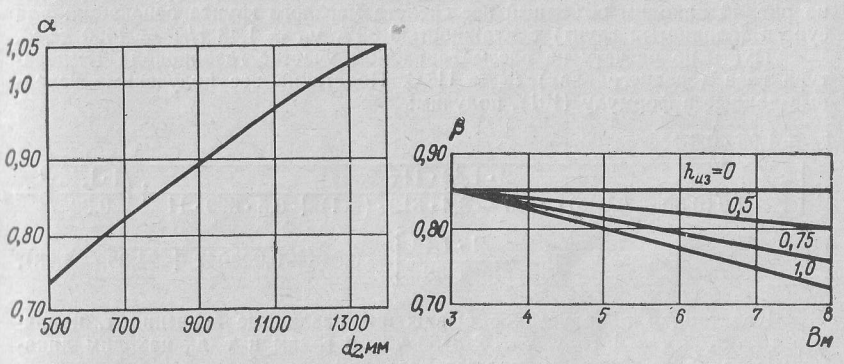


Рис. 62. График для определения коэффициентов α и β при расчете оттаивания грунтов под газопроводами большого диаметра

Когда газопровод укладывается просто на спланированную поверхность грунта, без слоя теплоизоляции или подсыпки, формула (101) упрощается:

$$\xi_0 = \alpha\beta\sqrt{\frac{2\lambda_т t_ж \tau}{\rho\,(W - W_н)\,\gamma_м - 2{,}4C'_м t_0 + 0{,}5C_т t_ж}}. \quad (102)$$

Коэффициент α, входящий в формулы (101) и (102), учитывает зависимость глубины оттаивания основания от диаметра газопровода. Коэффициент β зависит от толщины теплоизоляционного слоя (или слоя грунтовой подсыпки) $h_{из}$ и его ширины B. Он учитывает переход от одномерной задачи к двумерной. Значения коэффициентов α и β берутся по графикам на рис. 62.

Пример 27. Определить протаивание основания наземного газопровода диаметром 1400 *мм*, уложенного по схеме на рис. 61 при слое теплоизоляции из торфа высотой $h_{из} = 1$ *м* и шириной $B = 5$ *м*. Для такой конструкции коэффициенты поправок по рис. 62 будут: $\alpha = 1{,}05$ и $\beta = 0{,}8$. Район строительства — Надым (Таймырский п-ов), где температура вечномерзлой толщи грунтов $t_0 = -1°$ С (по карте прилож. 1). Грунты основания — супеси с влажностью 30% в мерзлом состоянии с объемным весом $\gamma_0 = 1{,}8$ *т/м*³, для которых теплофизические характеристики согласно табл. 4 следующие: $\lambda_т = 1{,}48$ *ккал/м·ч·град*, $C_т =$ *ккал/м*³*·град* и $C_м = 480$ *ккал/м*³*·град*.

По табл. 3 находим количество незамерзшей воды в грунте основания при температуре $t_0 = -1°$ С, а именно, $W_н = 0{,}045$. Затем по формуле (3) вычисляем объемную теплоемкость мерзлого грунта основания, приведенную к температуре $t_0 = -1°$ С,

$$C'_м = \frac{1}{W}[C_м(W - W_н) + C_т W_н] =$$

$$= \frac{1}{0{,}30}[480(0{,}30 - 0{,}045) + 690 \cdot 0{,}045] = 512 \ ккал/м^3 \cdot ч.$$

Далее, из § 18 берем коэффициент теплопроводности слоя теплоизоляции (торфа в талом состоянии $\lambda_{из} = 0{,}30$ *ккал/м·ч·град*), а из графика на рис. 44 находим объемный вес скелета мерзлого грунта основания: для супеси (глинистый грунт) с влажностью 30% $\gamma_м = 1{,}46$ *т/м*^{3} $= 1460$ *кг/м*^{3}.

Пусть по расчету на рассматриваемом участке газопровода температура газа (среднегодовая) $t_ж = 11°$ С. Подставив все полученные исходные данные в формулу (101), получим:

$$\xi_0 = 1{,}05 \cdot 0{,}8 \times$$

$$\times\left[\sqrt{\frac{2 \cdot 1{,}48 \cdot 11\tau}{80(0{,}30 - 0{,}045) \cdot 1460 - 2{,}4 \cdot 512 \cdot (-1) + 0{,}5 \cdot 690 \cdot 11} + \left(\frac{1 \cdot 1{,}48}{0{,}30}\right)^2} - \frac{1 \cdot 1{,}48}{0{,}30}\right] = 0{,}84\left(\sqrt{0{,}00094\tau + 24{,}33} - 4{,}93\right).$$

Подставляя в полученное выражение различные значения τ, например $\tau = 8760$ *ч* $= 1$ году, $\tau = 2 \cdot 8760$ *ч* $= 2$ годам и т д., находим динамику оттаивания основания под газопроводом.

Результаты таких расчетов сведены в следующую таблицу:

Время в годах	1	2	3	4	5	10	20	30
ξ_0, *м*	0,65	1,24	1,74	2,20	2,65	4,52	7,40	9,70

Для участков газопровода, где температура газа переменна в течение года (то отрицательная, то положительная), но среднегодовая температура отрицательна («холодные» участки), в формулах (101) и (102) расчетный срок протаивания основания τ определяется периодом положительных температур газа в течение года, а температура газа $t_ж$ — как средняя за этот период.

Для участков газопровода, где температура переменна, а среднегодовая положительна («теплые» участки), в формулы (101) и (102) в подкоренное выражение вместо $t_ж\tau$ следует ввести выражение

$$\left[nt_{(+)}\tau_{(+)} - (n-1)t_{(-)}\tau_{(-)} \cdot \frac{\lambda_м}{\lambda_т}\right], \qquad (103)$$

где n — расчетный срок службы сооружения в годах, принимаемый обычно в пределах от 10 до 20 лет;

$t_{(+)}$ и $\tau_{(+)}$ — соответственно температура и продолжительность (в *ч*) положительных температур в трубопроводе в течение года;

$t_{(-)}$ и $\tau_{(-)}$ — то же, отрицательных температур.

§ 39. Влияние подземных трубопроводов на устойчивость близрасположенных зданий

В практике проектирования пользуются определенными минимальными расстояниями инженерных коммуникаций от зданий. Нормы эти не являются строго регламентированными официальными документами. В проекте СНиП II-Б.6—66 «Основания и фундаменты зданий и сооружений на вечномерзлых грунтах» рекомендовались следующие расстояния от подземных трубопроводов до фундаментов зданий и сооружений (табл. 10)*.

Таблица 10

Минимальные расстояния от трубопроводов до фундаментов зданий

Температура теплоносителя	Расстояние от подземных трубопроводов до фундаментов зданий в *м* при температуре мерзлой толщи грунтов	
	выше $-4°$ С	$-4°$ С и ниже
20° С и ниже	10	6
Выше 20° С	15	10

В проекте «Правил и норм планировки и застройки населенных мест Крайнего Севера» (1960 г.) рекомендовались следующие расстояния: до сетей водопровода и канализации — 6 *м*, до теплопроводов — 8 *м*, до магистральных водоводов — 10 *м*.

Чтобы наглядно показать, насколько опасно влияние подземных инженерных коммуникаций на здания и насколько удовлетворительны приведенные выше рекомендации, рассмотрим пример расчета оттаивания основания с использованием приведенной выше теории оттаивания грунтов вокруг подземных сооружений.

Пример 28. В Воркуте вдоль здания, построенного по принципу сохранения грунтов основания в мерзлом состоянии, проложена на глубине 3 *м* от поверхности канализационная стальная труба диаметром 300 *мм* (рис. 63). Температура сточных вод $t_ж = 15°$ С. Расстояние от здания, согласно табл. 10, принято равным 10 *м*. Проверить, будет ли это расстояние достаточным для сохранения грунтов основания здания в мерзлом состоянии.

Грунты — пылевато-илистые суглинки с коэффициентом теплопроводности $\lambda_м = 2{,}44$ и $\lambda_т = 1{,}72$ *ккал/м·ч·град*. Температура мерзлой толщи грунтов в Воркуте, согласно натурным замерам, $t_0 = -0{,}6°$ С **.

---

* В окончательную редакцию этого раздела СНиПа таблица включена не была.

** Если брать температуру мерзлой толщи грунтов по карте прилож. 1, то получим для района Воркуты $t_0 = -2°$ С. Фактические измерения на местности непосредственно на городской территории показали, что температура грунта выше и колеблется от $-0{,}2$ до $-1°$ С. Это можно объяснить неустойчивостью температурного режима в южной зоне залегания вечномерзлых грунтов и влиянием на этот режим освоения местности и застройки.

По формуле (94) находим размеры талика вокруг трубы:

$$\frac{y+\sqrt{3^2-0{,}15^2}}{y-\sqrt{3^2-0{,}15^2}}=\sqrt{\exp\left(-\frac{2(-0{,}6)\ln\frac{2\cdot 3}{0{,}15}}{\frac{1{,}72}{2{,}44}\cdot 15-(-0{,}6)}\right)};$$

$$\frac{y+3}{y-3}=\sqrt{\exp 0{,}444}=\sqrt{1{,}56}=\pm 1{,}25;$$

$$y_1=27\ м \quad \text{и} \quad y_2=0{,}33\ м.$$

Центр ореола протаивания расположен от поверхности на расстоянии

$$\frac{y_1-y_2}{2}+y_2=13{,}66\ м,$$

а радиус талика составляет:

$$\frac{y_1-y_2}{2}=13{,}33\ м.$$

Как видно из рис. 63, талик подойдет вплотную к фундаменту здания, и последнее начнет претерпевать деформации,

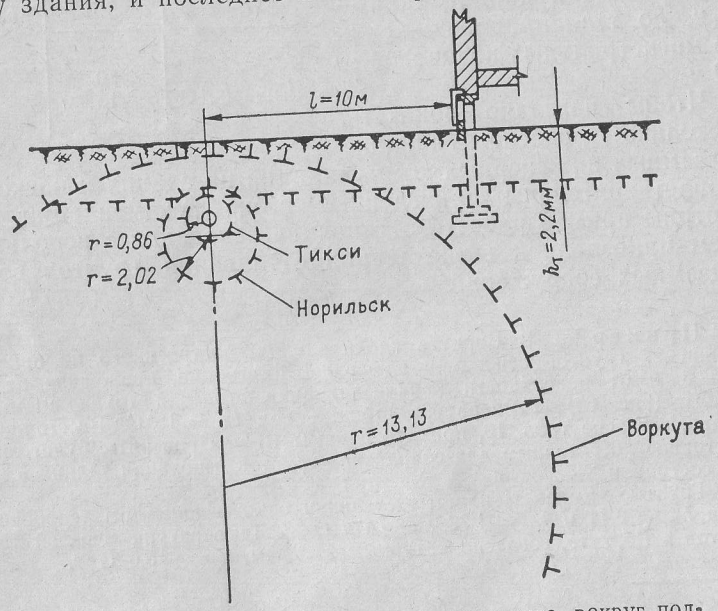


Рис. 63. Ореолы протаивания мерзлого грунта вокруг подземной трубы в различных районах Крайнего Севера

что и подтверждается на практике. Так, на шахте № 40 Воркутугля вдоль здания электрической подстанции была уложена канализационная труба на расстоянии 12 *м* от стены здания. Как показали наблюдения в процессе эксплуатации, мерзлое основание здания начало разрушаться, и само здание получило значительные осадки, сопровождавшиеся появлением опасных трещин в стенах. Канализационную трубу пришлось переложить, отнеся ее от здания на 30 *м*.

Если бы мы имели дело не с Воркутой, а, скажем, с Норильском, где температура вечномерзлой толщи грунтов $t_0=-5°$ С, или пос. Тикси, где $t_0=-12°$ С, то, произведя подобный же расчет, при прочих равных условиях получили бы следующие результаты:

	Норильск	Тикси
размеры талика вокруг трубы в *м*:		
y_1	5,64	3,99
y_2	1,59	2,26
расстояние центра талика:		
от поверхности в *м*	3,60	3,12
радиус талика в *м*	2,02	0,86

Нанеся эти данные на чертеж (рис. 63), можно наглядно убедиться, насколько, например, завышены данные табл. 10 для высокоширотных районов и насколько они недостаточны для южных районов области вечномерзлых грунтов. Поэтому лучше при проектировании не пользоваться нормами, а проделать несложные расчеты и простые графические построения.

§ 40. Глубина оттаивания грунта под подземными каналами при нестационарном температурном режиме

Под вентилируемыми подземными каналами (см. § 6) основание будет оттаивать в теплый период года и снова промораживаться зимой. Определить глубину оттаивания грунта под такими каналами можно исходя из рассмотрения нестационарного температурного поля.

На основании формул (91) и (92) можно написать:

$$t_{(\tau)}=t_г+\frac{Q}{\lambda_г}G(z,\ p).$$

Приравняв в этом выражении $t_{(\tau)}$ нулю, так как температура грунта на границе талой и мерзлой толщи под каналом равна 0° С, получаем

$$G(z,\ p)=-\frac{t_г\lambda_г}{Q}, \qquad (104)$$

где $G(z,\ p)$ — интеграл Егера (см. § 34),

$t_г$ — температура грунта на глубине заложения дна канала на данный момент времени в предположении, что канал отсутствует, в °С; ее можно рассчитать по формуле (11);

$\lambda_г$ — коэффициент теплопроводности грунта, который берется для мерзлого или талого грунта

в зависимости от того, будет ли температура грунта $t_г$ отрицательная или положительная, в *ккал/м·ч·град*;

Q — тепловой поток с поверхности трубы в *ккал/м·ч*.

Переменные z и p в интеграле Егера имеют значения согласно формуле (93). Численные значения интеграла даны в табл. 11.

Таблица 11

Значения интеграла Егера $G(z, p)$

z	$G(z, 1)$	$G(z, 2)$	$G(z, 5)$	$G(z, 10)$
0,10	0,049			
0,20	0,067			
0,30	0,080			
0,40	0,090			
0,50	0,099			
0,60	0,107			
0,70	0,113			
0,80	0,118			
1,00	0,128	0,035	0,001	0,000
1,20	0,137			
1,5	0,148			
2,0	0,163			
2,5	0,175			
3,0	0,186			
4,0	0,203			
5	0,217	0,112	0,0153	0,0001
6	0,228			
8	0,247			
10	0,263	0,155	0,0388	0,0024
12	0,275	0,167	0,0470	0,0042
15	0,291	0,182	0,0580	0,0072
20	0,312	0,203	0,0736	0,0129
25	0,328	0,219	0,0866	0,0188
30	0,342	0,232	0,0979	0,0246
50	0,380	0,271	0,132	0,0460
100	0,433	0,323	0,181	0,0842
500	0,560	0,449	0,304	0,197
1 000	0,614	0,504	0,359	0,250
5 000	0,742	0,632	0,486	0,376
10 000	0,797	0,687	0,541	0,431

Чтобы найти глубину оттаивания под каналом на данный момент времени τ, следует направить радиус-вектор ρ (рис. 56) вниз по вертикали и определить, при какой длине температура в точке, соответствующей концу радиуса-вектора, станет равной 0° С. Это будет тогда, когда соблюдается условие, выраженное уравнением (104).

Порядок расчета следующий. Сначала по формуле (104) находим интеграл $G(z, p)$, затем из формулы (93) определяем значение

$$z = \frac{\lambda_г \tau}{C_г r^2},$$

где $C_г$ — объемная теплоемкость грунта (талого или мерзлого в зависимости от того, какова будет температура $t_г$), в *ккал/м³·ч*;

r — наружный радиус расчетной трубы, к которой приводится канал, в *м*;

τ — время, отсчитываемое от начального момента оттаивания, в *ч*.

Далее по табл. 11 двойной интерполяцией находим значение p. Например, пусть мы получили $G(z, p) = 0{,}088$ и $z = 6{,}2$. С помощью интерполяции по вертикали табл. 11 находим значения $G(z, 2)$ и $G(z, 5)$ при нашем значении z:

z	$G(z, 2)$	$G(z, 5)$
5	0,112	0,0153
6,2	0,122	0,0209
10	0,155	0,0388

Далее интерполяцией по горизонтали находим значение p:

p	$G(z, p)$
2	0,122
x	0,088
5	0,0209

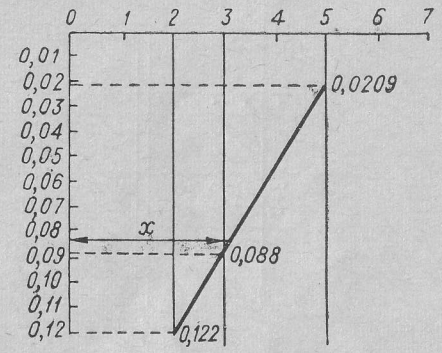


Рис. 64. Интерполяция для определения глубины оттаивания под трубой или каналом при нестационарном температурном поле

Как видно из рис. 64, искомое значение p составляет:

$$p = x = 2 + \frac{(5-2)(0{,}122 - 0{,}088)}{0{,}122 - 0{,}0209} = 3{,}01.$$

Найдя значение p, из формулы (93) получаем искомую длину радиуса-вектора $\rho = pr$, после чего находим и глубину оттаивания грунта под каналом в течение расчетного времени:

$$\xi = \rho - r. \qquad (105)$$

Пример 29. Определить глубину оттаивания грунта в основании подземного проходного канала, вентилируемого в зимнее время морозным воздухом. Конструкция канала показана на рис. 65. Тепловые сети — стальные трубы с наружным диаметром 219 *мм*; слой теплоизоляции толщиной 100 *мм*; температура теплоносителя $t_ж = 105°$ С в подающей трубе и $t_ж = 70°$ С в обратной трубе. Водопровод — стальная труба с наружным диаметром 159 *мм*; слой теплоизоляции толщиной 60 *мм*; температура

воды $t_ж = 10°$ С. Канализация — стальная труба с наружным диаметром 219 *мм* и слоем теплоизоляции толщиной 60 *мм*; температура сточной жидкости $t_ж = 14°$ С. Коэффициенты теплопроводности теплоизоляции: для труб $\lambda = 0{,}08$, для стенок канала (железобетон) — $\lambda_{жб} = 1{,}3$ *ккал/м·ч·град*.

Нас будет интересовать максимальное оттаивание основания канала за теплый период года (принимаем с 1 июня по 15 сентября). Таким образом, время оттаивания $\tau = 107$ дн. $= 2568$ *ч*.

Пусть глубина сезонного оттаивания (см. § 18) в данном пункте при данных грунтовых условиях $h_т = 1{,}6$ *м* и температура вечномерзлой толщи грунтов $t_0 = -4°$ С (берем условия, близкие к условиям Норильска). Теплофизические хаарктеристики грунта: $\lambda_т = 1{,}20$ и $\lambda_м = 1{,}68$ *ккал/м·ч·град* и $C'_м = 450$ *ккал/м³·град*. Глубина заложения дна канала, отсчитываемая от нижнего горизонта слоя сезонного оттаивания, $z = 2{,}13$ *м* (рис. 65).

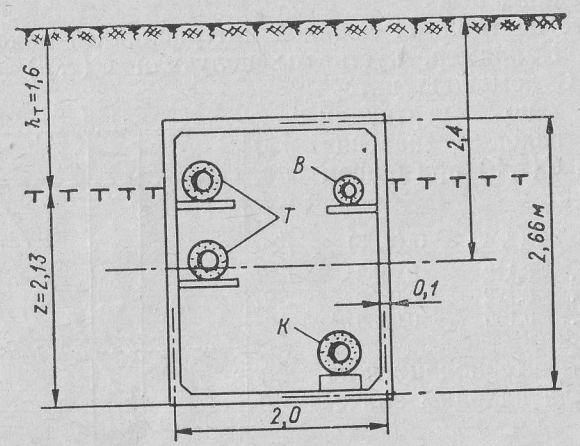


Рис. 65. Схема подземного проходного канала

Прежде всего следует определить температуру грунта $t_г$ в основании канала на момент максимального оттаивания, т. е. на 15 сентября. Это можно сделать по формуле (11). Так как надо определить $t_г$ как раз в момент перехода процесса оттаивания грунта в процесс его промерзания, то в формуле (11) можно принять $\tau = \tau_г = 8760$ *ч*. Тогда формула примет вид

$$t_г = t_0\left[1 - \exp\left(-z\sqrt{\frac{\pi C'_м}{\lambda_м \tau_г}}\right)\cos\left(2\pi - z\sqrt{\frac{\pi C'_м}{\lambda_м \tau_г}}\right)\right],$$

откуда после подстановки исходных данных получаем

$$t_г = -4\left[1 - \exp\left(-2{,}13\sqrt{\frac{3{,}14\cdot 450}{1{,}68\cdot 8760}}\right)\times\right.$$
$$\left.\times\cos\left(2\cdot 3{,}14 - 2{,}13\sqrt{\frac{3{,}14\cdot 450}{1{,}68\cdot 8760}}\right)\right] = -2{,}3°\text{ С}. \qquad (а)$$

Для подсчета теплопотерь необходимо также знать температуру грунта и на глубине заложения оси канала. Поэтому повторим предыдущий

расчет, принимая значение $z = 2{,}4 - 1{,}6 = 0{,}8$ (см. рис. 65). Произведя вычисления, получим:

$$t_г = -1{,}0°\text{ С}. \qquad (б)$$

Далее надлежит определить теплопотери канала. Для этого приведем канал к расчетной схеме — трубе. По формуле (21)

$$d_2 = \frac{2\,(2{,}1 + 2{,}76)}{3{,}14} = 3{,}10\ м.$$

Принимаем коэффициент теплоотдачи с поверхности труб в канале $\alpha_2 = 1{,}9$ *ккал/м²·ч·град*. Его можно получить расчетом по формуле (18), принимая скорость движения воздуха в канале $v = 1$ *м/сек*.

Из выражения (16) находим линейные коэффициенты теплопередачи труб, проложенных в канале:

для труб тепловой сети

$$\kappa_т = \frac{1}{\frac{1}{2\cdot 0{,}08}\ln\frac{0{,}419}{0{,}219} + \frac{1}{1{,}9\cdot 0{,}419}} = 0{,}14\ \textit{ккал/м·ч·град};$$

для водопровода

$$\kappa_т = \frac{1}{\frac{1}{2\cdot 0{,}08}\ln\frac{0{,}279}{0{,}159} + \frac{1}{1{,}9\cdot 0{,}279}} = 0{,}18\ \textit{ккал/м·ч·град};$$

для канализации

$$\kappa_т = \frac{1}{\frac{1}{2\cdot 0{,}08}\ln\frac{0{,}339}{0{,}219} + \frac{1}{1{,}9\cdot 0{,}339}} = 0{,}23\ \textit{ккал/м·ч·град}.$$

Затем рассчитываем температуру воздуха в канале, для чего следует предварительно определить ряд промежуточных величин, как было показано в примере 25 (см. § 36). Приведенная глубина заложения оси канала по формуле (24)

$$h_{пр} = 2{,}4 + 0{,}1\,\frac{1{,}68}{1{,}30} = 2{,}53\ м.$$

Из выражения (27) находим температуру воздуха в канале:

$$a = 0{,}5\ln\left(\frac{2\cdot 2{,}53}{3{,}10} + \sqrt{\frac{4\cdot 2{,}53^2}{3{,}10^2} - 1}\right) = 0{,}53;$$

$$t_к = \frac{1{,}68\,(-1) + 0{,}53\,(0{,}14\cdot 105 + 0{,}14\cdot 70 + 0{,}18\cdot 10 + 0{,}23\cdot 14)}{1{,}20 + 0{,}53\,(0{,}14 + 0{,}14 + 0{,}18 + 0{,}23)} = 8{,}9°\text{ С}.$$

Заметим, что температуру грунта здесь следует брать на уровне оси канала $t_г = -1°$ С, т. е. рассчитанную по формуле (б).

Полученный результат близко совпадает с фактическими замерами температуры в проходных каналах Норильска. Так, по данным б. Ленгипроарктики средняя температура за четыре летних месяца в этих каналах колебалась от 8 до 10° С.

Далее определяем теплопотери канала по формуле (99) из примера 25 (см. § 36), заменив в ней t_0 на $t_г = -1°$ С:

$$Q = \frac{2\cdot 3{,}14\,[1{,}20\cdot 8{,}9 - 1{,}68\,(-1)]}{2\cdot 0{,}53} = 78\ \textit{ккал/м·ч}.$$

Теперь известны все исходные данные для расчета глубины оттаивания под каналом.

Определяем интеграл Егера по формуле (104). Здесь уже следует брать температуру грунта на уровне заложения канала, т. е. $t_г = -2{,}3°$ С, определенную по формуле (а), при $\lambda_г = \lambda_м = 1{,}68$ *ккал/м·ч·град*:

$$G(z, p) = -\frac{-2{,}3 \cdot 1{,}68}{78} = 0{,}049.$$

По формуле (93) находим значение z:

$$z = \frac{1{,}68 \cdot 2568}{450\left(\frac{3{,}10}{2}\right)^2} = 3{,}99 \approx 4{,}0.$$

По табл. 11 интерполяцией находим:

	$G(z, 2)$	$G(z, 5)$
при $z = 4$	0,101	0,0124

Далее интерполируем по горизонтали:

	$G(z, p)$
при $p = 2$	0,101
» $p = ?$	0,0490
» $p = 5$	0,0124

Искомое значение переменной

$$p = 2 + \frac{(5-2)(0{,}101 - 0{,}049)}{0{,}101 - 0{,}0124} = 3{,}75.$$

Отсюда радиус-вектор

$$\rho = p\frac{d_2}{2} = 3{,}75 \cdot 1{,}55 = 5{,}81 \ м$$

и глубина протаивания грунта под каналом по формуле (105)

$$\xi = 5{,}81 - 1{,}55 = 4{,}26 \ м.$$

Если сравнивать этот результат с фактическими замерами, то, казалось бы, все обстоит благополучно — сходимость удовлетворительная. Действительно, по данным М. М. Лермана*, глубина оттаивания мерзлых грунтов под подземными вентилируемыми каналами достигала к концу лета 2—4,5 *м*, вместо ориентировочно применяемого при проектировании в Норильске значения 0,4—0,8 *м*. Однако, если внимательно проследить порядок расчета, то станет ясно, что допускалось неправильное положение, которое искажает конечный результат. Равенство (104) будет справедливо тогда, когда температура $t_г$ в нем отвечает значению на глубине оттаивания. Глубина же эта в процессе расчета была нам неизвестна, а потому температура грунта принималась на уровне дна канала. Теперь есть возможность подправить расчет. Следует повторить определение значения интеграла Егера. Для этого находим температуру грунта на глубине, примерно равной половине высоты полученного талого слоя под

* М. М. Лерман. Опыт эксплуатации совмещенной прокладки инженерных коммуникаций в подземных каналах. Материалы совещания-семинара по обмену опытом проектирования, строительства и эксплуатации зданий и сооружений в районах распространения вечномерзлых грунтов. Норильск, 1962.

каналом, т. е. в нашем случае $z = 2{,}13 + \frac{4{,}26}{2} = 4{,}26 \approx 4{,}5$ *м*. Расчет выполним так же, как это сделано выше, т. е. по формуле (а):

$$t_г = -4\left[1 - \exp\left(-4{,}5\sqrt{\frac{3{,}14 \cdot 450}{1{,}68 \cdot 8760}}\right) \times \right.$$

$$\left. \times \cos\left(2 \cdot 3{,}14 - 4{,}5\sqrt{\frac{3{,}14 \cdot 450}{1{,}68 \cdot 8760}}\right)\right] = -3{,}8° \text{ С}.$$

Величина z, определенная по формуле (93), остается в новом расчете без изменения. Не следует путать две величины, для которых принят один и тот же символ z. В интеграле Егера это одна из переменных [формула (104)], а при расчете температуры грунта это глубина, отсчитываемая от подошвы слоя сезонного оттаивания [формула (11) и рис. 43, *а*].

Находим новое значение интеграла Егера по формуле (104)

$$G(z, p) = -\frac{-3{,}8 \cdot 1{,}68}{78} = 0{,}082.$$

Можно воспользоваться результатами интерполирования, уже полученными выше, и сразу записать

$$p = 2 + \frac{(5-2)(0{,}101 - 0{,}082)}{0{,}101 - 0{,}0124} = 2{,}64.$$

Следовательно, $\rho = 2{,}64 \cdot 1{,}55 = 4{,}09$ *м* и глубина оттаивания грунта в основании канала за теплый период года

$$\xi = 4{,}09 - 1{,}55 = 2{,}54 \ м.$$

Итак, мы брали температуру грунта на глубине 2,5 *м* под каналом, что близко сходится с полученным результатом 2,54 *м*, поэтому дальнейшего уточнения расчета не требуется.

§ 41. Замена грунта в основании трубопроводов и каналов

При прокладке в вечномерзлых грунтах подземных трубопроводов и каналов под ними заменяют просадочные при оттаивании грунты на непросадочные. Чтобы знать, на какую глубину следует заменять грунт, надо предварительно определить глубину оттаивания мерзлой толщи грунтов под трубой или каналом (см. § 35—38 и 40).

Обычно замена грунта производится не на всю глубину оттаивания (см. рис. 8 и 10). За счет уменьшения объема земляных работ достигается значительная экономия. При этом заведомо идут на то, что трубопроводы или каналы будут оседать с подстилающим их грунтом на какую-то допустимую величину.

Глубина замены грунта в основании труб определяется по формуле

$$h_з = \xi - \frac{\Delta}{\delta}, \qquad (106)$$

где $h_з$ — глубина замены грунта под трубой в *м*;
ξ — глубина оттаивания грунта под трубой, определяемая по формуле (95) или (97), в *м*;
Δ — допустимая осадка трубопровода в *м*;
δ — относительная осадка (сжатие) оттаявшего под нагрузкой грунта, залегающего под трубой (величина безразмерная).

Сжатие грунтов при оттаивании δ для глинистых грунтов (супеси, суглинки, глины) можно рассчитать по формуле М. Ф. Киселева

$$\delta = 1 - \gamma_м \left[\frac{1}{\gamma_ч} + \frac{1}{\gamma_в}\left(W_р + \frac{\kappa W_п}{100}\right)\right], \qquad (107)$$

где $\gamma_м$ — объемный вес скелета мерзлого грунта в *г/см*^{3};
$\gamma_ч$ — удельный вес материала частиц грунта, равный для супеси 2,7, для суглинка 2,71 и для глины 2,74 *г/см*^{3};
$\gamma_в$ — удельный вес воды, равный 1 *г/см*^{3};
$W_р$ — влажность грунта на границе раскатывания в долях единицы;
$W_п$ — число пластичности;
κ — коэффициент уплотняемости, принимаемый по табл. 12 в зависимости от уплотняющего давления p.

Таблица 12

Значения коэффициента κ в формуле для расчета относительного сжатия глинистых грунтов

Наименование грунтов	Значения κ при уплотняющем давлении p в *кГ/см*^{2}			
	0,25	0.50	0,75	1
Супесь с числом пластичности:				
$W_п \leqslant 3$	2,8	2,5	2,0	1,60
$3 < W_п \leqslant 5$	2,4	2,0	1,6	1,30
$5 < W_п \leqslant 7$	1,9	1,7	1,4	1,20
Суглинок с числом пластичности				
$7 < W_п \leqslant 9$	1,6	1,5	1,3	1,10
$9 < W_п \leqslant 13$	1,4	1,3	1,2	1,00
$13 < W_п \leqslant 17$	1,3	1,2	1,1	0,90
Глина с числом пластичности				
$17 < W_п \leqslant 21$	1,2	1,1	1,0	0,80
$21 < W_п \leqslant 26$	1,1	1,0	0,9	0,75
$26 < W_п \leqslant 32$	1,0	0,9	0,8	0,65

Уплотняющее давление можно брать как давление вышележащих слоев грунта, т. е. $p = \gamma_0 h$, где γ_0 — объемный вес вышележащего слоя грунта в *кг/см*^{3}, h — глубина заложения трубы от поверхности в *см*.

Для песчаных грунтов значения δ можно брать прямо по графику на рис. 66.

Для грунтов сильно льдонасыщенных, содержащих крупные прослойки и линзы льда (грунты IV категории по табл. 1), относительное сжатие глинистых грунтов следует рассчитывать по формуле *

$$\delta = \frac{\gamma_ч (W - W_р)}{\gamma_в + \gamma_ч W} + 0{,}09\,\frac{\gamma_ч W}{\gamma_в + \gamma_ч W}. \qquad (108)$$

В формуле (108) W — влажность грунта до оттаивания, в долях единицы, а остальные обозначения те же, что и в формуле (107).

При самотечных стальных трубопроводах следует производить замену грунта в основании по всей длине прокладки. Допустимая осадка Δ при этом назначается исходя из продольного уклона сети. В обычных условиях можно принимать $\Delta = 5$ *см*.

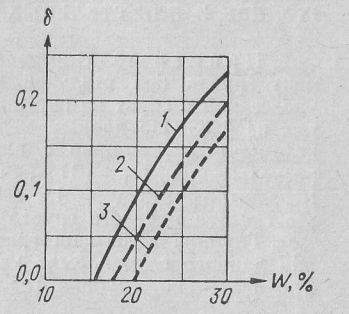


Рис. 66. График для определения относительного сжатия мерзлых песчаных грунтов при оттаивании
1 — песчаные крупные; *2* — то же, средней крупности; *3* — то же, мелкие и пылеватые

Под трубопроводами, укладываемыми из чугунных или железобетонных труб, допустимую осадку для напорных сетей можно определять исходя из длины труб и допустимого поворота в стыках, а именно:

$$\Delta = l\,\frac{\sin\alpha}{2}, \qquad (109)$$

где l — длина отрезков трубы в *м*;
α — допустимый угол поворота в стыках.
Значения α можно принимать следующие:

	α
для чугунных труб с раструбами:	
при диаметре до 500 *мм*	2°
при диаметре свыше 500 *мм* . .	1°
для железобетонных труб:	
с гибкими стыками	1,5°
с жесткими стыками	0°

Таким образом, для чугунных труб диаметром 480 *мм* и длиной 4 *м* допустимая осадка $\Delta = 400 \cdot 0{,}0175 = 7$ *см*. Чугунные и железобетонные трубы по экономическим соображениям (да и практически) можно использовать лишь в грунтах I и II категорий, а в грунтах III и IV категорий — только в районах, где температура вечномерзлой толщи t_0 не превы-

* Теория и практика мерзлотоведения в строительстве. Изд-во «Наука», 1965.

шает —4° С. В противном случае возникает необходимость производить очень большие объемы земляных работ в мерзлых грунтах для замены грунта в основании трубопровода.

Для самотечных трубопроводов из чугунных и железобетонных труб допустимую осадку можно принимать такую же, как и для стальных трубопроводов, т. е. $\Delta = 5$ *см*.

Пример 30. Определить, на какую глубину следует произвести замену грунта под стальной канализационной трубой диаметром 300 *мм*, уложенной в грунт на глубине 3 *м* в Норильске при исходных данных, взятых из § 39. По данным мерзлотно-грунтовых изысканий, грунты — пылевато-илистые суглинки с влажностью $W = 26\%$; влажность на границе раскатывания $W_р = 17\%$, число пластичности $W_п = 11$; объемный вес мерзлого грунта $\gamma_0 = 1{,}8$ *т/м*^{3}, следовательно, по формуле (2) объемный вес скелета мерзлого грунта $\gamma_м = \gamma_0 : (1 + W) = 1{,}42$ *т/м*^{3} *.

Глубина залегания границы талого и мерзлого грунтов под трубой для данного случая была уже определена в § 39, а именно: $y_1 = 5{,}64$ *м*. Следовательно, глубина талого слоя под трубой, согласно формуле (95),

$$\xi = y_1 - h - r = 5{,}64 - 3{,}00 - 0{,}15 = 2{,}49 \text{ м}.$$

Определим относительное сжатие грунтов при оттаивании по формуле (107). Величина уплотняющего давления от вышележащих слоев грунта $p = \gamma_0 h = 0{,}0018 \cdot 300 = 0{,}54$ *кг/см*^{2}. Для этого значения коэффициент уплотнения κ по табл. 12 при $W_п = 11$ составляет 1,28. Относительное сжатие грунта при оттаивании

$$\delta = 1 - 1{,}42\left[\frac{1}{2{,}71} + \frac{1}{1}(0{,}17 + 1{,}28 \cdot 0{,}11)\right] = 0{,}03.$$

Поскольку канализация самотечная, допустимую осадку Δ принимаем равной 5 *см* (0,05 *м*). Требуемая глубина замены грунта под трубой

$$h_з = \xi - \frac{\Delta}{\delta} = 2{,}49 - \frac{0{,}05}{0{,}03} = 0{,}82 \text{ м}.$$

Замена грунта в основании каналов производится на глубину, определяемую аналогичным расчетом, т. е. по формуле (106). Глубина оттаивания грунта под каналом ξ вычисляется при стационарном температурном поле (см. § 36), если не предусмотрена специальная вентиляция канала для промораживания грунтов в его основании в зимнее время. Для проходных и полупроходных подземных каналов глубина протаивания определяется по правилам, изложенным в § 40, при нестационарном температурном поле вокруг канала.

Допустимую осадку Δ можно принимать такой же, как и для железобетонных труб с гибкими стыками, т. е. по формуле (109), принимая угол допустимого поворота в стыках $\alpha = 1{,}5°$ и длину l по длине блока канала. В современном строительстве каналы сооружаются из готовых блоков длиной 3—4 *м*, так что допустимая осадка получается 4—5 *см*.

* При расчетах можно также пользоваться графиком на рис. 44.

§ 42. Расчет пульсирующих опор

Опоры в виде земляных призм, также как и качающиеся опоры, являются опорами деформируемыми («пульсирующими»). При протаивании грунта в основании они садятся. При замерзании грунта в холодный период года может иметь место поднятие опор силами морозного пучения. Эти деформации не должны превосходить допустимых размеров, причем последние зависят от диаметра, материала труб и от расстояния между опорами.

Допустимая осадка для пульсирующих опор определяется по формуле

$$\Delta = \frac{l^2\left(\sigma W - \frac{ql^2}{12}\right)}{3EI}, \qquad (110)$$

где l — пролет между опорами в *см*;

σ — допустимое напряжение в материале трубы при изгибе в *кг/см*^{2};

W — момент сопротивления поперечного сечения стенки трубы в *см*^{3};

EI — жесткость трубы в *кг·см*^{2};

q — равномерно распределенная нагрузка на единицу длины трубы в *кг/см*:

$$q = \sqrt{q_в^2 + q_г^2}; \qquad (111)$$

$q_в$ — вертикальная нагрузка, учитывающая вес трубопровода с транспортируемой жидкостью и тепловой изоляцией, в *кг/см*;

$q_г$ — горизонтальная нагрузка, учитывающая давление ветра, в *кг/см*:

$$q_г = \kappa_а \frac{v^2}{2g} \cdot \frac{\Gamma d_2}{10^4}; \qquad (112)$$

v — расчетная скорость ветра в *м/сек*;

$g = 9{,}81$ *м/сек*^{2} — ускорение силы тяжести;

$\Gamma = 1{,}29$ *кг/м*^{3} — вес воздуха;

d_2 — наружный диаметр трубопровода (с учетом толщины теплоизоляции) в *см*;

$\kappa_а = 1{,}4 \div 1{,}6$ — аэродинамический коэффициент.

Трубопровод, лежащий на свободных опорах, рассчитывается как многопролетная неразрезная балка. Из этих условий допустимый пролет между опорами

$$l = \sqrt{\frac{12\sigma W}{q}}. \qquad (113)$$

Пример 31. Водовод из стальных труб диаметром 325×6 *мм* уложен на земляных опорах (земляных призмах). Определить расстояние между опорами и допустимую деформацию опор (осадку или выпирание). Расчетная скорость ветра $v = 15$ *м/сек*.

Вертикальная нагрузка в водоводе

$$q_в = \pi\left[\left(r_2^2 - r_1^2\right)\gamma + r_1^2\gamma_ж\right] = 3{,}14\left[\left(0{,}162^2 - 0{,}157^2\right)7850 + \right.$$
$$\left. + 0{,}157^2 \cdot 1000\right] = 124{,}7\ кг/м \approx 1{,}25\ кг/см.$$

Здесь r_1 и r_2 — соответственно внутренний и наружный радиусы трубы, $\gamma = 7850\ кг/м^3$ — вес материала трубы (сталь), а $\gamma_ж$ — $1000\ кг/м^3$ — объемный вес жидкости (воды).

Горизонтальная нагрузка на водовод по формуле (112)

$$q_г = 1{,}5\,\frac{15^2}{2 \cdot 9{,}81} \cdot \frac{1{,}29 \cdot 32{,}5}{10^4} = 0{,}07\ кг/см.$$

Равномерно распределенная нагрузка на водовод

$$q = \sqrt{1{,}25^2 + 0{,}07^2} = 1{,}25\ кг/см.$$

Определяем момент инерции и момент сопротивления поперечного сечения стенки трубы:

$$I = \frac{\pi d_2^3}{8}\,t = \frac{3{,}14 \cdot 32{,}5^3}{8} \cdot 0{,}6 = 8084\ см^4;$$

$$W = \frac{\pi d_2^2}{4}\,t = \frac{3{,}14 \cdot 32{,}5^2}{4} \cdot 0{,}6 = 264\ см^3.$$

Здесь t — толщина стенки трубы в *см*.

$E = 2 \cdot 10^6\ кг/см^2$ (сталь), $\sigma = 1600\ кг/см^2$.

Пролет по формуле (113)

$$l = \sqrt{\frac{12 \cdot 1600 \cdot 264}{1{,}25}} = 1805\ см = 18\ м.$$

Учитывая пульсацию опор, примем пролет $l = 10\ м$ и определим, какая при этом получается допустимая осадка или выпирание, по формуле (110)

$$\Delta = \frac{1000^2 \cdot \left(1600 \cdot 264 - \dfrac{1{,}25 \cdot 1000^2}{12}\right)}{3 \cdot 2 \cdot 10^6 \cdot 8084} = 7\ см.$$

Расчет самих пульсирующих опор заключается в определении высоты земляной призмы. Подобно тому, как это делается при расчете высоты насыпи автомобильных и железных дорог на вечномерзлых грунтах, надлежит определить такую высоту земляной призмы, при которой граница мерзлого грунта под призмой держалась бы на определенном уровне, так чтобы вышележащий слой оттаявшего грунта давал осадку не более допустимой *. Расчетная формула напишется так:

$$H = S - \frac{S\Delta}{h_т}\left(\frac{1}{\delta} - 1\right) - \Delta, \qquad (114)$$

* А. Л. Ястребов. Деформации насыпных сооружений при строительстве на многолетнемерзлых грунтах. «Известия Академии строительства и архитектуры СССР», № 1, 1962.

где H — высота земляной призмы, считая от поверхности земли, в *м*;

$h_т$ — глубина сезонного оттаивания грунта на данном участке строительства в *м*;

S — глубина оттаивания насыпного грунта, из которого сооружается опора, в *м*;

Δ — допустимая деформация опоры, определяемая по формуле (110), в *м*;

δ — относительное сжатие грунта основания призмы при его оттаивании, определяемое по правилам, указанным в § 41.

Пример 32. Определить высоту грунтовой опоры, отсыпаемой из мелких песчаных грунтов в районе Игарки. Грунты в основании призмы — льдистые суглинки с влажностью $W = 38\%$ и числом пластичности $W_п = 9$, прикрытые сверху моховым покровом толщиной 15 *см*. На опоры будет укладываться трубопровод, для которого допустимая деформация Δ, рассчитанная по формуле (122), равна 8 *см*.

Таблица 13

Наименование грунта	$W_п$	$W_р$, %
Супесь легкая	1—3	17—16
» тяжелая	3—7	15,5
Суглинок легкий	7—9	16
» средний	9—13	16—17
» тяжелый	13—17	17—19

Относительное сжатие грунта основания следует вычислить по формуле (107), но для этого у нас не хватает ряда исходных данных. Если нет данных о пластичных свойствах грунта, то для расчетов подобного рода можно принимать их из данных табл. 13.

Поступаем следующим образом. Влажность грунта на границе раскатывания примем $W_р = 16\%$. Коэффициент κ в формуле (107) следует брать по табл. 12 при уплотняющем давлении $p = 0{,}5\ кг/см^2$, так как грунтовые опоры обычно бывают небольшой высоты и давление на грунт в их основании не будет превышать $0{,}5\ кг/см^2$.

Приняв это правило, для нашего случая получаем $\kappa = 1{,}5$. Далее, нам неизвестен объемный вес скелета грунта в основании земляной опоры. Поэтому из графика на рис. 44 берем $\gamma_{ск}$, как для глинистого грунта, с влажностью 38% и получаем $\gamma_м = 1{,}29\ т/м^3 = 1{,}29\ г/см^3$. Затем, подставляя принятые значения в формулу (114), имеем:

$$\delta = 1 - 1{,}29\left[\frac{1}{2{,}71} + \frac{1}{1}(0{,}16 + 1{,}5 \cdot 0{,}09)\right] = 0{,}14.$$

Глубину сезонного оттаивания грунтов $h_т$ рассчитываем для двухслойной толщи (моховой покров, суглинок), так как отсыпку грунтовых опор всегда желательно производить без нарушения естественного покрытия поверхности. Для этого воспользуемся формулой (5)

$$h_т = S'' - \frac{S''}{S'}\,h' + h'.$$

Глубину оттаивания глинистых грунтов S'' в Игарке определяем по карте прилож. 2, внося поправку на влажность ($W = 38\%$) по формуле (4). Тогда получаем

$$S'' = \kappa_W S = 0{,}88 \cdot 2{,}1 = 1{,}85\ м.$$

Глубину оттаивания мохового покрова S' берем по карте прилож. 5 оттаивания органических грунтов. Находим $S' = 0{,}6$ *м*. Тогда

$$h_т = 1{,}85 - \frac{1{,}85}{0{,}60} \cdot 0{,}08 + 0{,}08 = 1{,}68 \text{ м}.$$

Величину h' — толщину верхнего слоя (мохового покрова) берем с учетом обжатия слоя под давлением будущей земляной призмы, а именно:

$$\frac{0{,}15}{2} \approx 0{,}08 \text{ м}.$$

Нормативная влажность для грунтов, из которых будут отсыпаться земляные призмы, равна 8% (см. § 18). Так как мы будем отсыпать песчаную призму на глинистое основание, то следует воспользоваться картой, данной в прилож. 4 *.

Тогда глубина оттаивания грунта земляной призмы будет

$$S = 0{,}93 \cdot 2{,}3 = 2{,}14 \text{ м}.$$

Подставляем полученные данные в формулу (114) и получаем требуемую высоту грунтовой опоры:

$$H = 2{,}14 - \frac{2{,}14 \cdot 0{,}08}{1{,}68}\left(\frac{1}{0{,}14} - 1\right) - 0{,}08 = 1{,}44 \text{ м}.$$

Если бы потребовалось иметь недеформируемую грунтовую опору, то пришлось бы назначить ее высотой 2,14 *м*, что следует из формулы (114) при $\Delta = 0$. В случае допуска величины осадки (или выпирания) опоры не 8 *см*, как в нашем случае, а, скажем, 18 *см*, высоту земляной опоры достаточно было бы иметь равной 0,55 *м*.

Если по местным условиям, например для соблюдения продольного уклона трубопровода, высота опоры должна быть определенной (фиксированной), а по расчету призма получается большей высоты, то следует в основании земляной опоры сделать замену (вырезку) грунта на глубину, которая определяется по формуле

$$h_з = H - H_ф, \tag{115}$$

где $h_з$ — глубина замены грунта в основании земляной опоры в *м*;
H — высота, определенная по формуле (114), в *м*;
$H_ф$ — фиксированная высота земляной опоры в *м*.

Когда на пульсирующих опорах укладывается санитарно-технический канал (см. рис. 19), то расчет высоты земляной опоры производится аналогично расчету ее при укладке трубопровода. По формуле (110), принимая EI для поперечного сечения стенок канала, определяется допустимая деформация Δ, а по формуле (114) — необходимая высота земляной призмы.

* На карте прилож. 4 график поправки на влажность не приводится, так как он тот же, что и на карте прилож. 3.

§ 43. Расчет свайных опор инженерных коммуникаций

В современном строительстве наземных инженерных коммуникаций на вечномерзлых грунтах при любых мерзлотно-грунтовых условиях применяются в основном свайные основания. Поэтому рассмотрим расчет только свайных опор.

Расчет промежуточных опор (рис. 17) можно ограничить расчетом на вертикальную нагрузку, применяя формулу

$$N \leqslant Ф, \tag{116}$$

где N — расчетная нагрузка на сваю, включая вес сваи, в T;
$Ф$ — несущая способность сваи в T.

По сравнению с расчетом свайных фундаментов зданий можно ввести упрощения при определении величины $Ф$.

Так можно не учитывать трение в слое сезонного оттаивания и реактивное давление на острие сваи, что пойдет в запас прочности. Далее, опоры инженерных сетей как несущие незначительную нагрузку обычно анкеруются в мерзлую толщу грунта на небольшую глубину, так что в большинстве случаев мы будем иметь в основании грунт одного вида — глинистый или песчаный. Поэтому формулу, по которой определяется несущая способность сваи, можно записать в более простом, по сравнению со СНиП II-Б.6—66, виде, а именно:

$$Ф = 0{,}8 R_{сд} h_м u, \tag{117}$$

где $h_м$ — глубина заделки сваи в вечномерзлый грунт в *м*;
u — периметр поперечного сечения сваи в *м*;
$R_{сд}$ — сопротивление грунтов сдвигу по поверхности смерзания со сваей в $T/м^2$ берется по табл. 14.

Таблица 14

Сопротивление мерзлых грунтов сдвигу для железобетонных и деревянных свай (СНиП II-Б.6-66)

Грунты	$R_{сд}$ в $T/м^2$ при температуре грунта в °С							
	−0,5	−1	−1,5	−2	−2,5	−3	−3,5	−4 и ниже
Песчаные	8	13	16	20	23	26	29	33
Глинистые	5	10	13	15	18	20	23	25

Примечание. Для металлических свай эти значения принимаются с коэффициентом 0,7.

Из формулы (117) получаем требуемую по условиям несущей способности заделку сваи в мерзлый грунт

$$h_м = \frac{N}{0{,}8 R_{сд} u}. \tag{118}$$

Значения нормативного сопротивления сдвигу по табл. 14 следует брать при максимальной за год температуре грунта на глубине середины заделки сваи в мерзлый грунт. Эту

температуру можно определить по формуле (13), полагая в ней $z = \frac{h_м}{2}$. Так как глубина заделки нам заранее неизвестна, приходится для определения максимальной температуры грунта предварительно задаваться величиной $h_м$, приняв ее равной 1—2 *м*. Если же при этом получится значительное расхождение с величиной, получаемой по формуле (118), то расчет следует повторить.

Вычисленную по формуле (118) глубину заделки сваи в мерзлый грунт следует проверить расчетом на выпучивание с тем, чтобы соблюсти условие, при котором силы морозного пучения были бы равны или меньше сил, удерживающих сваю в грунте. Это условие при сливающейся криолитозоне (рис. 67, *а*) может быть записано так:

$$0{,}9R_{сд}h_м u = 1{,}1\tau h_т u - G, \quad (119)$$

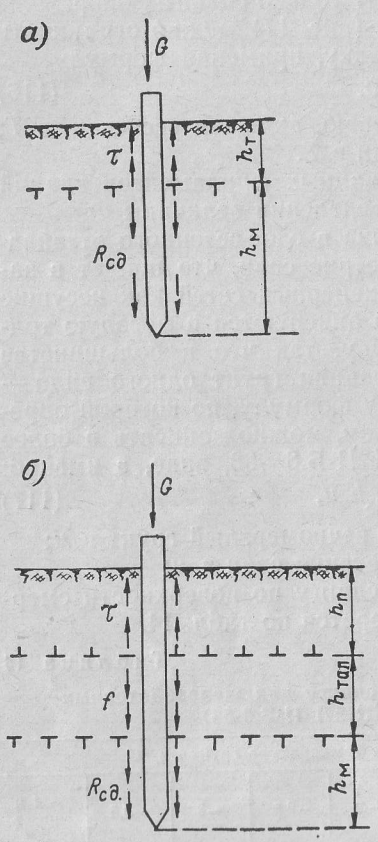


Рис. 67. Расчетная схема для сваи, на которую действуют силы морозного пучения

а — при сливающейся криолитозоне; *б* — при несливающейся криолитозоне

где 0,9 — коэффициент однородности грунта и условия работы;

$h_т$ — мощность слоя сезонного оттаивания грунта в *м*;

1,1 — коэффициент перегрузки, принимаемый при сливающейся криолитозоне;

τ — нормативная касательная сила выпучивания, принимаемая равной 8 $Т/м^2$ для районов где температура мерзлой толщи грунтов $t_0 = -3°$ С и выше, и равной 6 $т/м^2$ для районов, где t_0 ниже —3° С;

G — вес сваи в *т* (нагрузка от самого трубопровода или канала в расчет не принимается, так как сваю может выпучить до того, как будут произведены работы по укладке труб или коробов канала).

Необходимая глубина заделки сваи в мерзлую толщу грунта по условию противодействия силам морозного пучения

определяется по формуле

$$h_м = \frac{1{,}1\tau h_т u - G}{0{,}9R_{сд}u}. \quad (120)$$

При несливающейся криолитозоне (рис. 67, *б*) условие (119) запишется так:

$$0{,}9\,(R_{сд}h_м u + fh_{тал}u) = 1{,}3\tau h_п u - G, \quad (121)$$

а необходимая глубина анкеровки в мерзлую толщу грунта составит:

$$h_м = \frac{1{,}3\tau h_п - 0{,}9fh_{тал} - \frac{G}{u}}{0{,}9R_{сд}}, \quad (122)$$

где $h_п$ — мощность слоя сезонного промерзания (см. § 18) в *м*;

$h_{тал}$ — мощность слоя между слоем сезонного промерзания и вечномерзлой толщей грунта в *м* (слой сохраняется в талом состоянии весь год);

1,3 — коэффициент перегрузки, применяемый при несливающейся криолитозоне;

f — сопротивление талого грунта по боковой поверхности сваи, которое при отсутствии опытных данных можно принимать для глинистых грунтов равным 2 $Т/м^2$ и для песчаных — 3 $Т/м^2$.

Пример 33. Рассчитать свайную опору под надземный железобетонный канал, сооружаемый по рис. 18, *а*, при следующих исходных данных. Температура вечномерзлой толщи грунтов, взятая по карте прилож. 1, $t_0 = -2°$ С. Криолитозона, сливающаяся со слоем сезонного оттаивания, $h_т = 1{,}8$ *м*. Грунты — глинистые, имеющие следующие теплофизические характеристики: коэффициент теплопроводности мерзлого грунта $\lambda_м = 1{,}40$ *ккал/м·ч·град*; объемная теплоемкость мерзлого грунта, приведенная к температуре $t_0 = -2°$ С по формуле (3), $C' = 420$ *ккал/м³·град*. Расстояние между опорами 5 *м*. Вес канала на одном пролете совместно с трубопроводами и насадкой на сваю 4,5 *т*. В качестве опоры примем железобетонную сваю квадратного сечения 25 × 25 *см*. Периметр поперечного сечения сваи $u = 1$ *м*.

Предварительно задаемся глубиной анкеровки сваи в вечномерзлую толщу грунта $h_м = 1{,}5$ *м*. Тогда длина сваи, учитывая высоту наземной части 0,5 *м*, будет: $0{,}5 + 1{,}8 + 1{,}5 = 3{,}8$ *м* и вес сваи $G = 0{,}5$ *т*. Расчетная нагрузка на сваю $N = 4{,}5 + 0{,}5 = 5$ *т*.

Определяем максимальную температуру грунта на глубине $\frac{h_м}{2}$, т. е. при $z = 0{,}75$ *м*, по формуле (13):

$$t_{макс} = -2\left[1 - \exp\left(-0{,}75\sqrt{\frac{3{,}14 \cdot 420}{1{,}40 \cdot 8760}}\right)\right] = -0{,}44° \text{ С}.$$

По этой температуре из табл. 14 находим значение нормативного сопротивления сдвигу мерзлых грунтов $R_{сд} = 4{,}4$ $Т/м^2$. Несущая способность сваи по формуле (117)

$$\Phi = 0{,}8 \cdot 4{,}4 \cdot 1{,}5 \cdot 1 = 5{,}3\,Т > N = 5\,Т.$$

Производим проверку на выпучивание по формуле (120), принимая $\tau = 8\ T/м^2$:

$$h_м = \frac{1{,}1 \cdot 8 \cdot 1{,}8 \cdot 1 - 0{,}5}{0{,}9 \cdot 4{,}4 \cdot 1} = 3{,}87\ м.$$

Следовательно, по условиям противодействия силам морозного пучения нужно принять заделку сваи в мерзлую толщу грунта не 1,5 *м*, как мы задались, а 3,87 *м*. Но, строго говоря, этот расчет не верен, так как сопротивление сдвигу бралось на глубине, не соответствующей середине сваи, а ближе к поверхности, где максимальная температура грунта выше. Следует повторить расчет, задавшись новой длиной заделки сваи. Если, например, принять $h_м = 2{,}5\ м$ и, следовательно, $z = 1{,}25\ м$, то максимальная температура грунта в середине заделки сваи, рассчитанная по формуле (13), будет

$$t_{макс} = -0{,}67°\,С; \quad R_{сд} = 6{,}7\ T/м^2, \quad G = 0{,}6\ т.$$

Тогда, подставив эти новые значения в формулу (120), найдем, что потребная глубина заделки по условию противодействия пучению $h_м = 2{,}53\ м$, что и следует принять.

Формула (120) неудобна для расчетов, так как приходится предварительно задаваться глубиной анкеровки опоры в мерзлую толщу, определять температуру грунта и по ней находить $R_{сд}$, а затем обычно повторять расчет, как в примере 33. Для сливающейся криолитозоны В. В. Докучаевым была предложена более удобная формула, дающая возможность сразу получить необходимую глубину анкеровки опоры в мерзлую толщу*:

$$h_м = \frac{1}{12{,}4 t_0}\left(2{,}34\sqrt[3]{\frac{1{,}2\,(\tau h_т u - G)\,t_0}{u}} + 1\right)^2, \qquad (123)$$

где t_0 — температура вечномерзлой толщи грунта, определяемая по карте прилож. 1 и принимаемая без знака (абсолютное значение).

Остальные символы те же, что и в формуле (119). Коэффициент 1,2, стоящий под корнем, величина безразмерная. Он учитывает однородность грунта, условия работы и перегрузку. Остальные численные коэффициенты в формуле (123) имеют следующую размерность: 12,4 $1/м \cdot град$; 2,34 $м/т \cdot град$.

Формулой (123) можно пользоваться только при сливающейся криолитозоне и температуре вечномерзлой толщи грунта $t_0 = -2°$ С и ниже. В остальных случаях необходимо применять формулы (120) и (122).

* В. В. Докучаев. Расчет глубины заложения фундаментов, работающих на выпучивание. В сб.: Планировка и застройка населенных мест Крайнего Севера. Ленинградский филиал АСиА СССР. Госстройиздат, 1959.

Пример 34. Воспользуемся выражением (123) для случая, заданного в предыдущем примере. Необходимая глубина анкеровки сваи в вечномерзлую толщу грунта по условию предотвращения выпучивания

$$h_м = \frac{1}{12{,}4 \cdot 2}\left(2{,}34\sqrt[3]{\frac{1{,}2\,(8 \cdot 1{,}8 \cdot 1 - 0{,}5) \cdot 2}{1}} + 1\right)^2 = 2{,}64\ м;$$

значение это близко к тому, что было найдено ранее в примере 33.

§ 44. Расчет свайных мертвых опор

Расчет мертвых опор на свайных фундаментах сводится к расчету свай на горизонтальную нагрузку. Свая, заанкеренная в мерзлую толщу грунтов, рассматривается как балка, лежащая на линейно деформируемом основании, с условной заделкой несколько ниже верхней границы вечномерзлой толщи. При действии горизонтальной нагрузки свая смещается и вызывает деформацию и реактивное сопротивление грунта. Прочность ее проверяется на действие изгибающего момента $M_{макс}$ и перерезывающей силы $Q_{макс}$. Взаимодействие между сваей и грунтом определяется давлением сваи P, рассчитываемым по уравнению деформированной оси сваи*.

Прежде чем приступить к расчету сваи, следует определить расчетную глубину слоя сезонного оттаивания и глубину погружения сваи в мерзлую толщу грунтов $h_м$ из условия противодействия силам морозного пучения, как это указывалось в предыдущем параграфе.

Работу сваи на горизонтальную нагрузку можно рассматривать для двух случаев (рис. 68). Схема *1* отображает работу сваи при погружении ее в однородный мерзлый грунт. В схеме *2* учитываются два различных слоя грунта — талый грунт в слое сезонного оттаивания $h_т$ и мерзлый слой в толще вечномерзлых грунтов $h_м$.

Расчет следует начинать, приняв схему *2*. В этом случае усилия $M_{макс}$ и $Q_{макс}$, возникающие в свае, нагруженной горизонтальной силой H и моментом M, определяются по формулам

$$M_{макс} = M \cdot \bar{M}_м + HL_{пр}\bar{M}_н \qquad (124)$$

и

$$Q_{макс} = H, \qquad (125)$$

где M — момент от расчетной нагрузки, приведенный к поверхности грунта, в *тм*;

H — горизонтальная сила, действующая на сваю, в *т*;

* К. Ф. Маркин. Расчет свайных оснований на вечномерзлых грунтах. Труды института по проектированию морских портов и судоремонтных предприятий. Сб. 6. Изд-во «Морской транспорт», 1959.

$\bar{M}_м$ и $\bar{M}_н$ — безразмерные коэффициенты, определяемые по графику на рис. 68, *в* зависимости от величины $\alpha_с$, равной отношению расчетной длины сваи l к приведенной длине сваи $L_{пр}$:

$$\alpha_с = \frac{l}{L_{пр}}. \qquad (126)$$

За расчетную длину сваи l принимается расстояние от поверхности грунта до места условной заделки в мерзлый

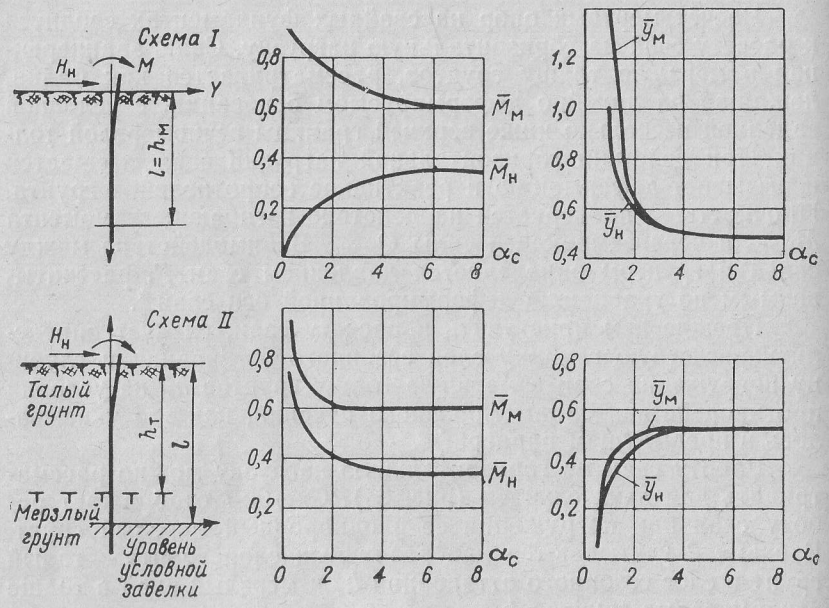


Рис. 68. Схемы и графики для расчета свай на горизонтальную нагрузку

грунт (несколько ниже верхней границы вечномерзлой толщи грунтов), а именно:

при сливающейся криолитозоне (см. рис. 43, *а*)

$$l = h_т + \kappa_з d; \qquad (127)$$

при несливающейся криолитозоне (см. рис. 43, *б*)

$$l = h_п + h_{тал} + \kappa_з d, \qquad (128)$$

где $\kappa_з$ — коэффициент, равный 1 для песчаных грунтов и 1,5 для глинистых грунтов;

d — диаметр сваи или сторона сечения сваи (увеличенные на 25%), параллельная плоскости действия горизонтальной силы, в *м*.

Приведенная длина сваи рассчитывается по формуле

$$L_{пр} = \sqrt[4]{\frac{10B}{E_0}(1-\mu^2)}, \qquad (129)$$

где B — жесткость сваи в $Т \cdot м^2$;

E_0 — модуль деформации грунта в $Т/м^2$; при расчете по схеме *2* (см. рис. 68) значение E_0 берется для талого грунта по табл. 15 *;

μ — коэффициент Пуассона для грунта, также принимаемый при расчете по схеме *2* для талого грунта по табл. 16.

Таблица 15

Расчетные модули деформации грунтов сезонноталого слоя

Глинистые грунты		Песчаные грунты			
коэффициент консистенции грунта B	модуль деформации грунта E_0, $Т/м^2$	коэффициент пористости грунта ε	модуль деформации грунтов E_0, $Т/м^2$		
			крупных и средней крупности	мелких	пылеватых
0,1	900	0,41—0,50	5 000	4 800	3 900
0,2	800	0,51—0,60	4 000	3 800	2 800
0,4	650	0,61—0,70	3 000	2 800	1 800
0,6	300	0,71—0,80	—	1 800	1 100
0,7	150	—	—	—	—
0,9	50	—	—	—	—

Значения E_0 для глинистых грунтов берутся по табл. 15 в зависимости от коэффициента консистенции грунта, который определяется по влажности грунта W, влажности на границе раскатывания $W_р$ и числу пластичности $W_п$:

$$B = \frac{W - W_р}{W_п}. \qquad (130)$$

Таблица 16

Коэффициенты Пуассона μ для грунтов

Наименование грунта	Талый грунт	Мерзлый грунт
Песок	0,20—0,25	0,20—0,40
Супесь	0,25—0,30	0,30—0,40
Суглинок	0,35	0,40

Значения E_0 для песчаных грунтов берутся в зависимости от коэффициента пористости грунта, определяемого по формуле

$$\varepsilon = \frac{\gamma_ч}{\gamma_0}(1 + W) - 1, \qquad (131)$$

где $\gamma_ч = 2{,}66\ т/м^3$ — удельный вес материала частиц песчаного грунта;

* Данные для песчаных грунтов в табл. 15 и вся табл. 17 заимствованы из книги К. Ф. Маркина, В. В. Докучаева Свайные фундаменты в вечномерзлых грунтах. Стройиздат, 1972.

γ_0 — объемный вес грунта в $т/м^3$,

W — влажность грунта в долях единицы.

Жесткость сваи, входящая в формулу (129), для деревянных и металлических свай определяется по формуле

$$B = EI, \tag{132}$$

где E — модуль упругости материала сваи в $Т/м^2$;

I — момент инерции сечения сваи в $м^4$.

Для железобетонных свай B определяют более сложным способом, о котором будет сказано ниже.

Если при расчете по формуле (126) коэффициент α_c получится меньше 1, то это указывает на незначительность сопротивления деформации сваи со стороны слоя талого грунта. Им следует пренебречь и сразу переходить на расчет по схеме *1* (см. рис. 68). В последнем случае расчетная длина сваи принимается равной заделке ее в мерзлый грунт:

$$l = h_м, \tag{133}$$

где $h_м$ — глубина анкеровки сваи в вечномерзлую толщу грунтов, определяемая по вертикальной нагрузке на сваю из уравнения (118).

При нахождении нового значения α_c (при расчетной схеме *1*) в формулу приведенной длины сваи (129) следует подставлять значения E_0 и μ уже для мерзлого грунта по табл. 17 и 16.

Таблица 17

Модуль деформации мерзлых грунтов

Наименование грунта	Температура грунта $t_г$, °С	Модуль деформации E_0, $Т/м^2$
Песчаные всех разновидностей	—0,5	9 000
	—1,0	35 000
	—2,0	45 000
Глинистые, включая пылеватые	—0,5	1 500
	—1,0	4 000
	—2,0	8 000

Примечание. Температуру грунта $t_г$ следует брать в месте условной заделки свай в мерзлый грунт как максимальную за год, т. е. определять ее по формуле (14), принимая $z = \kappa_з d$, где d так же, как в формулах (127) и (128), увеличивается на 25%.

При расчете по схеме *1*, $M_{макс}$ и $Q_{макс}$ определяются так же, как и при расчете по схеме *2*, т. е. по формулам (124) и (125), но момент расчетной нагрузки M приводится к верхней границе вечномерзлой толщи грунта, а безразмерные коэффициенты $\overline{M}_м$ и $\overline{M}_ц$ берутся из графика для схемы *1* (см. рис. 68).

Горизонтальное перемещение сваи у поверхности грунта (при расчете по схеме *2*) или у верхней границы вечномерзлой толщи грунта (при расчете по схеме *1*) определяется по формуле

$$y = \frac{ML_{пр}^2}{B} \cdot \bar{y}_м + \frac{HL_{пр}^3}{B} \cdot \bar{y}_н, \tag{134}$$

где y — горизонтальный прогиб сваи в $м$;

$\bar{y}_м$ и $\bar{y}_н$ — безразмерные коэффициенты, которые берутся по графикам на рис. 68 в зависимости от принятой расчетной схемы и значения α_c;

B — жесткость сваи в $Т \cdot м^2$.

Зная прогиб сваи, можно найти и давление сваи на грунт:

$$P = \frac{0{,}4E_0 y}{(1-\mu^2)\,b}, \tag{135}$$

где P — давление сваи на грунт в $Т/м^2$;

b — сторона сваи, перпендикулярная направлению горизонтальной силы, действующей на сваю, или диаметр сваи в $м$;

E_0 и μ — модуль деформации грунта и коэффициент Пуассона, которые берутся из табл. 15—17 для талого грунта при расчете по схеме *2* и для мерзлого грунта при расчете по схеме *1*.

Условие прочности конструкции выразится неравенством

$$P \leqslant R. \tag{136}$$

Здесь R — нормативное сопротивление грунтов нормальному давлению в $Т/м^2$. Для талых грунтов (при расчете по схеме *2*) R берется по табл. 18, а для мерзлых (при расчете по схеме *1*) по табл. 19 при температуре грунта $t_г$, уже определенной в ходе расчета ранее, при отыскании модуля деформации мерзлых грунтов (см. примечание к табл. 17).

Таблица 18

Сопротивление нормальному давлению R оттаявших мерзлых грунтов

Глинистые грунты		Песчаные грунты		
коэффициент консистенции грунта B	нормативное сопротивление грунта R, $Т/м^2$	коэффициент пористости грунта ε	нормативное сопротивление грунта при глубине залегания слоя от дневной поверхности в $м$	
			1	2
0,1	25,0	0,41—0,50	15	40
0,2	15,0	0,51—0,60	12	30
0,4	11,0	0,61—0,70	10	25
0,6	5,0	0,71—0,80	7	20
0,7	2,5			
0,9	1,0			

Таблица 19

Сопротивление мерзлых грунтов нормальному давлению

Категория и наименование грунтов	R при температуре грунта в °С				
	−0,5	−1	−1,5	−2	−3
Грунты I и II категорий					
Крупнообломочные и песчаные крупные и средней крупности	90	120	140	160	190
Песчаные мелкие и пылеватые	70	90	110	130	160
Супеси, включая пылеватые	50	70	90	100	130
Суглинки и глины, включая пылеватые	40	60	70	80	100
Грунты III и IV категорий					
Все разновидности грунтов	30	40	50	60	80

Примечание. Категория грунтов определяется по табл. 1.

Если условие (136) не удовлетворяется, то необходимо увеличить жесткость сваи путем усиления арматуры и увеличения поперечного ее сечения. Но можно идти и другим путем — перейдя на расчетную схему *1*, одновременно увеличить глубину заделки сваи в мерзлую толщу грунта $h_м$. Тогда, согласно формуле (133), увеличится расчетная длина сваи l, а следовательно [см. формулу (126)], и значение $\alpha_с$. При этом резко уменьшится давление сваи на грунт, что ясно видно из графика значений $\bar{y}_м$ и $\bar{y}_н$ для схемы *1* (см. рис. 68).

В расчетах горизонтально нагруженных свай большое значение имеет их жесткость B, которая для железобетонных свай определяется по правилам расчета железобетонных конструкций *. С известным приближением, положив, что железобетонная свая работает в упругой стадии, можно принять

$$B = \frac{0{,}85 E_б I_п}{c}, \qquad (137)$$

где $E_б$ — модуль упругости бетона; берется в зависимости от марки:

Марка бетона	200	300	400
$E_б$, $кГ/см^2$	200 000	235 000	255 000

c — коэффициент, учитывающий деформации ползучести в бетоне; для рассматриваемых условий (влажная среда) его можно принимать равным 1,5;

* Руководство по проектированию железобетонных конструкций. Стройиздат, 1968.

$I_п$ — момент инерции приведенного сечения сваи в $см^4$;

$$I_п = \frac{bh^3}{12} + (F_а + F'_а) \cdot \left(\frac{E_а}{E_б} - 1\right) \cdot (0{,}5h - a)^2, \qquad (138)$$

b — сторона сечения сваи, перпендикулярная направлению действия горизонтальной силы, в $см$;

h — то же, параллельная направлению горизонтальной силы, в $см$;

$F_а$ и $F'_а$ — площадь арматуры соответственно в растянутой и сжатой зонах в $см^2$;

a — расстояние от арматуры до поверхности сваи в $см$;

$E_а$ — расчетный модуль упругости арматуры, принимаемый равным $2 \cdot 10^6$ $кГ/см^2$.

Определив жесткость сваи по формуле (137) в $кГ \cdot см^2$, следует перевести ее в $Т \cdot м^2$, так как в этой размерности она фигурирует в приведенных выше формулах расчета сваи на горизонтальную нагрузку.

Пример 35. Рассчитать мертвую опору трубопровода, проектируемую по типу, приведенному на рис. 27. Район строительства — Дудинка. Грунты — суглинок с влажностью 25% со следующими показателями пластичности: $W_т = 33{,}8\%$, $W_р = 17{,}9\%$ и $W_п = 15{,}9\%$.

Глубина сезонного оттаивания в данном районе по карте прилож. 2 с поправкой на влажность грунта будет $h_т = 1{,}8 \cdot 0{,}92 = 1{,}67$ *м*. Чтобы уменьшить глубину протаивания, а следовательно, и необходимое заглубление фундамента опоры в мерзлый грунт предусмотрим теплоизоляцию поверхности грунта вокруг опоры слоем мха толщиной 15 *см*. Глубина оттаивания мха в данном районе по карте прилож. 5 равна 0,54 *м*. По формуле для двухслойной толщи (5) находим расчетную глубину сезонного оттаивания в месте сооружения опоры:

$$S = S'' - \frac{S''}{S'} h' + h' = 1{,}67 - \frac{1{,}67}{0{,}54} \cdot 0{,}15 + 0{,}15 = 1{,}35 \text{ м}.$$

Следовательно, глубина сезонного оттаивания самого грунта $h_т = 1{,}35 - 0{,}15 = 1{,}20$ *м*. Схема конструкции опоры и расчетная схема даны на рис. 69. Горизонтальная сила, действующая на опору, равная 9,3 $Т$, приложена на высоте 1,3 *м* от поверхности земли. Нагрузка значительная, поэтому примем опору, состоящую из четырех железобетонных свай сечением 30×30 *см*. На каждую сваю будет действовать горизонтальная сила $H = 9{,}3 : 4 = 2{,}33$ $Т$.

Предварительно по формуле (123) вычисляем необходимую глубину заделки сваи в мерзлый грунт по условиям противодействия силам выпучивания, приняв периметр сваи $u = 4 \cdot 0{,}3 = 1{,}2$ *м* и температуру вечномерзлой толщи в Дудинке $t_0 = -5°$ С (см. прилож. 1). Подставив эти значения в формулу (123), получим $h_м = 1{,}07$ *м*.

Площадь арматуры $F_а = F'_а = 6{,}3$ $см^2$; $a = 5$ *см*. По формулам (138) и (137), приняв марку бетона 400, находим:

$$I_п = 711 \cdot 10^2 \text{ см}^4; \quad B = 10{,}3 \cdot 10^9 \text{ кг} \cdot \text{см}^2 = 1030 \text{ Т} \cdot \text{м}^2.$$

Продолжаем расчет, приняв схему *2* за расчетную (см. рис. 68). Расчетная длина сваи по формуле (127)

$$l = 1{,}20 + 1{,}5 \cdot 1{,}25 \cdot 0{,}3 = 1{,}76 \text{ м}.$$

Модуль деформации талого грунта E_0 по табл. 15 при коэффициенте консистенции

$$B = \frac{25 - 17{,}9}{15{,}9} = 0{,}45$$

получаем путем интерполяции: $E_0 = 560\ T/м^2$. Коэффициент Пуассона по табл. 16 $\mu = 0{,}35$ (талый суглинок). Приведенная длина сваи по формуле (129)

$$L_{пр} = \sqrt[4]{\frac{10 \cdot 1030}{560}(1 - 0{,}35^2)} = 2\ м.$$

Отношение расчетной длины сваи к приведенной по формуле (126): $\alpha_c = 1{,}76 : 2 = 0{,}88$, т. е. меньше 1, поэтому переходим к расчету по

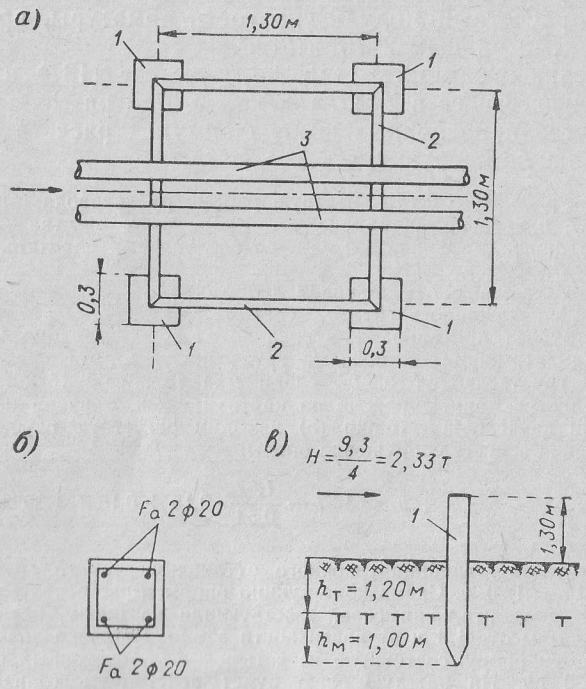


Рис. 69. Схема мертвой опоры трубопроводов

а — вид сверху; *б* — сечение сваи; *в* — разрез погружения сваи; *1* — сваи; *2* — связь из элементов стального проката; *3* — трубопроводы

схеме *1*. В этом случае расчетная длина сваи равна заделке ее в мерзлый грунт, т. е. $l = h_м = 1{,}07\ м$. При расчете нового значения приведенной длины сваи значения E_0 и μ надо брать уже для мерзлого грунта (см. стр. 159).

Согласно примечанию к табл. 17, необходимо знать максимальную температуру мерзлого грунта на глубине $z = \kappa_3 d = 1{,}5 \cdot 1{,}25 \cdot 0{,}30 = 0{,}56\ м$. По таблице теплофизических характеристик грунтов (табл. 4) находим необходимые для расчета температуры данные. Для суглинка с влажностью 25% объемный вес грунта по графику на рис. 44 $\gamma_0 = 1{,}95\ т/м^3$. Следовательно, $\lambda_м = 1{,}55\ ккал/м \cdot ч \cdot град$, а объемная теплоемкость мерзлого грунта, приведенная к температуре $t_0 = -5°$ С и рассчитанная по формуле (3), будет $C'_м = 551\ ккал/м^3 \cdot град$. Подставив эти значения в формулу (13), получим максимальную за год температуру грунта в месте заделки сваи: $t_{макс} = -0{,}9°$ С. Для этой температуры по табл. 17 берем модуль деформации мерзлого грунта $E_0 = 3500\ T/м^2$, а по табл. 16 — коэффициент Пуассона $\mu = 0{,}4$. Тогда приведенная длина сваи, согласно формуле (129),

$$L_{пр} = \sqrt[4]{\frac{10 \cdot 1030}{3500}(1 - 0{,}4^2)} = 1{,}25\ м.$$

Коэффициент $\alpha_c = l : L_{пр} = 0{,}9$. По графику на рис. 68 для этого значения α_c находим безразмерные коэффициенты:

$$\bar{M}_м = 0{,}85; \quad \bar{M}_н = 0{,}16; \quad \bar{y}_м = 1{,}28; \quad \bar{y}_н = 0{,}85.$$

Момент от горизонтальной силы, приведенный к верхней границе вечномерзлой толщи грунтов, будет $M = 2{,}33(1{,}3 + 1{,}2) = 5{,}83\ Тм$. По формулам (124) и (125) получаем:

$$M_{макс} = 5{,}83 \cdot 0{,}85 + 2{,}33 \cdot 1{,}25 \cdot 0{,}16 = 5{,}42\ Тм;$$

$$Q_{макс} = 2{,}33\ Т.$$

По формулам (134) и (135) находим прогиб сваи и давление ее на мерзлый грунт:

$$y = \frac{5{,}83 \cdot 1{,}25^2}{1030} \cdot 1{,}28 + \frac{2{,}33 \cdot 1{,}25^3}{1030} \cdot 0{,}85 = 0{,}015\ м;$$

$$P = \frac{0{,}4 \cdot 3500 \cdot 0{,}015}{(1 - 0{,}4^2) \cdot 0{,}30} = 83{,}5\ T/м^2.$$

Допустимое же давление на мерзлый грунт при температуре его $-0{,}9°$ С по табл. 19 $R = 56\ T/м^2$. Следовательно, и в мерзлом грунте давление сваи будет превышать нормативное. Это указывает на то, что в наших условиях погружение сваи в мерзлый грунт, рассчитанное по условиям сопротивления силам морозного пучения, недостаточно.

Примем глубину заделки сваи в мерзлую толщу грунта вместо 1,07 *м* равной 2 *м*. Тогда

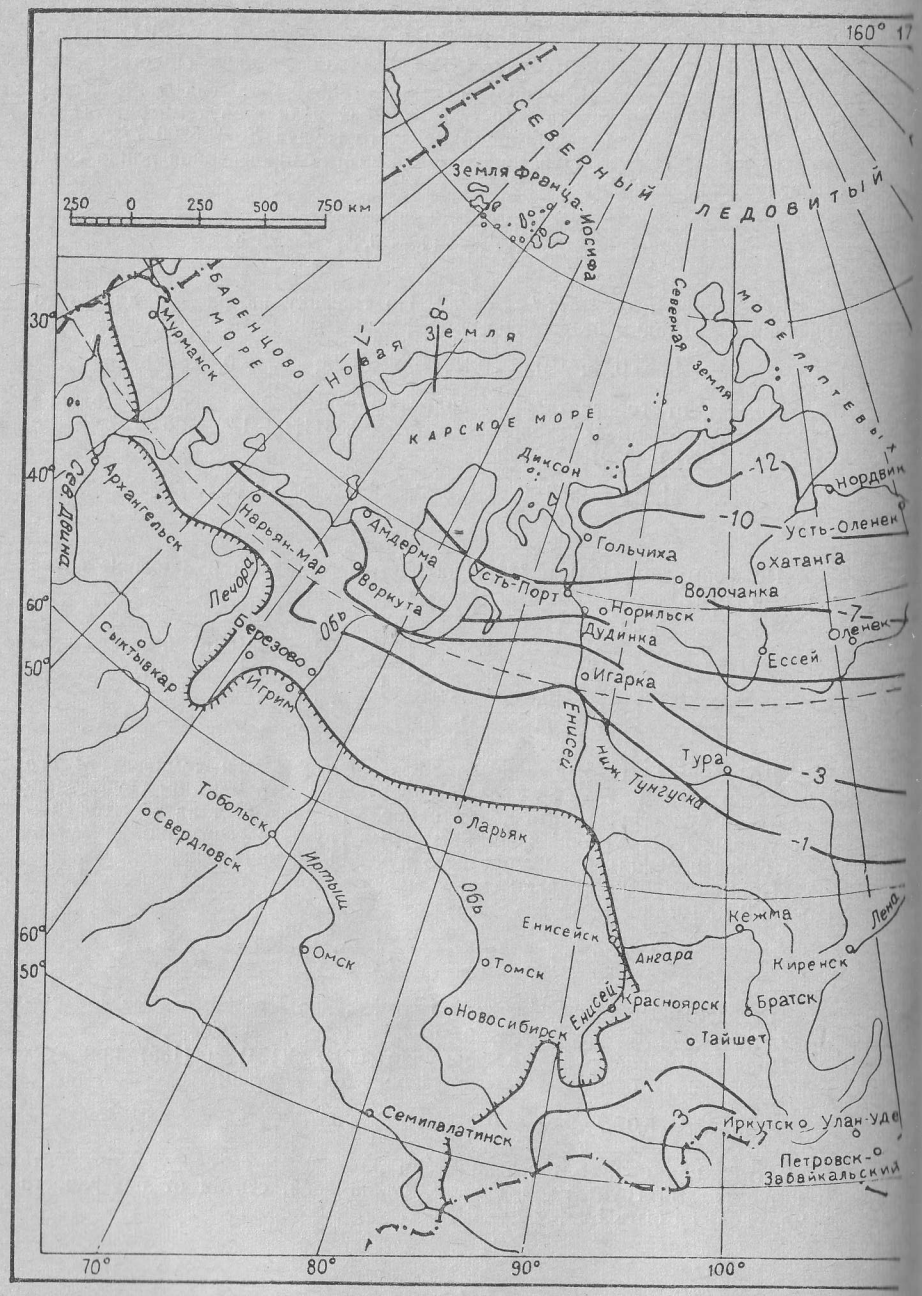
$$l = h_м = 2\ м \quad и \quad \alpha_c = \frac{l}{L_{пр}} = \frac{2}{1{,}25} = 1{,}6.$$

Безразмерные коэффициенты по графику на рис. 68, взятые для схемы *1*, будут: $\bar{M}_м = 0{,}76$; $\bar{M}_н = 0{,}22$; $\bar{y}_м = 0{,}72$; $\bar{y}_н = 0{,}64$.

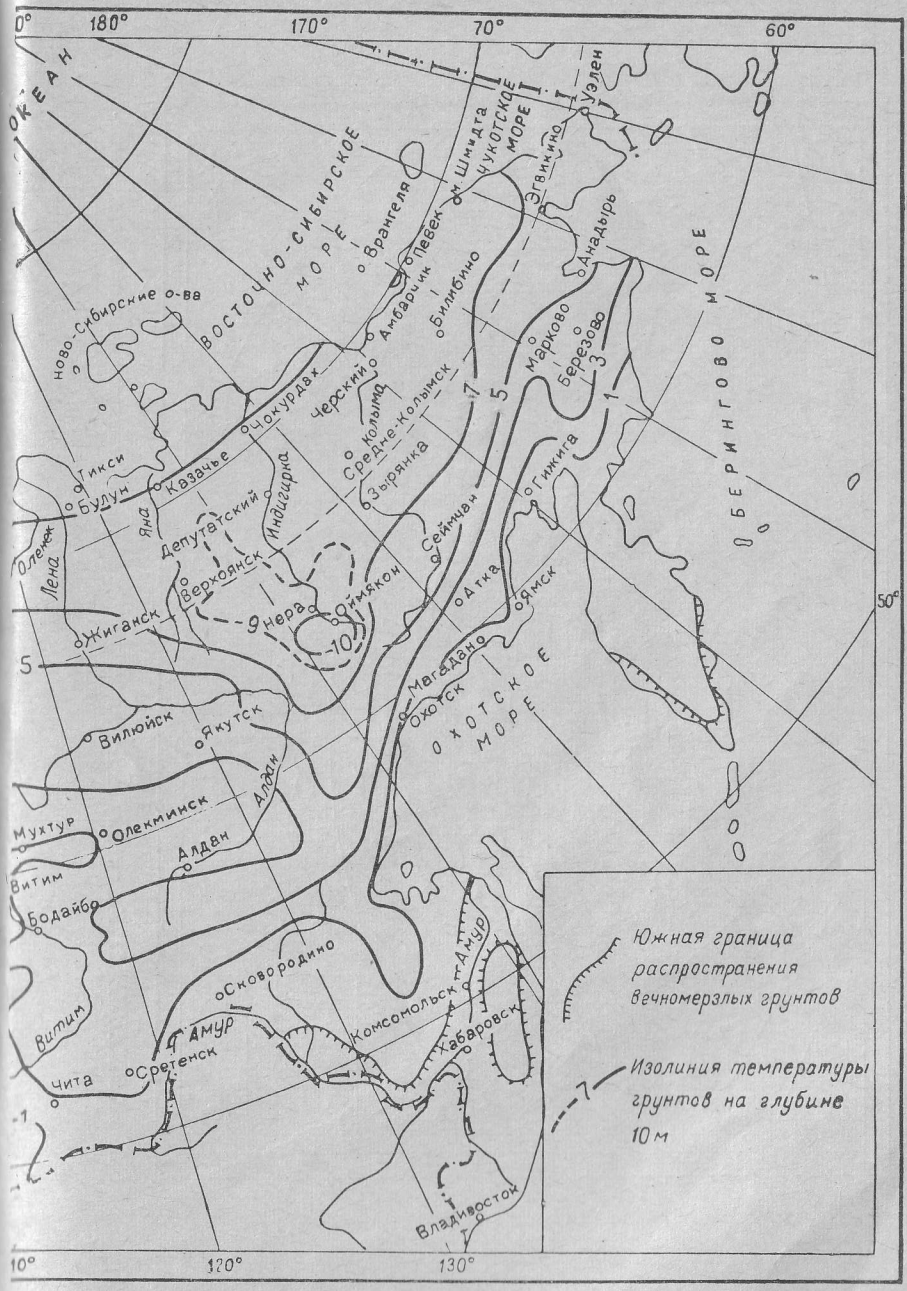
Проделав вычисления по формулам (124), (134) и (135) при этих новых значениях безразмерных коэффициентов, получим:

$$M_{макс} = 5{,}07\ Тм; \quad y = 0{,}009\ м; \quad P = 55\ T/м^2 < R = 56\ T/м^2.$$

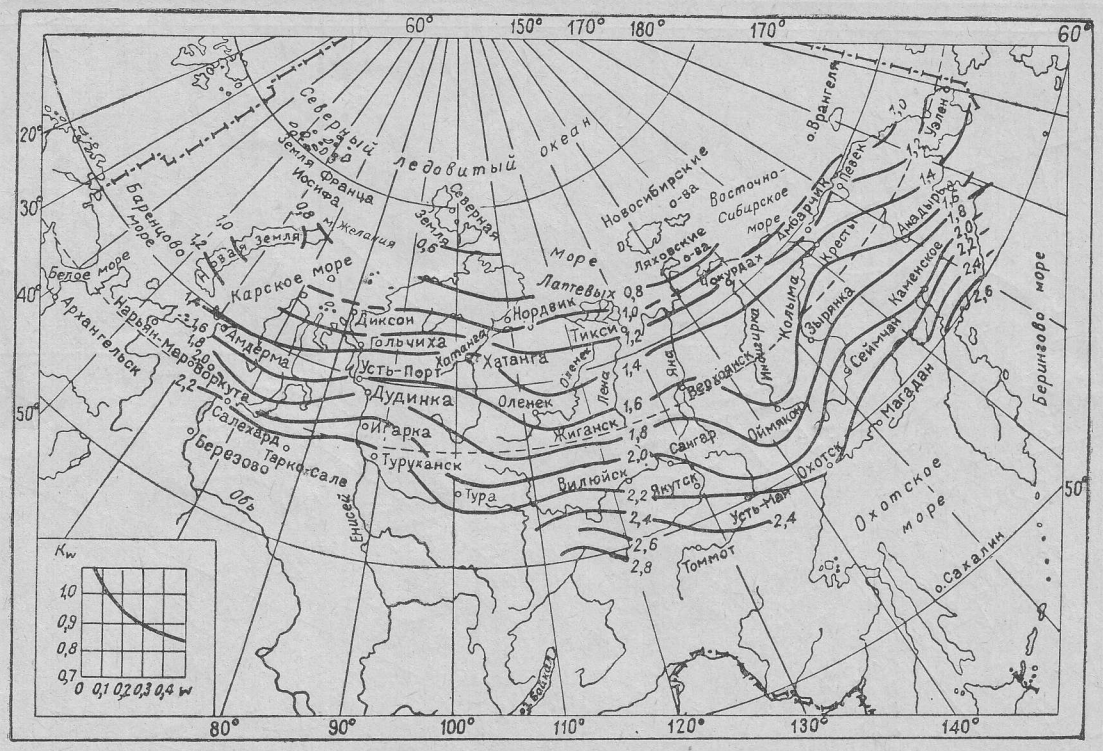
Итак, при принятом сечении сваи $30 \times 30\ см$ ее следует заглубить в вечномерзлый грунт на 2 *м*, т. е. длина сваи, считая от поверхности земли, должна быть $1{,}2 + 2{,}0 = 3{,}2\ м$.



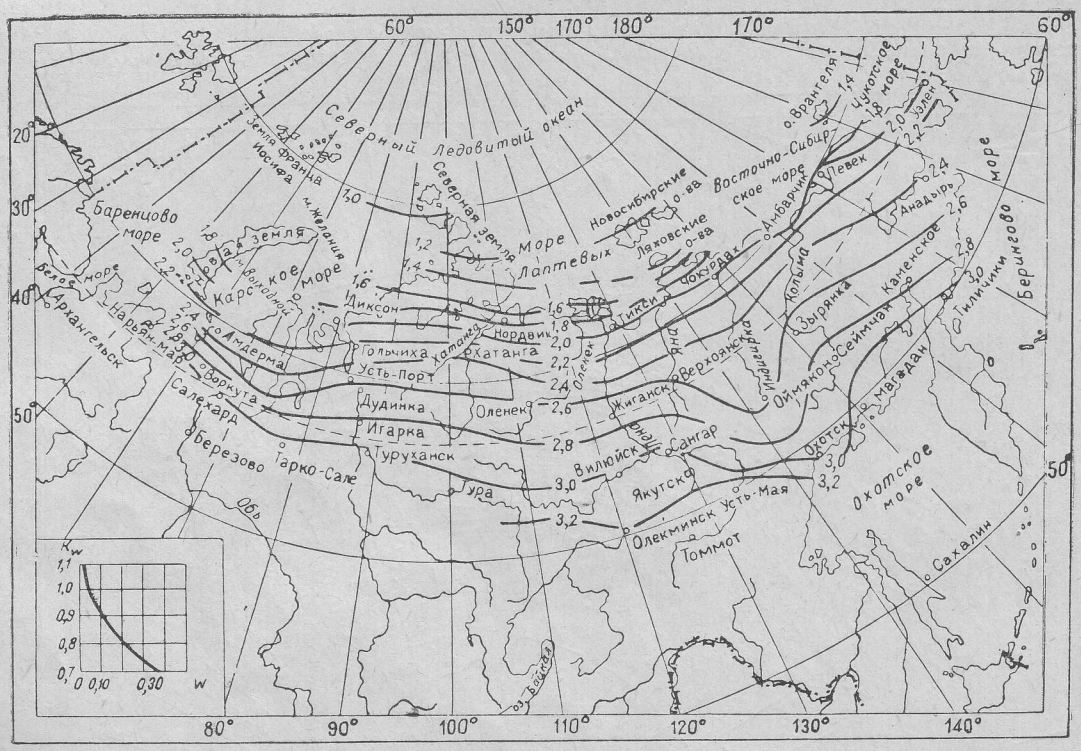
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. **Изолинии тем**



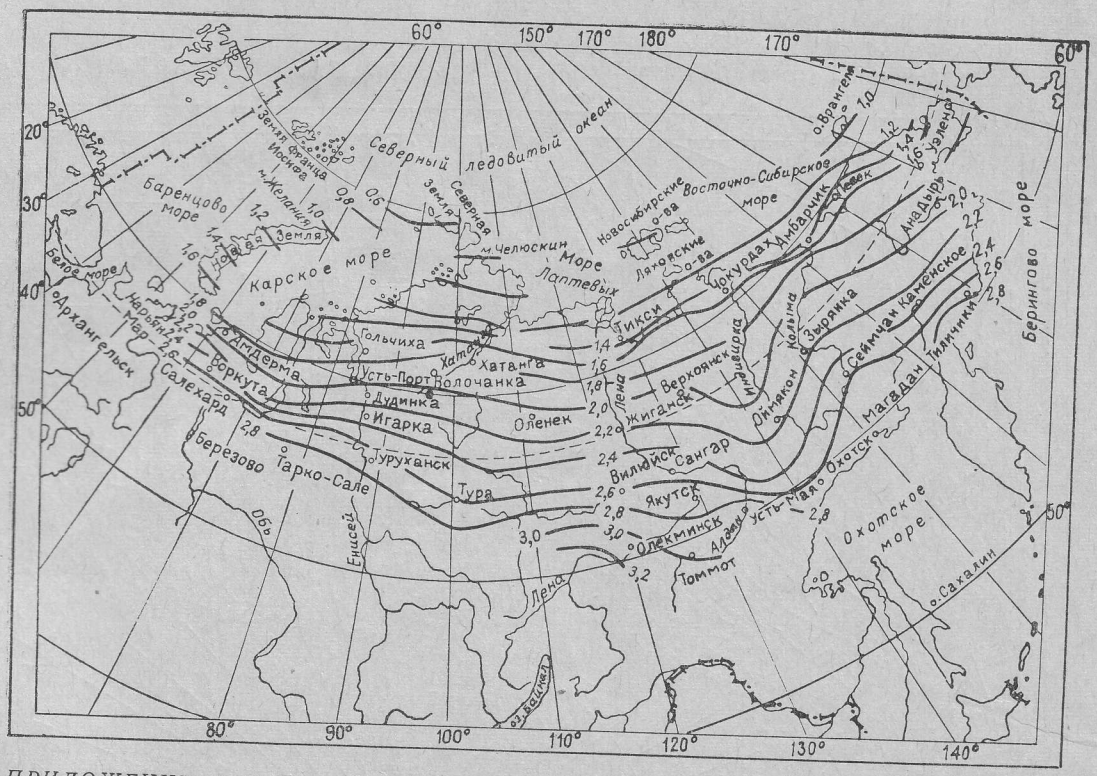
пературы грунта на глубине 10 *м*



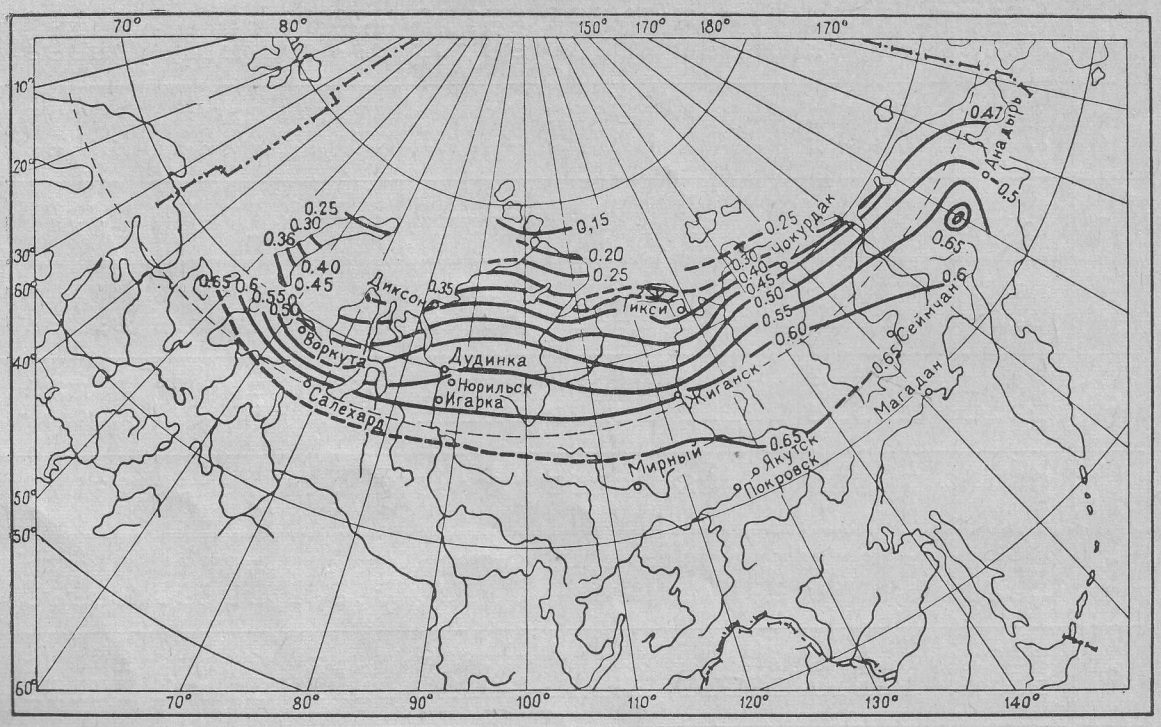
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. **Карта глубины сезонного оттаивания глинистых грунтов при влажности 15%**



ПРИЛОЖЕНИЕ 3. **Карта глубины сезонного оттаивания песчаных грунтов при влажности 5%**



ПРИЛОЖЕНИЕ 4. **Карта глубины сезонного оттаивания песчаных грунтов при влажности 5%, подстилаемых глинистыми грунтами**



ПРИЛОЖЕНИЕ 5. **Карта глубины сезонного оттаивания органических грунтов и мохо-растительного слоя**

Значения экспоненциальных функций

$\exp x = e^x$ и $\exp(-x) = e^{-x}$

x	e^x	e^{-x}	x	e^x	e^{-x}	x	e^x	e^{-x}
0,00	1,000	1,000	0,45	1,568	0,638	0,90	2,460	0,407
01	1,010	0,990	46	1,584	0,631	91	2,484	0,403
02	1,020	0,980	47	1,600	0,625	92	2,509	0,399
03	1,031	0,970	48	1,616	0,619	93	2,535	0,395
04	1,041	0,961	49	1,632	0,613	94	2,560	0,391
0,05	1,051	0,951	0,50	1,649	0,607	0,95	2,586	0,387
06	1,062	0,942	51	1,665	0,601	96	2,612	0,383
07	1,073	0,932	52	1,682	0,595	97	2,638	0,379
08	1,083	0,923	53	1,699	0,589	98	2,665	0,375
09	1,094	0,914	54	1,716	0,583	99	2,691	0,372
0,10	1,105	0,905	0,55	1,773	0,577	1,00	2,718	0,368
11	1,116	0,896	56	1,751	0,571	01	2,746	0,364
12	1,128	0,887	57	1,768	0,566	02	2,773	0,361
13	1,139	0,878	58	1,786	0,560	03	2,801	0,357
14	1,150	0,869	59	1,804	0,554	04	2,829	0,354
0,15	1,162	0,861	0,60	1,822	0,549	1,05	2,858	0,350
16	1,174	0,852	61	1,840	0,543	06	2,886	0,347
17	1,185	0,844	62	1,859	0,538	07	2,915	0,343
18	1,197	0,835	63	1,878	0,533	08	2,945	0,340
19	1,209	0,827	64	1,897	0,527	09	2,974	0,336
0,20	1,221	0,819	0,65	1,916	0,522	1,10	3,004	0,333
21	1,234	0,811	66	1,935	0,517	11	3,034	0,330
22	1,246	0,803	67	1,954	0,512	12	3,065	0,326
23	1,259	0,795	68	1,974	0,507	13	3,096	0,323
24	1,271	0,787	69	1,994	0,502	14	3,127	0,320
0,25	1,284	0,779	0,70	2,014	0,497	1,15	3,158	0,317
26	1,297	0,771	71	2,034	0,492	16	3,190	0,314
27	1,310	0,763	72	2,054	0,487	17	3,222	0,310
28	1,321	0,756	73	2,075	0,482	18	3,254	0,307
29	1,336	0,748	74	2,096	0,477	19	3,287	0,304
0,30	1,350	0,741	0,75	2,117	0,472	1,20	3,320	0,301
31	1,363	0,733	76	2,138	0,468	21	3,354	0,298
32	1,377	0,726	77	2,160	0,463	22	3,387	0,295
33	1,391	0,719	78	2,182	0,458	23	3,421	0,292
34	1,405	0,712	79	2,203	0,454	24	3,456	0,289
0,35	1,419	0,705	0,80	2,226	0,449	1,25	3,490	0,287
36	1,433	0,698	81	2,248	0,445	26	3,525	0,284
37	1,448	0,691	82	2,271	0,440	27	3,561	0,281
38	1,462	0,684	83	2,293	0,436	28	3,597	0,279
39	1,477	0,677	84	2,316	0,432	29	3,633	0,275
0,40	1,492	0,670	0,85	2,340	0,427	1,30	3,669	0,273
41	1,507	0,664	86	2,363	0,423	31	3,706	0,270
42	1,522	0,657	87	2,387	0,419	32	3,743	0,267
43	1,537	0,651	88	2,411	0,415	33	3,781	0,265
44	1,553	0,644	89	2,435	0,411	34	3,819	0,262

x	e^x	e^{-x}	x	e^x	e^{-x}	x	e^x	e^{-x}
1,35	3,857	0,259	1,80	6,050	0,165	2,25	9,488	0,105
36	3,896	0,257	81	6,110	0,164	26	9,583	0,104
37	3,935	0,254	82	6,172	0,162	27	9,679	0,103
38	3,975	0,252	83	6,234	0,160	28	9,777	0,102
39	4,015	0,249	84	6,297	0,159	29	9,875	0,101
1,40	4,055	0,247	1,85	6,360	0,157	2,30	9,974	0,100
41	4,096	0,244	86	6,424	0,156	31	10,07	0,099
42	4,137	0,242	87	6,488	0,154	32	10,18	0,0983
43	4,179	0,239	88	6,554	0,153	33	10,28	0,0973
44	4,221	0,237	89	6,619	0,151	34	10,38	0,0963
1,45	4,263	0,235	1,90	6,686	0,150	2,35	10,49	0,0954
46	4,306	0,232	91	6,753	0,148	36	10,59	0,0944
47	4,349	0,230	92	6,821	0,147	37	10,70	0,0935
48	4,393	0,228	93	6,890	0,145	38	10,81	0,0926
49	4,437	0,225	94	6,959	0,144	39	10,92	0,0916
1,50	4,482	0,223	1,95	7,029	0,142	2,40	11,02	0,0907
51	4,527	0,221	96	7,099	0,141	41	11,13	0,0898
52	4,572	0,219	97	7,171	0,140	42	11,25	0,0889
53	4,618	0,217	98	7,243	0,138	43	11,36	0,0880
54	4,665	0,214	99	7,316	0,137	44	11,47	0,0872
1,55	4,712	0,212	2,00	7,389	0,135	2,45	11,59	0,0863
56	4,759	0,210	01	7,463	0,134	46	11,71	0,0854
57	4,807	0,208	02	7,538	0,133	47	11,82	0,0846
58	4,855	0,206	03	7,614	0,131	48	11,94	0,0837
59	4,904	0,204	04	7,691	0,130	49	12,06	0,0829
1,60	4,953	0,202	2,05	7,768	0,129	2,50	12,18	0,0821
61	5,003	0,200	06	7,846	0,128	51	12,31	0,0813
62	5,053	0,198	07	7,925	0,126	52	12,43	0,0805
63	5,104	0,196	08	8,005	0,125	53	12,55	0,0797
64	5,155	0,194	09	8,085	0,124	54	12,68	0,0789
1,65	5,207	0,192	2,10	8,166	0,123	2,55	12,81	0,0781
66	5,259	0,190	11	8,248	0,121	56	12,94	0,0773
67	5,312	0,188	12	8,331	0,120	57	13,07	0,0765
68	5,366	0,186	13	8,415	0,119	58	13,20	0,0758
69	5,420	0,185	14	8,499	0,118	59	13,33	0,0750
1,70	5,474	0,183	2,15	8,585	0,117	2,60	13,46	0,0743
71	5,529	0,181	16	8,671	0,115	61	13,60	0,0735
72	5,585	0,179	17	8,758	0,114	62	13,74	0,0728
73	5,641	0,177	18	8,846	0,113	63	13,87	0,0721
74	5,697	0,176	19	8,935	0,112	64	14,01	0,0714
1,75	5,755	0,174	2,20	9,025	0,111	2,65	14,15	0,0707
76	5,812	0,172	21	9,116	0,110	66	14,30	0,0700
77	5,871	0,170	22	9,207	0,109	67	14,44	0,0693
78	5,930	0,169	23	9,300	0,108	68	14,59	0,0686
79	5,990	0,167	24	9,393	0,107	69	14,73	0,0679

Продолжение

x	e^x	e^{-x}	x	e^x	e^{-x}	x	e^x	e^{-x}
2,70	14,88	0,0672	3,15	23,34	0,0429	3,60	36,60	0,0273
71	15,03	0,0665	16	23,57	0,0424	61	36,97	0,0271
72	15,18	0,0659	17	23,81	0,0420	62	37,34	0,0268
73	15,33	0,0652	18	24,05	0,0416	63	37,71	0,0265
74	15,49	0,0646	19	24,29	0,0412	64	38,09	0,0263
2,75	15,64	0,0639	3,20	24,53	0,0408	3,65	38,48	0,0260
76	15,80	0,0633	21	24,78	0,0404	66	38,86	0,0257
77	15,96	0,0627	22	25,03	0,0400	67	39,25	0,0255
78	16,12	0,0620	23	25,28	0,0396	68	39,65	0,0252
79	16,28	0,0614	24	25,53	0 0392	69	40,05	0,0250
2,80	16,45	0,0608	3,25	25,79	0,0388	3,70	40,45	0,0247
81	16,61	0,0602	26	26,05	0,0384	71	40,85	0,0245
82	16,78	0,0596	27	26,31	0,0380	72	41,26	0,0242
83	16,95	0,0590	28	26,58	0,0376	73	41,68	0,0240
84	17,12	0,0584	29	26,84	0,0373	74	42,10	0,0238
2,85	17,29	0,0578	3,30	27,11	0,0369	3,75	42,52	0,0235
86	17,46	0,0573	31	27,39	0,0365	76	42,95	0,0233
87	17,64	0,0567	32	27,66	0,0362	77	43,38	0,0231
88	17,81	0,0561	33	27,94	0,0358	78	43,82	0,0228
89	17,99	0,0556	34	28,22	0,0354	79	44,26	0,0226
2,90	18,17	0,0550	3,35	28,50	0,0351	3,80	44,70	0,0224
91	18,36	0,0545	36	28,79	0,0347	81	45,15	0,0222
92	18,54	0,0539	37	29,08	0,0344	82	45,60	0,0219
93	18,73	0,0534	38	29,37	0,0341	83	46,06	0,0217
94	18,92	0,0529	39	29,67	0,0337	84	46,53	0,0215
2,95	19,11	0,0523	3,40	29,96	0,0334	3,85	46,99	0,0213
96	19,30	0,0518	41	30,27	0,0330	86	47,47	0,0211
97	19,49	0,0513	42	30,57	0,0327	87	47,94	0,0209
98	19,69	0,0508	43	30,88	0,0324	88	48,42	0,0207
99	19,89	0,0503	44	31,19	0,0321	89	48,91	0,0205
3,00	20,09	0,0498	3,45	31,50	0,0318	3,90	49,40	0,0202
01	20,29	0,0493	46	31,82	0,0314	91	49,90	0,0200
02	20,49	0,0488	47	32,14	0,0311	92	50,40	0,0198
03	20,70	0,0483	48	32,46	0,0308	93	50,91	0,0196
04	20,91	0,0478	49	32,79	0,0305	94	51,42	0,0195
3,05	21,12	0,0474	3,50	33,12	0,0302	3,95	51,94	0,0193
06	21,33	0,0469	51	33,45	0,0299	96	52,46	0,0191
07	21,54	0,0464	52	33,78	0,0296	97	52,99	0,0189
08	21,76	0,0460	53	34,12	0,0293	98	53,52	0,0187
09	21,98	0,0455	54	34,47	0,0290	99	54,06	0,0185
3,10	22,20	0,0451	3,55	34,81	0,0287	4,00	54,60	0,0183
11	22,42	0,0446	56	35,16	0,0284	4,1	60,34	0,0166
12	22,65	0,0442	57	35,52	0,0282	4,2	66,69	0,0150
13	22,87	0,0437	58	35,87	0,0279	4,3	73,70	0,0136
14	23,10	0,0433	59	36,23	0,0276	4,4	81,45	0,0123

Продолжение

x	e^x	e^{-x}	x	e^x	e^{-x}	x	e^x	e^{-x}
4,5	90,02	0,0111	6,5	665,1	0,00150	8,5	4915	0,000203
4,6	99,48	0,0101	6,6	735,1	0,00136	8,6	5432	0,000184
4,7	110,0	0,00910	6,7	812,4	0,00123	8,7	6003	0,000167
4,8	121,5	0,00823	6,8	897,9	0,00111	8,8	6634	0,000151
4,9	134,3	0,00745	6,9	992,3	0,00101	8,9	7332	0,000136
5,0	148,4	0,00674	7,0	1097	0,000912	9,0	8103	0,000123
5,1	164,0	0,00610	7,1	1212	0,000825	9,1	8955	0,000112
5,2	181,3	0,00552	7,2	1339	0,000747	9,2	9897	0,000101
5,3	200,3	0,00499	7,3	1480	0,000677	9,3	10938	0,000091
5,4	221,4	0,00452	7,4	1636	0,000611	9,4	12088	0,000083
5,5	244,7	0,00409	7,5	1808	0,000553	9,5	13360	0,000075
5,6	270,4	0,00370	7,6	1998	0,000500	9,6	14765	0,000068
5,7	298,9	0,00335	7,7	2208	0,000453	9,7	16318	0,000061
5,8	330,3	0,00303	7,8	2441	0,000410	9,8	18034	0,000055
5,9	365,0	0,00274	7,9	2697	0,000371	9,9	19930	0,000050
6,0	403,4	0,00248	8,0	2981	0,000335	10,0	22026	0,000045
6,1	445,9	0,00224	8,1	3295	0,000304			
6,2	492,8	0,00203	8,2	3641	0,000275			
6,3	544,6	0,00184	8,3	4024	0,000249			
6,4	601,9	0,00166	8,4	4447	0,000225			

ОГЛАВЛЕНИЕ

Стр.

Глава первая

Общие сведения об инженерных коммуникациях на вечномерзлых грунтах

§ 1. Санитарно-техническое обеспечение населенных мест Крайнего Севера 3
§ 2. Способы прокладки инженерных коммуникаций 8
§ 3. Планировка населенных мест и инженерные коммуникации 11
§ 4. Способы прокладки магистральных трубопроводов . . . 19

Глава вторая

Конструкции санитарно-технических коммуникаций и магистральных трубопроводов

§ 5. Подземные трубопроводы 20
§ 6. Подземные санитарно-технические каналы 24
§ 7. Наземные и надземные трубопроводы 30
§ 8. Надземные каналы санитарно-технических сетей 33
§ 9. Прокладка трубопроводов под зданиями 35
§ 10. Магистральные трубопроводы 37
§ 11. Промежуточные и мертвые опоры 42
§ 12. Колодцы, камеры управления, компенсаторные ниши . . 44
§ 13. Резервуары для сбора сточных вод 49
§ 14. Вводы санитарно-технических коммуникаций в здания и домовые канализационные выпуски 52
§ 15. Электрический обогрев трубопроводов 58

Глава третья

Исходные данные для расчета конструкций

§ 16. Методы расчета при проектировании инженерных коммуникаций 63
§ 17. Исходные данные для инженерных расчетов 65
§ 18. Расчет сезонного оттаивания и промерзания грунтов . . . 70
§ 19. Расчетная температура грунта 73

Глава четвертая

Тепловые расчеты

§ 20. Теплопотери трубопроводов и каналов при надземной прокладке 78
§ 21. Теплопотери трубопроводов при подземной прокладке . . 80
§ 22. Теплопотери в подземных каналах 82
§ 23. Теплопотери трубопроводов, уложенных в насыпи . . . 85
§ 24. Расчетная температура жидкостей в трубопроводах . . 92
§ 25. Остывание жидкостей и газов в трубопроводах 93
§ 26. Падение температуры в подземных трубопроводах . . . 97
§ 27. Падение температуры в трубопроводах, уложенных в насыпи 98
§ 28. Остывание жидкости в трубопроводе при отсутствии течения 105
§ 29. Расчет теплоизоляции водоводов 108
§ 30. Расчет теплоизоляции канализационных выпусков . . . 111
§ 31. Сброс водопроводной воды в канализацию 113
§ 32. Расчет теплового сопровождения . . . . . —
§ 33. Расчет электрического обогрева трубопроводов 117

Глава пятая

Расчет опор и оснований инженерных коммуникаций

§ 34. Температурное поле обогрева грунта вокруг трубы или канала 122
§ 35. Глубина оттаивания мерзлого грунта под подземной трубой 124
§ 36. Глубина оттаивания грунтов под подземными каналами 127
§ 37. Глубина оттаивания грунта под насыпью, в которой уложен трубопровод 129
§ 38. Оттаивание грунтов в основании газопроводов большого диаметра 131
§ 39. Влияние подземных трубопроводов на устойчивость близрасположенных зданий 135
§ 40. Глубина оттаивания грунта под подземными каналами при нестационарном температурном режиме 137
§ 41. Замена грунта в основании трубопроводов и каналов . . 143
§ 42. Расчет пульсирующих опор 147
§ 43. Расчет свайных опор инженерных коммуникаций 151
§ 44. Расчет свайных мертвых опор 155

Приложения 1—6 164

Александр Леонидович Ястребов

Инженерные коммуникации на вечномерзлых грунтах

Стройиздат, Ленинградское отделение
Ленинград, пл. Островского, 6

Редактор *Л. В. Ассовская*
Художественный и технический редактор *Н. М. Орехова*
Корректор *Н. Г. Семина*
Обложка художника *М. А. Бычкова*

Сдано в набор 18/XI 1971 г. Подписано к печати 6/V 1972 г. М-13941.
Формат 60 × 90¹/₁₆ бум. № 2. Бум. л. 5,5. Печ. л. 11,0. Уч.-изд. л. 11,31. Изд. № 1294-Л. Тираж 5 200 экз. Цена 57 коп.
Заказ № 1352.

Ленинградская типография № 2 имени Евгении Соколовой Главполиграфпрома Комитета по печати при Совете Министров СССР, Измайловский проспект, 29.

ОПЕЧАТКИ

Страница	Строка	Напечатано	Следует читать
76	2-я снизу	$^{II}_{п} =$	$t^{II}_{п} =$
	10-я »	$^{II}_{z=0} =$	$t^{II}_{z=0} =$
78	8-я »	теплопередачи	теплоотдачи
81	Ф-ла (23)	$+\sqrt{\frac{4h^2}{d_2^2}-1}\Big)$	$+\sqrt{\frac{4h^2}{d_2^2}-1}\Big)$
108	20-я снизу	$\tau_{ост} = \text{——}$	$\tau_{ост} = - \text{——}$
115	2-я »	$d_2 =$	$\alpha'_2 =$
149	18-я сверху	по формуле (122)	по формуле (110)
	1-я снизу	$S'' = k_W S =$	$S'' = k_w S =$
170	Графа 5 11-я сверху	1,773	1,733

Заказ 1352