

doi: 10.5862/MCE.55.4

Метод промораживания грунта естественным холодом для защиты котлована от грунтовых вод

*К.т.н., начальник мерзлотной станции С.А. Гулый,
Северо-Восточная научно-исследовательская мерзлотная станция
Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН*

Аннотация. Строительство в условиях, когда отметка дна котлована находится ниже отметки уровня подземных вод, требует проведения специальных работ по водопонижению. Как правило, они обходятся крайне дорого. Чтобы снизить стоимость работ по водопонижению на территориях со стабильно низкими температурами воздуха, предлагается разработку котлована вести в зимнее время. По аналогии с гидротехническими сооружениями, возводимыми на Крайнем Севере, промораживание грунта естественным холодом позволит создать водонепроницаемый ледогрунтовый экран, который предотвратит подтопление котлована.

В статье изложена последовательность работ при промораживании грунта и методика, предназначенная для прогнозирования термического состояния грунтового противофильтрационного элемента при сезонном строительстве в г. Магадане. Расчетами обоснованы условия, при которых возможно появление наледи в котловане при создании ледогрунтового экрана, предложен простой метод борьбы с наледью с помощью снега.

Результаты работы могут быть использованы при строительстве в районах с экстремальными климатическими условиями.

Ключевые слова: котлован; грунтовые воды; ледопородный экран; промерзание; снежный покров; наледь

Введение

Город Магадан расположен на территории островного распространения вечномерзлых грунтов, где талые грунты чередуются с мерзлыми с температурой $-0,1...-0,3$ °С. Используется второй принцип строительства на вечномерзлых грунтах. Он допускает возможность оттаивания мерзлых грунтов в процессе строительства и эксплуатации. Основной вид фундамента, используемый в Магадане, – свайный [1, 2]. Использование свайных фундаментов связано с тем, что глубина залегания мерзлых пород небольшая – до 20 м, в основном она составляет 10–15 м. Поэтому сваи могут прорезать мерзлые грунты, которые при оттаивании дают сверхнормативные осадки, и опираться на надежные талые грунты [3]. В период начального освоения города, в 1930–1950-х гг., когда свайные фундаменты еще не применялись, глубина заложения фундаментов первых 4-этажных зданий из-за необходимости прохождения просадочных мерзлых грунтов была сопоставима с высотой здания и составляла 9–12 м.

Проблем с возведением фундаментов на участках, где распространены талые грунты, в Магадане никогда не возникало. В этом случае применялись столбчатые и ленточные фундаменты.

При необходимости строительства зданий и сооружений в талых водонасыщенных аллювиальных галечниковых отложениях р. Магаданки использовались свайные фундаменты. Если здание проектировалось с подвалом, то отметку дна котлована подбирали на такой глубине, чтобы она заведомо была выше уровня грунтовых вод. При этом работы нулевого цикла старались начать в зимнее время и закончить к весне при минимальном уровне грунтовых вод.

В 2014 г. на территории города возникла необходимость возведения торгово-развлекательного центра «Мегамаг». Особенность этого объекта в том, что он расположен непосредственно около р. Магаданки и имеет большие размеры в плане (80х100 м). При глубине заложения фундамента 5,75 м отметка дна котлована 28,2 находится ниже отметки максимального уровня подземных вод 31,5.

Исходя из этого было принято решение разработать систему, которая обеспечит недопущение попадания грунтовых вод в котлован. Перед разработкой проекта водопонижения на месте предполагаемого строительства были проведены гидрогеологические исследования с пробными кустовыми откачками.

Так как в окончательном варианте работы по возведению фундамента намечалось провести в течение летнего периода, то было принято решение запроектировать систему водопонижения в

Гулый С.А. Метод промораживания грунта естественным холодом для защиты котлована от грунтовых вод

котловане с помощью водопонизительных скважин. Затраты на ее проектирование и сооружение составили 12 миллионов рублей. Испытание водопонизительной системы выполнялось после прохождения катастрофического паводка, вызвавшего наводнение на прибрежной территории Охотского моря в районе Магадана в июле 2014 г. В этот момент котлован, ранее откопанный до отметки естественного уровня грунтовых вод (29,5), был затоплен до отметки 32,0. Запуск водопонизительной системы позволил не только полностью осушить котлован, но и провести его разработку на требуемую по проекту глубину.

Закончить работы по устройству фундаментов к началу зимы не удалось. С наступлением отрицательных температур воздуха насосное оборудование и коммуникации водопонизительной системы были утеплены и продолжали работать. Однако в связи с тем, что система не была запроектирована для зимних условий работы, оборудование начало периодически выходить из строя. В связи с этим возник вопрос: произойдет ли в зимнее время затопление котлована (полностью или частично), если система водопонизительных скважин выйдет из строя, а если это произойдет – можно ли будет уберечь котлован от затопления и каким образом это сделать?

Обзор литературы и постановка проблемы

Известно, что лед и мерзлый грунт непроницаемы для воды. В конце XIX – начале XX века это свойство широко использовалось в строительстве, энергетике и горном деле для создания естественным или искусственным способом водозащитных перемычек изо льда и мерзлого грунта [4, 5]. В связи с совершенствованием холодильной техники при замораживании грунтов для сооружения фундаментов и сохранения зданий от разрушений, строительстве канализационных сооружений, тоннелей и вестибюлей метро, гидротехнических сооружений, при археологических раскопках и др. предпочтение стало отдаваться искусственному способу замораживания. Теоретические исследования и результаты практического использования метода по искусственному замораживанию грунтов в СССР в 1950–1970-х гг. приводятся в работах Н.Г. Трупака [6, 7, 8]. Не утрачен интерес к этому способу и в настоящее время. Современный опыт применения замораживания для обеспечения надежности и водонепроницаемости грунтов при строительстве платформы и тоннелей эскалаторов на станции метро в Неаполе описан в работе [9]. Представляют интерес исследования по искусственному замораживанию грунтов в Шанхае при строительстве тоннелей, выполненные в 2008 г. на основе трехмерного моделирования [10], а также обеспечение устойчивости грунтов при их замораживании с использованием тепловых насосов [11, 12].

Не утратил своей актуальности и способ, основанный на применении естественного холода. При этом одна часть специалистов использует его для сохранения статической устойчивости сооружений [13, 14], другая – с помощью естественного замораживания грунта в условиях криолитозоны обеспечивает фильтрационную надежность гидротехнических сооружений. Этим исследованиям посвящены работы Р.В. Чжана [15], Man Gaofeng и др. [16], A.B. Feringer [17, 18], A.M. Сухно [19], A.M. Tsvik и др. [20].

Освоение северных территорий России вызывает необходимость продолжения исследований по созданию мерзлотных противофильтрационных завес в криолитозоне именно с использованием естественного холода [21]. По мнению Г.М. Долгих и др. [22, 23], С.П. Дмитриевой и др. [24], Р.В. Чжана [25], в суровых климатических условиях ледяные и ледогрунтовые противофильтрационные экраны при правильном их расчете, изготовлении и содержании более экономичны и надежны по сравнению с традиционными конструкциями из бетона и полимеров.

А.С. Курилко [26] на основании выполненных расчетов отмечает, что формирование устойчивого мерзлого ледопородного экрана способно полностью предотвратить фильтрацию поверхностных вод и атмосферных осадков в подкарьерный рудный целик.

Интерес к сооружению ледогрунтовых защитных экранов, изготавливаемых для обеспечения фильтрационной надежности гидротехнических сооружений, не исчез в нашей стране и в последние годы. Об этом свидетельствует большое количество патентов, выдаваемых в РФ в этой области [27–29].

Что касается конкретного способа по созданию водонепроницаемого мерзлого экрана в строительстве для защиты котлованов от подтопления грунтовыми водами с помощью естественного холода, то в настоящее время есть только общие предложения по его применению, высказанные в работе [21] и специальной нормативной литературе [30]. Ссылки на методики расчета вообще отсутствуют. Несмотря на это, мы попытались обосновать возможность его применения в наших условиях.

В работе Н.Г. Трупака [6] есть подробное описание технологии создания ледяных водонепроницаемых оболочек с помощью естественного послойного промораживания воды при проходке ствола шахты, находящегося в русле реки. Суть этой технологии заключается в следующем. После того, как река покрывалась льдом, в нем вырубали углубление с поперечными размерами, равными размерам будущего ствола. Лед вырубался с таким расчетом, чтобы его толщина не превышала 5–10 см. Лед такой толщины позволял не только безопасно вести на нем работы, но и создавал благоприятные условия для очень быстрого нарастания нового слоя льда под контурами ствола, так как обладал большой теплопроводностью. После промерзания этого слоя опять делалось углубление во льду, что давало возможность для промерзания следующего слоя. По мере углубления ствола не только увеличивался слой льда по вертикали, но и росла толщина ледяной стенки по горизонтали, что защищало ствол от проточной воды. Нарастание новых слоев льда происходило тем быстрее, чем ниже была температура воздуха и чем более часто и более тонкими слоями снимали лед. На конечном этапе лед смерзался с дном реки. После удаления последнего слоя льда проходка ствола производилась в грунте, который также предварительно промораживался. Чтобы замораживание шло быстрее, снежный покров с поверхности льда рекомендовалось постоянно удалять. Как видно из описания, этот способ не только прост в исполнении и надежен, но и, что немаловажно, не требует больших капитальных затрат для его реализации.

Исходя из того, что даже в реке зимой можно создать водонепроницаемый мерзлый экран с поверхности реки до ее дна, было высказано предположение, что также можно проморозить естественным холодом и грунт в основании котлована и его бортов, создав водонепроницаемый для грунтовых вод экран. Расчет глубины и времени промерзания грунта выполнялся с использованием известных в мерзлотоведении зависимостей [31]. При этом также учитывалось, что наличие водоупора на небольшой от дна котлована глубине в случае полного перемерзания водопроницаемого слоя может привести к появлению наледи. Негативное влияние этого явления отмечалось в работах [32, 33].

Кроме того, при выполнении расчетов учитывалось, что на глубину промерзания грунта, как уже указывалось выше, оказывает влияние наличие или отсутствие снежного покрова. Неучет этого может снизить достоверность получаемых результатов. Вопросы влияния снега на глубину промерзания хорошо изучены А.В. Павловым [34], С.П. Луговым. [35]. Из работ, опубликованных в последние годы, представляют интерес исследования, выполненные И.Л. Хабибуллиным и М.В. Солдаткиным [36], которые выявили, что «чем больше высота снежного покрова, тем медленнее идет процесс промерзания СТС и больше вероятность образования несливающейся мерзлоты». Из современных зарубежных исследований, выполненных на эту тему, следует выделить работу китайских ученых [37], изучавших в течение трех лет – с 2010 г. по 2012 г. – в районе Цинхай-Тибетского нагорья температуру и влажность грунтов деятельного слоя в зависимости от мощности снежного покрова.

В настоящем исследовании были поставлены следующие задачи:

- определить, за какое время и на какую максимальную глубину могут промерзнуть грунты основания и борта котлована в мерзлотно-климатических условиях Магадана;
- выявить предпосылки появления наледи в котловане и предложить методы борьбы с ней;
- оценить целесообразность практического применения в строительстве водонепроницаемых для грунтовых вод оболочек, создаваемых за счет естественного холода.

Исходные данные и методика исследований

Гидрогеологические и климатические условия территории строительства

В геоморфологическом плане территория строительства, на которой запроектирован торгово-развлекательный комплекс «Мегамаг», расположена в северной части Магаданской впадины, прилегающей к нижнему течению р. Магаданки. Площадь впадины около 24 км², абсолютные отметки поверхности от 0 до 35 м. Так как площадка строительства находится в пределах первой надпойменной левобережной террасы реки в 50 м от ее русла, то еще до проведения гидрогеологических исследований можно было предположить негативное влияние поверхностных вод р. Магаданки на грунтовые воды рассматриваемого объекта.

В результате проведенных гидрогеологических исследований с пробными кустовыми откачками было получено, что гидрогеологические условия участка характеризуются наличием грунтовых вод, уровень которых располагается на глубине 2,5–4,0 м от поверхности земли, что

Гулый С.А. Метод промораживания грунта естественным холодом для защиты котлована от грунтовых вод

выше проектируемой подошвы котлована на 1,2–2,7 м (в зависимости от гипсометрической отметки и сезона года). Разрез первого от поверхности земли водоносного подразделения представлен гравийно-галечниковыми отложениями с песчаным заполнителем, в нижней части встречаются линзы песка пылеватого. Мощность водоносных отложений от 2,0 до 8,0 м. В подошве первого от поверхности водоносного комплекса современных аллювиальных отложений и дельтовых отложений плиоценового возраста залегает относительный водоупор мощностью от 8,0 до 20,0 м, представленный суглинком с редкими включениями гравия и гальки (рис. 1).

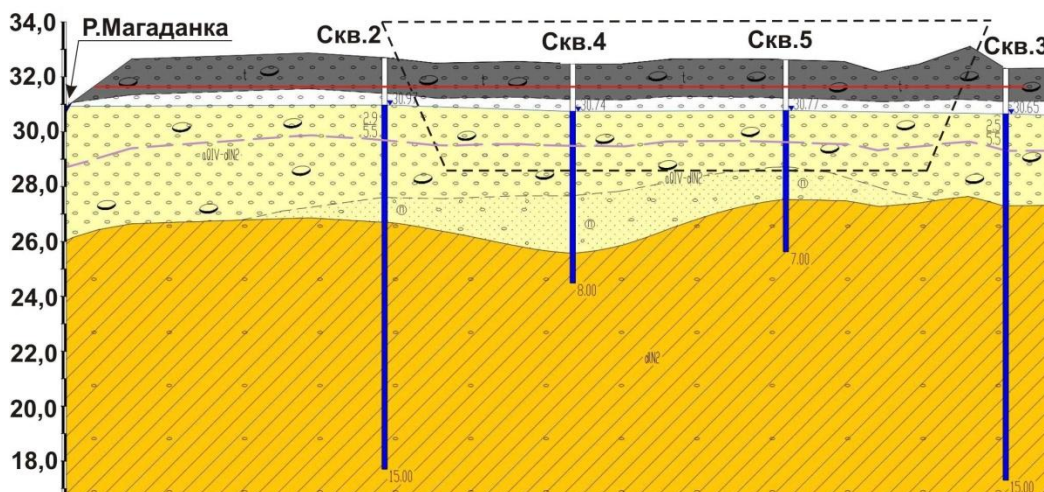


Рисунок 1. Геологический разрез объекта «Мегамаг» в Магадане. Черной пунктирной линией обозначены параметры котлована. Красная линия – максимальный вероятный уровень грунтовых вод (абсолютная отм. 31,5). Сиреневая линия – отметка, на которой были вскрыты грунтовые воды в период изысканий

Взаимосвязь грунтовых вод с нижележащим водоносным комплексом неогеновых пород практически отсутствует. Установлена тесная взаимосвязь между грунтовыми водами в пределах исследуемого объекта и поверхностными водами р. Магаданки. Фильтрационные параметры водовмещающих пород на участке определены по результатам кустовых откачек из скважин №1, 2 (рис. 2). Средний уклон потока подземных вод соответствует уклону водной поверхности р. Магаданки и равен 0,006. Водообильность водоносного комплекса современных аллювиальных отложений и дельтовых отложений плиоценового возраста характеризуется коэффициентом фильтрации $K_{\phi} = 90$ м/сут. Многолетнемерзлые породы в пределах участка изысканий обнаружены не были.

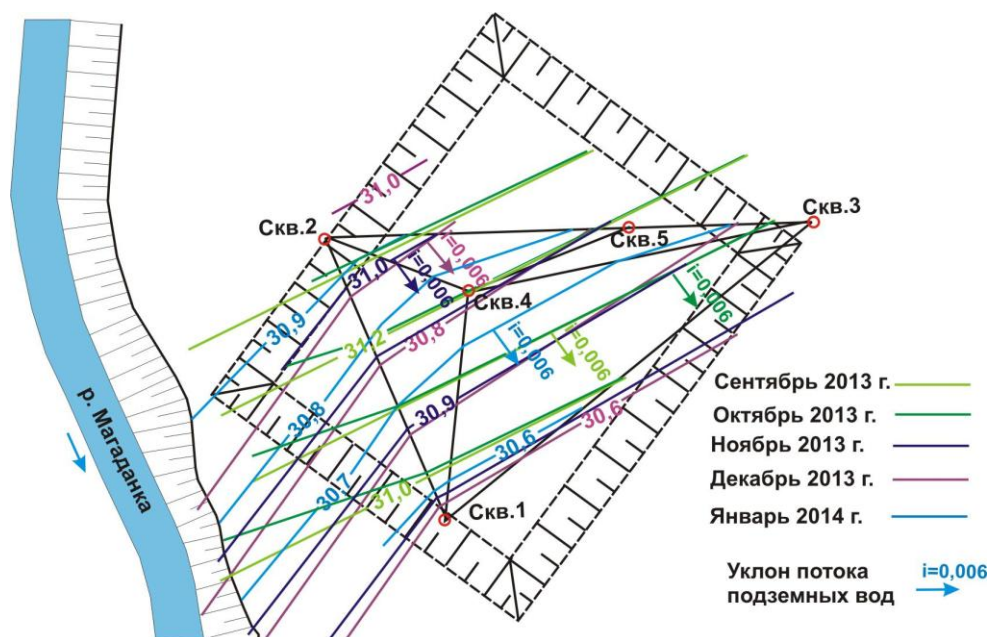


Рисунок 2. Направление потока подземных вод в разные периоды наблюдений

Климатические условия района складываются под воздействием муссонных ветров, характерных для прибрежной полосы Охотского моря.

В Магадане средняя продолжительность периода с отрицательной среднесуточной температурой воздуха составляет 7 месяцев (с 11 октября по 9 мая) или 214 дней, а с положительной – 151 день. Среднегодовая температура воздуха составляет $-3,8^{\circ}\text{C}$.

Наиболее холодные месяцы – январь, февраль. Средние температуры воздуха в этот период держатся около -20°C . В период отрицательных температур средняя температура воздуха составляет $-11,5^{\circ}\text{C}$ (таблица 1).

Таблица 1. Средние месячные значения температуры воздуха ($^{\circ}\text{C}$) по данным метеостанции Нагаево (г. Магадан) [38]

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
-17,0	-16,0	-12,6	-5,7	1,3	6,6	11,2	11,5	7,1	-2,4	-11,4	-15,0

Осадки в течение года распределяются неравномерно. В теплый период их количество в 4 раза больше, чем в холодный.

Снежный покров оказывает существенное влияние на формирование климата в зимние месяцы. Он появляется в среднем 10 октября, а к концу октября уже находится в устойчивом состоянии. Полный сход снежного покрова приурочен к третьей декаде мая. В среднем число дней под снежным покровом составляет 208 дней.

Высота снежного покрова заметно увеличивается только до конца ноября, а затем в течение всей зимы остается почти постоянной (таблица 2). Средняя плотность снежного покрова при наибольшей декадной высоте равна $0,26\text{ г/см}^3$. Разрушение устойчивого снежного покрова (с обеспеченностью 50 %) может продолжаться до 13 мая, средняя дата приходится на 12 мая.

Таблица 2. Средняя за месяц высота снежного покрова (см) по данным метеостанции Нагаево (г. Магадан) [38]

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
21	19	18	15	3	-	-	-	-	5	18	21

Методика расчетов

Расчеты глубины промерзания грунтов с учетом и без учета утепляющего воздействия снежного покрова выполнялись по аналитической формуле (1) В.С. Лукьянова [39]. Этот способ не столь точен по сравнению с численными методами, но для инженерных расчетов ему стоит отдать предпочтение, так как формула легко преобразуется и позволяет быстро определять различные неизвестные параметры при известных исходных данных. Влияние фильтрации из-за маленькой скорости движения грунтовых вод не учитывалось. Было принято, что теплопередача осуществляется только за счет кондуктивного теплообмена.

$$h = \sqrt{\frac{2\lambda\theta\tau}{C\theta} + S^2} + S, \quad (1)$$

где λ – коэффициент теплопроводности мерзлого грунта, $\lambda = 1,8\text{ ккал/м}\cdot\text{ч}\cdot\text{град}$;

Q – количество скрытой теплоты плавления льда в единице объема, $Q = 13600\text{ ккал/м}^3$;

θ – разность средней температуры воздуха в зимний период и температуры промерзания грунта, $^{\circ}\text{C}$;

C – объемная теплоемкость грунта, $C = 425\text{ ккал/м}^3\cdot\text{град}$;

τ – время воздействия на грунт воздуха с отрицательной температурой, ч;

S – условная толщина мерзлого грунта, учитывающая теплофизические характеристики изоляции на поверхности грунта:

$$S = \lambda \frac{H_c}{\lambda_c}, \quad (2)$$

где H_c – толщина снежного покрова или мерзлого грунта, м;

λ_c – коэффициент теплопроводности теплоизоляционного слоя (для снега $\lambda_c = 0,3$ ккал/м·ч·град., для мерзлого грунта $\lambda_c = 1,8$ ккал/м·ч·град).

Результаты

Основываясь на методике, описанной в [6], для предохранения котлована торгово-развлекательного комплекса «Мегамаг» от попадания в него грунтовых вод одновременно с вариантом водопонижения с помощью водопонизительных скважин был предложен вариант естественной промерозки основания, позволяющий в зимний период создать в грунте мерзлую водонепроницаемую оболочку. Работы предполагалось выполнять в последовательности, аналогичной методике естественного послойного промораживания воды при проходке ствола шахты, находящегося в русле реки. При положительных температурах воздуха выемка грунта из котлована ведется до отметки, не превышающей отметку залегания грунтовых вод. С наступлением отрицательных температур воздуха грунту в котловане первоначально дается возможность промерзнуть на глубину 0,4–0,5 м. Далее ведется послойная срезка мерзлого грунта с помощью бульдозера на глубину 0,1–0,2 м и его промораживание с таким расчетом, чтобы ниже отметки дна котлована все время оставался слой мерзлого грунта толщиной не более 0,2–0,3 м. Предполагается, что именно этот мерзлый экран и предотвратит попадание грунтовых вод в котлован. Таким образом, последовательно промораживая грунт и делая его небольшую срезку можно, сохраняя ложе котлована в водонепроницаемом состоянии, углубиться до проектной отметки, находящейся ниже отметки грунтовых вод.

Расчет по формуле (1) показал, что с учетом действующих в Магадане температур (таблица 1) в зимнее время (в ноябре–марте, когда средняя температура воздуха составляет $-13,2$ °С) можно выкопать котлован на глубину 5,75 м, не допуская попадания в него грунтовых вод, менее чем за 1 месяц. В расчетах принималось, что на промораживаемой поверхности полностью отсутствует снеговой покров, а толщина мерзлого грунта при разработке котлована постоянно не превышает 0,2 м. К сожалению, из-за того, что сроки возведения фундаменты были установлены на летнее время, указанный выше метод не был использован на практике.

Следует отметить, что эффективность применения этого способа напрямую зависит не только от средней температуры атмосферного воздуха, но и от отклонений от средней температуры. Если сравнить среднюю максимальную температуру воздуха в Магадане со средней температурой воздуха в рассматриваемые месяцы по [38], то окажется, что она выше всего на 2,4–3,7 °С. Это гарантирует то, что промораживание грунтов котлована в этих условиях обязательно произойдет. А вот в таких городах, например, как Москва или Санкт-Петербург, где очень часто зимой бывают резкие перепады температуры воздуха, во время которых периоды с отрицательной температурой могут смениться оттепелью, не стоит рассчитывать на естественный холод при промораживании котлованов.

Теперь рассмотрим случай, что произойдет, если водопонизительная система скважин в зимнее время выйдет из строя. Определим время, за которое может промерзнуть грунт при различной температуре воздуха и толщине снежного покрова. Для расчета воспользуемся той же формулой (1), только неизвестным в данном случае будет время. Результаты расчетов представлены в таблице 3.

Таблица 3. Время (ч) промерзания грунта в зависимости от толщины снежного покрова и температуры атмосферного воздуха для Магадана

Глубина промерзания, м	Толщина снежного покрова, м											
	0				0,1				0,2			
	Температура, °С											
	-3,0	-5,0	-7,0	-10,0	-3,0	-5,0	-7,0	-10,0	-3,0	-5,0	-7,0	-10,0
0,05	10	6	4	3	89	55	40	29	168	104	76	56
0,1	40	24	18	13	198	122	90	66	356	220	162	118
0,15	89	55	40	29	326	202	148	108	564	348	256	187
0,2	158	98	72	52	475	293	216	157	791	489	369	262

Анализ полученных результатов показывает, что при отсутствии дополнительной теплоизоляции (в рассматриваемом случае – снега на поверхности грунта), можно создать водонепроницаемую оболочку из мерзлого грунта толщиной 5 см даже при среднесуточных температурах -3°C менее чем за одни сутки. Результаты расчетов были переданы производителям работ. Чтобы дополнительно снизить отепляющее влияние грунтовых вод, также было предложено выкопать по углам котлована приямки глубиной 1,0 м, из которых насосами частично удалялась вода. Комплекс этих мероприятий, а также то, что в период временного выхода из строя водопонижительной системы, продолжавшегося 7 суток, температура воздуха уже была ниже -10°C , а снежный покров практически отсутствовал, затопление котлована грунтовыми водами удалось предотвратить.

Так как в долине р. Магаданки, где находится котлован, часто появляются наледи, был сделан расчет вероятности ее появления и на рассматриваемом объекте. Расчеты глубины промерзания, выполненные по формуле (1), показали, что в бесснежную зиму грунт ниже отметки дна котлована промерзнет на 2,2 м, в снежную – на 1,8 м. В связи с тем, что водоупорный слой залегает на глубине 0,8–2,4 м от отметки дна котлована, есть вероятность того, что к концу зимы произойдет полное перемерзание водонепроницаемого слоя. В этом случае вода, не имея прохода для свободной фильтрации, будет стремиться выйти наружу через места с наименьшей глубиной промерзания грунта. Одним из таких мест может быть склад теплоизоляционных материалов, расположенный около котлована. При выходе на поверхность вода будет превращаться в наледь. Чтобы этого не произошло, производителям работ было предложено защитить грунт от промерзания на дне котлована с помощью обычного снега.

Расчеты по формуле (1) показали, что наличие на поверхности котлована снежного покрова толщиной всего 1,0 м позволит не допустить промерзания грунтов в зимний период (7 месяцев) на глубину более 1,0 м. Этого вполне достаточно, чтобы грунтовые воды могли свободно проходить через водоносные слои, а это, в свою очередь, предохранит котлован от появления в нем наледи.

Таким образом, для климатических условий Магадана доказана возможность применения метода создания водонепроницаемых оболочек из мерзлого грунта за счет его промораживания естественным холодом в зимнее время.

Следует особо отметить, что надежность такой мерзлой водонепроницаемой оболочки можно гарантировать только до мая, пока питание реки будет осуществляться талыми водами, температура которых близка к 0°C . Как только температура воды в р. Магаданке, гидравлически связанной с грунтовыми водами, превысит $2-3^{\circ}\text{C}$, произойдет быстрое оттаивание мерзлого грунта, и в случае, если водопонижительная система скважин не будет действовать, неизбежно произойдет затопление котлована паводковыми водами.

Выводы

1. Для климатических условий Магадана теоретически обоснована и практически доказана возможность применения метода создания в котловане водонепроницаемых оболочек из мерзлого грунта за счет его промораживания естественным холодом в зимнее время.

2. Применение метода водопонижения в котловане с помощью водопонижительных скважин в условиях криолитозоны экономически целесообразно лишь в том случае, если возведение фундамента будет выполняться в талых грунтах в летнее время. В случае, если возведение фундамента можно выполнить в течение зимнего периода, то затраты на разработку котлована при одновременном создании водонепроницаемой оболочки из мерзлого грунта будут несопоставимо меньше затрат, которые пойдут на создание системы водопонижения с помощью скважин.

3. Использование в инженерных строительных расчетах аналитических формул, хорошо известных в мерзлотоведении, дает возможность рассчитывать глубину промерзания грунта в различных мерзлотно-климатических условиях, определять время промерзания, прогнозировать появление в зимнее время таких нежелательных явлений, как наледи, предлагать простые и надежные способы борьбы с ними.

Литература

1. Щегольков Ю.Г. Исследование работы камуфлетных свай в талых и пластичномерзлых грунтах г. Магадана // Труды ВНИИ-1. Том XXIX. Магадан: Изд-во ВНИИ-1, 1969. С. 237–271.
2. Конач В.Е. Свайные фундаменты в условиях островного распространения вечномерзлых грунтов (на примере г. Магадана). Л.: Стройиздат, 1977. 136 с.
3. Рекомендации по проектированию и устройству свайных фундаментов зданий и сооружений на оттаивающих и талых грунтах Магаданской области. Якутск: Изд-во ФГБУН Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 2012. 64 с.
4. Ганиев С.Н. Использование естественного холода в северном строительстве. М.: Изд-во, 1951. 260 с.
5. Кудрявцев В.А. Общее мерзлотоведение (геокриология). М.: Изд-во МГУ, 1978. 464 с.
6. Трупаков Н.Г. Замораживание горных пород при проходке стволов. М.: УГЛТЕХИЗДАТ, 1954. 895 с.
7. Трупаков Н.Г. Замораживание грунтов в строительстве (примеры применения). М.: Изд-во литературы по строительству, 1970. 224 с.
8. Трупаков Н.Г. Замораживание грунтов в подземном строительстве. М.: Недра, 1974. 280 с.
9. Papakonstantinou S., Anagnostou G., Pimentel E. Evaluation of ground freezing data from the Naples subway // Proceedings of the ICE - Geotechnical Engineering. 2012. Vol. 166. Issue 3. Pp. 280–298.
10. Chen Y-L., Azzam R., Fernandez-Steeger T. M., Li L. Studies on Construction Pre-control of a Connection Aisle Between Two Neighbouring Tunnels in Shanghai by Means of 3D FEM, Neural Networks and Fuzzy Logic // Geotechnical and Geological Engineering. 2009. No. 27. Issue1. Pp. 155–167.
11. Rongved J.L., Instanes A. Foundation Engineering in Svalbard, 1950-2012 // Tenth International Conference on Permafrost. Vol.1. International Contributions. The Northern Publisher, Salekhard, Russia, 2012. Pp. 341–346.
12. Guly S.A. Heat pump application in permafrost engineering // Journal of Glaciology and Geocryology. 2004. Vol. 26. Pp. 220–226.
13. Lai Y., Pei W., Yu W. Calculation theories and analysis methods of thermodynamic stability of embankment engineering in cold regions // Chinese Science Bulletin. 2014. Vol. 59. Issue 3. Pp. 261–272.
14. Wu Q.B., Niu F.J. Permafrost changes and engineering stability in Qinghai-Xizang Plateau // Chinese Science Bulletin. 2013. Vol. 58. Issue 10. Pp. 1079–1094.
15. Чжан Р.В. Проектирование, строительство и эксплуатация гидротехнических сооружений низкого напора в криолитозоне (на примере Якутии). Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН, 2000. 158 с.
16. Gaofeng Man, Jiankun Liu, Jianmin Zhang. The Calculation and Control Methods of the Ice-wall Thickness in Ground Freezing Construction // Asian conference on Permafrost. Lanzhou. China. 2006. P. 25.
17. Feringer A.B. The design and construction of dams on permafrost // International Journal on hydropower and dams. 2007. Vol.4. No.3. Pp. 86–87.
18. Feringer A.B. Design and construction of dams on permafrost // Power Technology and Engineering. 2008. Vol. 42. No. 2. Pp. 78–82.
19. Сухой А.М. Опыт эксплуатации грунтовой плотины в условиях Крайнего Севера // Гидротехническое строительство. 2008. №1. С. 5–8.
20. Tsvik A.M., Maksimov I.A., Kolleganov V.V. Condition and control of the thermal-filtration regime of northern rock-and-earthfill dams constructed in accordance with the thaw principle // Power Technology and Engineering. 2008. Vol. 42. No. 2. Pp. 83–87.
21. Криогенные строительные материалы. Формирование понятия, классификация, состояние изученности. Якутск: Издание Института мерзлотоведения СО РАН, 2011. 68 с.
22. Долгих Г.М., Окунев С.Н., Захарова В.Н., Марамыгина М.С., Долгих С.Н. Прогнозные расчеты мерзлотной противодиффузионной завесы плотины Вилюйской ГЭС-3 с использованием коллекторных СОУ // Материалы IX Международного симпозиума «Проблемы инженерного мерзлотоведения». Якутск: Издательство Института мерзлотоведения СО РАН, 2011. С. 280–283.
23. Долгих Г.М., Окунев С.Н., Стрижков С.Н. Ледяной экран для полигона на Крайнем Севере // Твердые бытовые отходы. 2011. №11. С. 17–19.
24. Dmitrieva S.P., Kutvitskaya N.B., Moroz E.D., Vlasova Yu.A. Ice-Ground Grout Curtain of Earth Dams in Severe Natural and Climate Conditions // Tenth International Conference on Permafrost: Resources and Risks of Permafrost Areas in a Changing World. Extended Abstracts. Vol.4. Fort Dialog-Iset, Ekaterinburg, Russia, 2012. Pp. 114–115.

25. Чжан Р.В. Геокриологические принципы работы грунтовых плотин в криолитозоне в условиях меняющегося климата // Фундаментальные исследования (технические науки). 2014. №9. С. 288–296.
26. Курилко А.С., Дроздов А.В., Каймонов М.В. Оценка возможности ликвидации водного объекта в карьере «Айхал» // Наука и образование. 2013. №4. С. 53–57.
27. Алтунина Л. К., Кувшинов В. А., Стасьева Л. А., Долгих С. Н., Мельник Г. А. Способ изготовления водонепроницаемого экрана в низкотемпературных грунтовых материалах элементов гидротехнического сооружения. Патент РФ № 2276703. 2006.
28. Ягин В.П. Грунтовая плотина на многолетнемерзлых грунтах. Патент РФ № 2416693. 2011.
29. Ягин В.П., Оголь В.Г., Гришин В.А., Вайкум В.А. Грунтовая плотина на многолетнемерзлом основании. Патент РФ № 2453655. 2012.
30. СНиП 2.02.01-83*. Основания зданий и сооружений. М., 1995. 49 с.
31. Основы геокриологии (мерзлотоведения). Часть вторая. Инженерная геокриология. М.: Изд-во Академии наук СССР, 1959. 366 с.
32. Румянцев Е.А. Механизм развития наледного процесса // Сборник научных трудов «Проблемы наледоведения». Новосибирск: Наука, 1991. С. 55–65.
33. Паршуков И.В. Особенности формирования наледей в Колымском регионе // Колыма. 1995. №11–12. С. 5–13.
34. Павлов А.В. Теплообмен почвы с атмосферой в северных и умеренных широтах территории СССР. Якутск: Якутское книжное издательство, 1975. 302 с.
35. Луговой С.П. Теоретические предпосылки расчетов отепляющего влияния снежного покрова по метеорологическим данным // Геокриологические исследования. М.: Изд-во МГУ, 1986. С.180–192.
36. Хабибуллин И.Л., Солдаткин М.В. Динамика промерзания сезонно-талого слоя криолитозоны с учетом наличия снежного покрова // Вестник Башкирского университета. (раздел Физика). 2012. Т. 17. №2. С. 843–846.
37. Chang J., Wang G.S., Gao Y.H., Wang Y.B. The influence of seasonal snow on soil thermal and water dynamics under different vegetation covers in a permafrost region // Journal of Mountain Science. 2014. Vol. 11. Issue 3. Pp. 727–745.
38. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3. Многолетние данные. Части 1–6. Выпуск 33. Магаданская область, Чукотский автономный округ Магаданской области. Л.: Гидрометиздат, 1990. 566 с.
39. Пособие по методике прогнозирования инженерно-геологических мерзлотных условий (к РСН 31-83). М.: ЦТИСИ, 1984. 60 с.

Сергей Александрович Гулый, г. Магадан, Россия
Тел. моб.: +7(914)8534019; эл. почта: svnims@mail.ru

© Гулый С.А., 2015

doi: 10.5862/MCE.55.4

The study of the ground freezing method using natural cold to protect the foundation pit from groundwater inflow

S.A. Guly

North-Eastern Permafrost Station, Melnikov Permafrost Institute,
Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Magadan, Russia
+79148534019; e-mail: svnims@mail.ru

Key words

foundation pit, groundwater, ice wall, ground freezing, snow cover, icing

Abstract

When the bottom of the foundation pit is below the groundwater level, groundwater drawdown is required; as a rule, it is extremely expensive. In order to reduce water drawdown costs in areas with consistently low air temperatures we suggest to excavate foundation pits in wintertime. As with hydraulic engineering constructions erected in the Far North, natural ground freezing allows for creating the waterproof ice wall that prevents the foundation pit from being flooded.

The paper describes the sequence of ground freezing operations and methods to forecast the thermal state of the waterproof ground element during construction in Magadan, Russia. Calculations were made to reveal the conditions under which ice formation is probable in the foundation ditch when creating the ice wall, and a simple anti-icing method that involves using snow was proposed.

The results can be applied in regions with extreme climatic conditions.

References

1. Shchegolkov Yu.G. Issledovaniye raboty kamufletnykh svay v talykh i plastichnomerzlykh gruntakh g. Magadana [Investigation work kamufletnyh piles in thawed and plastichnomerzlyh soils in Magadan]. *Trudy VNI-1. Tom XXIX* [Proceedings of the All-Union Scientific Research Institute-1. Vol. XXIX]. Magadan: Izd-vo VNI-1, 1969. Pp. 237–271. (rus)
2. Konash V.Ye. *Svaynye fundamenty v usloviyakh ostrovnogo rasprostraneniya vechnomerzlykh gruntov (na primere g. Magadana)* [Pile foundations in the conditions of the island spread of permafrost (for example, the town of Magadan)]. Leningrad. Stroyizdat, Leningradskoe otdelenie, 1977. 136 p. (rus)
3. *Rekomendatsii po proektirovaniyu i ustroystvu svaynykh fundamentov zdaniy i sooruzheniy na ottaivayushchikh i talykh gruntakh Magadanskoj oblasti* [Recommendations for the design and installation of pile foundations for structures on thawing and thawed soils in Magadan region]. Yakutsk: Izdatelstvo FGBUN Instituta merzlotovedeniya im. P.I. Melnikova SO RAN. 2012. 64 p. (rus)
4. Ganiev S. N. *Ispolzovanie estestvennogo kholoda v severnom stroitelstve* [Using a natural cold in the northern building]. Moscow. 1951. 260 p. (rus)
5. *Obshchee merzlotovedenie (geokriologiya). Uchebnik. Pod redaktsiey V.A. Kudryavtseva* [Total Permafrost (geocryology). Izd.2. Textbook. Edited by VA Kudryavtsev]. Moscow. Izdatelstvo MGU, 1978. 464 p. (rus)
6. Trupak N.G. *Zamorazhivanie gomykh porod pri prokhodke stvolov* [Freezing of rocks at shaft sinking]. Moscow. UGLTYeKHI ZDAT, 1954. 895 p. (rus)
7. Trupak N.G. *Zamorazhivanie gruntov v stroitelstve (primery primeneniya)* [Freezing of soils in construction (examples of applications)]. Moscow. Izdatelstvo literatury po stroitelstvu. 1970. 224 p. (rus)
8. Trupak N.G. *Zamorazhivanie gruntov v podzemnom stroitelstve* [Freezing of soils in underground building]. Moscow. Nedra, 1974. 280 p. (rus)
9. Papakonstantinou S., Anagnostou G., Pimentel E. Evaluation of ground freezing data from the Naples subway. *Proceedings of the ICE - Geotechnical Engineering*. 2012. Vol. 166. Issue 3. Pp. 280–298.
10. Chen Y-L., Azzam R., Fernandez-Steeger T. M., Li L. Studies on Construction Pre-control of a Connection Aisle Between Two Neighbouring Tunnels in Shanghai by Means of 3D FEM, Neural Networks and Fuzzy Logic. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2009. Vol. 27. Issue1. Pp. 155–167.
11. Rongved J.L., Instanes A. Foundation Engineering in Svalbord, 1950-2012. *Tenth International Conference on Permafrost*. Vol.1. International Contributions. The Northern Publisher, Salekhard, Russia, 2012. Pp. 341–346.
12. Guly S.A. Heat pump application in permafrost engineering. *Journal of Glaciology and Geocryology*. 2004. Vol. 26. Pp. 220–226.

Guly S.A. The study of the ground freezing method using natural cold to protect the foundation pit from groundwater inflow

13. Lai Y., Pei W., Yu W. Calculation theories and analysis methods of thermodynamic stability of embankment engineering in cold regions. *Chinese Science Bulletin*. 2014. Vol. 59. Issue 3. Pp. 261–272.
14. Wu Q.B., Niu F.J. Permafrost changes and engineering stability in Qinghai-Xizang Plateau. *Chinese Science Bulletin*. 2013. Vol. 58. Issue 10. Pp. 1079–1094.
15. Chzhan R.V. *Proektirovanie, stroitelstvo i ekspluatatsiya gidrotekhnicheskikh sooruzheniy nizkogo napora v kriolitozone (na primere Yakutii)* [Design, construction and exploitation of hydrotechnical constructions of low pressure in permafrost (for example, Yakutia)]. Yakutsk: Izdatelstvo IMZ SO RAN, 2000. 158 p. (rus)
16. Gaofeng Man, Jiankun Liu, Jianmin Zhang. The Calculation and Control Methods of the Ice-wall Thickness in Ground Freezing Construction. *Asian conference on Permafrost*. Lanzhou. China. 2006. P. 25.
17. Feringer A.B. The design and construction of dams on permafrost. *International Journal on hydropower and dams*. 2007. Vol. 4. No.3. Pp. 86–87.
18. Feringer A.B. Design and construction of dams on permafrost. *Power Technology and Engineering*. 2008. Vol. 42. No. 2. Pp. 78–82.
19. Sukhno A.M. Opyt ekspluatatsii gruntovoy plotiny v usloviyakh Kraynego Severa [Operating experience of embankment dam in the Far North]. *Gidrotekhnicheskoe stroitelstvo*. 2008. No. 1. Pp. 5–8. (rus)
20. Tsvik A.M., Maksimov I.A., Kolleganov V.V. Condition and control of the thermal-filtration regime of northern rock-and-earthfill dams constructed in accordance with the thaw principle. *Power Technology and Engineering*. 2008. Vol. 42. No. 2. Pp. 83–87.
21. *Kriogennyye stroitelnye materialy. Formirovanie ponyatiya, klassifikatsiya, sostoyanie izuchennosti* [Cryogenic building materials. Formulation of the Concept, Classification, and State of the Art]. Yakutsk: Izdanie Instituta merzlotovedeniya SO RAN, 2011. 68 p. (rus)
22. Dolgikh G.M., Okunev S.N., Zakharova V.N., Maramygina M.S., Dolgikh S.N. Prognoznyye raschety merzlotnoy protivofiltratsionnoy zavesy plotiny Vilyuyskoy GES-3 s ispolzovaniem kollektornykh SOU [Predictive calculations for the frost ground curtain at the Vilyuiskaya HPP-3 with collector seasonally operating cooling devices]. *Materialy IX Mezhdunarodnogo simpoziuma Problemy inzhenerno merzlotovedeniya* [Permafrost Engineering. Proceedings of the IX International Symposium]. Yakutsk: Izdatelstvo Instituta merzlotovedeniya SO RAN, 2011. Pp. 280–283. (rus)
23. Dolgikh G.M., Okunev S.N., Strizhkov S.N. Ledyanoy ekran dlya poligona na Kraynem Severe [Ice screen for the polygon in the Far North]. *Tverdye bytovye otkhody*. 2011. No. 11. Pp. 17–19. (rus)
24. Dmitrieva S.P., Kutvitskaya N.B., Moroz E.D., Vlasova Yu.A. Ice-Ground Grout Curtain of Earth Dams in Severe Natural and Climate Conditions. *Tenth International Conference on Permafrost: Resources and Risks of Permafrost Areas in a Changing World. Extended Abstracts*. Vol. 4. Fort Dialog-Iset, Ekaterinburg, Russia, 2012. Pp. 114–115.
25. Chzhan R.V. Geokriologicheskie printsipy raboty gruntovykh plotin v kriolitozone v usloviyakh menyayushchegosya klimata [Geocryology principles of earth dams for low and medium pressures in permafrost in a changing climate]. *Fundamental research (Technical sciences)*. 2014. No. 9. Pp.288-296. (rus)
26. Kurilko A.S., Drozdov A.V., Kaymonov M.V. Otsenka vozmozhnosti likvidatsii vodnogo obekta v karere «Aykhal» [The evaluation of possibility of water body liquidation in the «Aikhal» pit]. *Science and Education*. 2013. No. 4. Pp. 53–57. (rus)
27. Altunina L. K., Kuvshinov V. A., Staseva L. A., Dolgikh S. N., Melnik G. A. *Sposob izgotovleniya vodonepronitsaemogo ekrana v nizkotemperaturnykh gruntovykh materialakh elementov gidrotekhnicheskogo sooruzheniya* [A method of making a waterproof screen in low-temperature ground material elements of a hydraulic structure]. Patent RF No. 2276703. 2006. (rus)
28. Yagin V.P. Gruntovaya plotina na mnogoletnemerzlykh gruntakh [Ground dam on permafrost soils]. Patent RF No. 2416693. 2011. (rus)
29. Yagin V.P., Ogol V.G., Grishin V.A., Vaykum V.A. *Gruntovaya plotina na mnogoletnemerzлом osnovanii* [Ground dam on permafrost foundation]. Patent RF No. 2453655. 2012. (rus)
30. *SNiP 2.02.01-83**. *Osnovaniya zdaniy i sooruzheniy* [Foundations of buildings and structures]. Moscow. 1995. 49 p. (rus)
31. *Osnovy geokriologii (merzlotovedeniya). Chast vtoraya. Inzhenernaya geokriologiya* [Basics of Geocryology (Permafrost). Part Two. Engineering geocryology]. Moscow: Izdatelstvo Akademii nauk SSSR, 1959. 366 p. (rus)
32. Rumyantsev Ye.A. Mekhanizm razvitiya nalednogo protsessa [The mechanism of icing process]. *Problemy naledevedeniya, sbornik nauchnykh trudov* [Collection of scientific papers. Icing problems]. Novosibirsk: Izdatelstvo Nauka, 1991. Pp. 55–65. (rus)
33. Parshukov I.V. Osobennosti formirovaniya naledey v Kolymskom regione [Features of formation icing in the Kolyma region]. *Kolyma*. 1995. No. 11–12. Pp. 5–13. (rus)

34. Pavlov A.V. *Teploobmen pochvy s atmosferoy v severnykh i umerennykh shirotakh territorii SSSR* [The heat exchange of the soil with the atmosphere in the northern and the temperate latitudes the USSR territory]. Yakutsk: Yakutskoe knizhnoe izdatelstvo, 1975. 302 p. (rus)
35. Lugovoy S.P. Teoreticheskie predposylki raschetov oteplyayushchego vliyaniya snezhnogo pokrova po meteorologicheskim dannym [Theoretical preconditions of calculations warming effect of snow cover on the meteorological data]. *Geokriologicheskie issledovaniya* [Geocryological study]. Moscow. Izdatelstvo MGU, 1986. Pp. 180–192. (rus)
36. Khabibullin I. L., Soldatkin M. V. Dinamika promerzaniya sezonno-talogo sloya kriolitozony s uchetom nalichiya snezhnogo pokrova [Dynamics of freezing permafrost seasonally-thawed layer taking into account presence of a snow cover]. *Bulletin of Bashkir University (Physics)*. 2012. Vol. 17. No.2. Pp. 843–846. (rus)
37. Chang J., Wang G.S., Gao Y.H., Wang Y.B. The influence of seasonal snow on soil thermal and water dynamics under different vegetation covers in a permafrost region. *Journal of Mountain Science*. 2014. Vol. 11. Issue 3. Pp. 727–745.
38. *Nauchno-prikladnoy spravochnik po klimatu SSSR. Seriya 3. Mnogoletnie dannye. Chasti 1- 6. Vypusk 33. Magadanskaya oblast, Chukotskiy avtonomnyy okrug Magadanskoy oblasti* [Scientific and for Applied Climate Handbook. 3. Long-term data series. Part 1 6. Issue 33. Magadan region, Chukotka Autonomous District Magadan region]. Leningrad: Gidrometizdat, 1990. 566 p. (rus)
39. *Posobie po metodike prognozirovaniya inzhenerno-geologicheskikh merzlotnykh usloviy (k RSN 31-83)* [Resource Manual to the method of prediction geological permafrost conditions (for RSN 31-83)]. Moscow: TsTISI, 1984. 60 p. (rus)

Full text of this article in Russian: pp. 29–37