

УДК 624.139

Научная специальность: 2.1.2 Основания и фундаменты, подземные сооружения

СТРОИТЕЛЬСТВО НА КРАЙНЕМ СЕВЕРЕ: ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОСНОВАНИЙ И ФУНДАМЕНТОВ НА МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ

Волков Владимир Сергеевич

студент 4 курса

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»

Москва, Россия

e-mail: volkov.vova@inbox.ru

Аннотация. В статье рассмотрены инженерные принципы строительства зданий и сооружений в районах Крайнего Севера, где надежность объекта определяется не только прочностью конструкций, но и сохранением расчетного температурного состояния основания. Показано, что выбор между использованием многолетнемерзлых грунтов по принципу I и их предварительным оттаиванием или заменой по принципу II должен опираться на инженерно-геокриологическую модель площадки, льдистость, температуру грунтов, глубину сезонного оттаивания и прогноз теплового воздействия здания. Проанализированы свайные решения, проветриваемые подполья, теплоизоляция, двухфазные термосифоны и геотехнический мониторинг. Приведены расчетные зависимости теплопереноса и теплового баланса, а также практические критерии выбора защитных мероприятий. Особое внимание уделено риску неравномерных осадок при деградации мерзлоты и необходимости учитывать изменение климатических условий на протяжении жизненного цикла сооружения.

Ключевые слова: *Крайний Север, многолетнемерзлые грунты, вечная мерзлота, основания, свайные фундаменты, термосифоны, тепловой режим, осадка, геотехнический мониторинг.*

CONSTRUCTION IN THE FAR NORTH: DESIGN PRINCIPLES FOR FOUNDATIONS ON PERMAFROST SOILS

Volkov Vladimir Sergeevich

4th year student

Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «Moscow State University of Civil Engineering (National Research University)»

Moscow, Russia

e-mail: e-mail: Volkov.Vova@inbox.ru

Abstract. The paper considers engineering principles of building design in the Far North, where structural reliability depends not only on the strength of the superstructure but also on maintaining the design thermal state of the foundation soils. The choice between preserving permafrost in a frozen state and using thawed or replaced soils is related to the engineering-geocryological model of the site, ground-ice content, soil temperature, seasonal thaw depth and predicted heat input from the building. Pile foundations, ventilated crawl spaces, thermal insulation, two-phase thermosyphons and geotechnical monitoring are discussed. Heat-transfer and thermal-balance equations are presented together with practical criteria for selecting protective measures. Particular attention is paid to differential settlement caused by permafrost degradation and to the need to consider changing climatic conditions throughout the service life of a structure.

Keywords: *Far North, permafrost, frozen soils, foundations, pile foundations, thermosyphons, thermal regime, settlement, geotechnical monitoring.*

Введение

Строительство на Крайнем Севере входит в число сфер инженерной практики, где стандартное разграничение «конструктивных» и «геотехнических» задач носит во многом условный характер. При умеренном климате фундамент воспринимает нагрузки и передает их грунту; его свойства в период эксплуатации, как правило, изменяются относительно медленно. В области распространения многолетнемерзлых грунтов температурный режим выступает как самостоятельный расчетный фактор: даже повышение температуры на доли и единицы градуса может заметно изменить прочность контакта сваи с грунтом, увеличить толщину сезонноталого слоя и запустить оттаивание льдистых включений. По этой причине проектировщик фактически имеет дело с взаимосвязанной системой «здание – фундамент – грунтовый массив – атмосфера».

В Российской Федерации нормативную основу проектирования оснований на многолетнемерзлых грунтах составляет СП 25.13330.2020 [1]. Классификация грунтов, а также применяемые показатели их состава и состояния, согласованы с ГОСТ 25100-2020 [2]; исходные климатические параметры, в свою очередь, принимаются по СП 131.13330.2020 [3]. Указанные документы закрепляют принципиально важное положение: надежность основания должна подтверждаться не только расчетом несущей способности, но и прогнозом его температурного состояния на расчетный период эксплуатации - именно этот прогноз включается в обязательную логику проектного обоснования.

Актуальность этой задачи возрастает вследствие наблюдаемого потепления мерзлоты и роста техногенной нагрузки на арктические территории. Панарктическая оценка J. Njort и соавторов показывает, что значительная часть существующей инфраструктуры в области распространения мерзлоты расположена в районах, где к середине XXI века вероятно оттаивание приповерхностных многолетнемерзлых грунтов [4]. Такие оценки не заменяют инженерных изысканий конкретной площадки, однако меняют сам подход к запасам надежности: расчет, основанный исключительно на стационарном прошлом климате, становится недостаточным для сооружений с длительным сроком службы.

Цель статьи – систематизировать инженерные решения, обеспечивающие устойчивость зданий на Крайнем Севере, и показать связь между геокриологическими условиями, тепловым расчетом, типом фундамента и мониторингом. Рассматриваются преимущественно здания и промышленные сооружения на дисперсных многолетнемерзлых грунтах; вопросы дорожного и линейного строительства затрагиваются в той мере, в какой их опыт полезен для понимания методов искусственного охлаждения оснований.

Методы и методики

Главная особенность мерзлого основания состоит в том, что лед является частью его структуры. При отрицательной температуре поровый лед и ледяные включения повышают жесткость массива, а при оттаивании превращаются в воду, вследствие чего формируется дополнительная осадка, величина которой зависит от льдистости и структуры грунта. Особенно опасны повторно-жильные льды, ледяные прослои и сильнольдистые пылевато-глинистые грунты: внешне устойчивое основание после нарушения теплового равновесия может перейти в резко деформируемое состояние.

Для проектирования недостаточно установить лишь границу многолетнемерзлых грунтов. Требуется определить температуру грунтов по глубине, положение верхней поверхности мерзлоты, сезонную динамику деятельного слоя, суммарную и текстурообразующую льдистость, засоленность, криогенное строение, наличие таликов и подземных вод. ГОСТ 25100-2020 прямо включает специальные показатели мерзлых грунтов в общую систему классификационных признаков [2]. В инженерной практике эти данные объединяются в расчетную геокриологическую модель, которая должна отражать пространственную неоднородность участка, а не только усредненный разрез одной скважины.

Особое значение приобретает температура многолетнемерзлого массива. Грунты с устойчивой отрицательной температурой располагают большим тепловым резервом, тогда как «теплая» мерзлота, температура которой близка к 0 °С, реагирует на сравнительно небольшой

приток тепла значительно чувствительнее. При этом рост температуры ослабляет смерзание грунта с боковой поверхностью свай; по этой причине одинаковая геометрия свайного поля способна обеспечивать различный запас несущей способности на площадках со сходным литологическим разрезом, но с иным температурным состоянием.

Результаты

СП 25.13330.2020 [1] закрепляет два базовых принципа использования многолетнемерзлых грунтов. Согласно принципу I, грунты сохраняют в мерзлом состоянии в течение всего срока эксплуатации сооружения. При принципе II допускается их использование в оттаявшем состоянии - после предварительного оттаивания, улучшения, замены или с учетом прогнозируемых деформаций; выбор между этими подходами определяется не предпочтением проектировщика, а расчетной моделью основания и технико-экономическим сравнением вариантов.

Наиболее часто принцип I применяют на участках, где мерзлый массив обладает достаточной несущей способностью, а его оттаивание сопровождается большими и неравномерными деформациями. В такой ситуации задача состоит в сохранении холода, а не в «борьбе с холодом». Здание поднимают над поверхностью, устраивают проветриваемое подполье, снижают тепловой контакт с грунтом, используют свайные фундаменты и, при необходимости, предусматривают искусственное охлаждение - при этом определяющим условием становится непрерывность тепловой защиты, поскольку локальная утечка тепла от ввода трубопровода или участок с недостаточной вентиляцией может сформировать талик даже при корректном общем решении.

Принцип II оказывается рациональным там, где сохранение мерзлого состояния технически неустойчиво либо экономически неоправданно, а грунты после оттаивания характеризуются приемлемой деформируемостью. В этом случае расчет выполняют как для талых оснований, но обязательно принимают во внимание осадку от оттаивания и этапность преобразования грунта. Для льдистых грунтов данный вариант нередко требует масштабной замены, уплотнения или устройства свай до более надежных слоев - поэтому его преимущества, как представляется, проявляются прежде всего в локальных условиях.

На практике особенно опасна промежуточная ситуация, при которой проект формально опирается на принцип I, а эксплуатация постепенно переводит основание в состояние принципа II без соответствующего расчета. К числу типичных причин относятся: закрытие продухов, накопление снега в подполье, утечки горячей воды, изменение планировки территории, повышение уровня грунтовых вод и неучтенное утепление наружных поверхностей. Отсюда следует, что принцип использования грунта должен поддерживаться не только конструкцией – его необходимо обеспечивать и эксплуатационным регламентом.

Тепловой расчет выступает связующим звеном между архитектурным решением и геотехникой. В наиболее простой постановке перенос тепла в грунте описывается законом Фурье. Для одномерного потока эту зависимость можно представить следующим образом:

$$q = -\lambda \cdot \frac{dT}{dz} \quad (1)$$

где q – плотность теплового потока, Вт/м². Величина λ понимается как коэффициент теплопроводности грунта, Вт/(м·К), а dT/dz – как температурный градиент. Знак «минус» указывает направление переноса тепла: поток ориентирован в сторону понижения температуры. Для реального мерзлого массива коэффициент λ определяется составом, влажностью, льдистостью и фазовым состоянием воды, поэтому стационарная оценка применяется лишь как первое приближение.

Если фильтрационный перенос не учитывается, нестационарное температурное поле описывают уравнением теплопроводности. Здесь существен переход к нестационарной постановке; он позволяет учитывать изменение температуры во времени. Для многолетнемерзлых грунтов такой подход особенно важен, поскольку тепловое состояние основания зависит не только от текущих свойств среды, но и от истории теплового воздействия.

$$\rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \cdot \nabla T) + Q \quad (2)$$

где ρ – плотность грунта, кг/м³. Параметр c обозначает удельную теплоемкость, Дж/(кг·К), а величина Q – объемную мощность внутренних источников тепла, Вт/м³. В интервале фазового перехода задача заметно усложняется: выделение или поглощение скрытой теплоты воды должно учитываться отдельно, и на практике это делают через эффективную теплоемкость либо через энтальпийную постановку. Такой учет особенно важен для грунтов со значительным содержанием незамерзшей воды.

Для предварительной оценки теплового баланса защитных мероприятий целесообразно сопоставлять поступающий и отводимый тепловые потоки. В инженерной форме условие сохранения мерзлого состояния в контролируемом объеме можно записать следующим образом. При таком представлении баланс трактуется как соотношение приходных и расходных составляющих тепла – именно оно позволяет судить о способности защитных мер поддерживать требуемое температурное состояние основания.

$$Q_{\text{отв}} \geq Q_{\text{здание}} + Q_{\text{лето}} + Q_{\text{техн}} - Q_{\text{зима}} \quad (3)$$

где $Q_{\text{отв}}$ – средняя мощность искусственного или конструктивно обеспеченного отвода тепла; $Q_{\text{здание}}$ – теплоступления от объекта; $Q_{\text{лето}}$ – сезонный приток тепла с поверхности; $Q_{\text{техн}}$ – теплоступления от коммуникаций и технологического оборудования; $Q_{\text{зима}}$ – естественное зимнее охлаждение. Формула (3) не подменяет численное моделирование, однако наглядно раскрывает физический смысл проектных мер: теплоизоляция сокращает приходную часть баланса, а проветриваемое подполье и термосифоны, напротив, увеличивают отвод тепла. В этом и состоит инженерная логика записи – она позволяет увидеть, какие именно воздействия уменьшают теплоприток и какие решения усиливают охлаждение основания.

Для зданий, которые проектируются по принципу I, свайный фундамент относится к наиболее распространенным решениям. Передача нагрузки от сваи происходит как через нижний конец, так и за счет сопротивления мерзлого грунта по боковой поверхности. Показательно, что значительная часть работы такой системы определяется смерзанием «свая – грунт», поэтому температурный режим вокруг ствола приобретает прямое расчетное значение; при потеплении мерзлоты сопротивление смерзанию снижается, а в сезонноталом слое дополнительно проявляются силы морозного пучения и отрицательного трения.

При проектировании требуется учитывать и конструктивную приспособляемость надземной части к небольшим неравномерным перемещениям. Чем выше жесткость здания и чем чувствительнее инженерные сети к деформациям, тем более строгими становятся требования к однородности свайного поля и к контролю осадок. Компенсаторы на трубопроводах, деформационные швы и доступность оголовков для обследования – это элементы общей стратегии надежности, а не второстепенные детали; именно через них обеспечивается работоспособность системы при локальных изменениях состояния основания.

Если естественного зимнего охлаждения недостаточно либо тепловая нагрузка от сооружения велика, применяют сезоннодействующие охлаждающие устройства – двухфазные термосифоны. Их работа основана на переносе тепла вследствие испарения рабочего тела в подземной части и последующей конденсации в надземном теплообменнике при отрицательной температуре воздуха. Такое устройство не требует постоянного электропитания и, как представляется, автоматически активизируется в тех случаях, когда наружный воздух холоднее грунта.

Экспериментальные и расчетные исследования показывают, что эффективность термосифонов зависит от геометрии, ориентации, ветрового обдува, параметров рабочего тела, теплопроводности грунта и взаимного расположения устройств. Классическая работа F. D. Naumes и J. P. Zarling показала влияние скорости воздуха и наклона испарительной части на теплопередачу двухфазного термосифона [5]. Современные исследования подтверждают возможность ускорять обратное промерзание грунта вокруг буронабивных свай после теплового воздействия бетонирования [6].

Для линейных сооружений также накоплен значительный опыт. F. Wang и соавторы на основе трехлетних наблюдений и геофизических исследований показали, что термосифоны способны сдерживать быстрое оттаивание мерзлоты под теплым нефтепроводом, причем результат чувствителен к длине устройств и шагу их установки [7]. Эти выводы применимы и к площадным объектам в общем физическом смысле: искусственное охлаждение следует проектировать как пространственную систему, а не как набор независимых труб.

Даже при качественно рассчитанной эксплуатационной схеме нарушения нередко возникают уже на стадии строительства. Снятие растительного и торфяного покрова уменьшает естественную теплоизоляцию поверхности, движение тяжелой техники уплотняет снег и изменяет сток, а открытые котлованы аккумулируют солнечное тепло и воду. При устройстве буронабивных свай дополнительный тепловой импульс создает гидратация цемента – показательно, что исследование Y. Shang и соавторов фиксирует способность системы «свая – термосифоны» существенно ускорять обратное промерзание грунта вокруг монолитной сваи [6].

Из этого положения вытекает организационный принцип: температурный режим необходимо контролировать с момента подготовки площадки, а не после ввода здания в эксплуатацию. В проекте производства работ целесообразно закреплять допустимые сроки вскрытия грунта, меры по отводу поверхностных вод, требования к складированию снега и грунта, последовательность устройства свай и сроки нагружения после обратного промерзания. Для критичных объектов температура основания становится приемочным параметром – наравне с прочностью бетона, поскольку именно она характеризует фактическую готовность основания к безопасной работе.

Классическая практика северного строительства во многом опиралась на климатические ряды прошлого. Для объектов со сроком службы 50 лет и более этого недостаточно: основание будет работать в условиях, которые постепенно отличаются от условий начала эксплуатации. Панарктические исследования показывают, что риск для инфраструктуры связан не только с переходом температуры через 0°C , но и с ростом деформационной уязвимости льдистых грунтов при потеплении [4].

Адаптивное проектирование не означает произвольного увеличения запасов. Более рационален сценарный подход. Для расчетного срока службы следует проверить базовый климатический сценарий и по крайней мере один неблагоприятный вариант с повышенной температурой воздуха, большей глубиной сезонного оттаивания или сокращением периода эффективной работы термосифонов. Затем оценивается, сохраняются ли требуемые запасы по несущей способности и деформациям.

Хорошим решением является закладывание возможности усиления без реконструкции всего объекта: резервные места для установки дополнительных термосифонов, доступ к термометрическим скважинам, возможность регулирования продухов, разъемные элементы инженерных сетей, пригодные для компенсации перемещений. Такой подход переводит климатическую неопределенность из категории «непредвиденного события» в управляемый эксплуатационный фактор.

Особое значение имеет качество исходных данных. Даже сложная трехмерная теплотехническая модель не компенсирует недостаточное бурение или ошибочную оценку льдистости. По этой причине наращивание вычислительной детализации должно сопровождаться сопоставимым повышением качества изысканий и наблюдений; с инженерной точки зрения наиболее надежна не самая сложная модель, а та, чьи параметры измерены и затем проверяются в эксплуатации.

Последовательность проектирования целесообразно начинать с определения криогенного риска, а не с выбора типа фундамента. На первом этапе формируют инженерно-геокриологическую модель участка и выделяют зоны различной льдистости, температуры и потенциальной просадочности при оттаивании. На втором этапе оценивают тепловое воздействие будущего здания – с учетом не только ограждающих конструкций, но и коммуникаций, технологического оборудования, снегового режима и изменения поверхности.

Далее сопоставляются варианты использования грунтов по принципам I и II. Для принципа I сначала проверяют возможность сохранения расчетной отрицательной температуры пассивными средствами; при их недостаточности предусматривают искусственную термостабилизацию, после чего подбирают фундамент и выполняют взаимосвязанные расчеты несущей способности, деформаций и температурного режима. Завершающий этап - формирование программы мониторинга с пороговыми значениями и заранее определенными корректирующими действиями.

Экономическое сравнение вариантов необходимо вести по жизненному циклу. Более дешевый фундамент, требующий постоянной активной холодильной установки, может оказаться менее выгодным, чем свайное решение с пассивным термосифонным охлаждением. Но и чрезмерное насыщение объекта термостабилизаторами без достаточного расчетного обоснования увеличивает капитальные и эксплуатационные расходы, усложняет диагностику и не гарантирует равномерности температурного поля.

Заключение

Строительство на Крайнем Севере требует рассматривать основание как термомеханическую систему, свойства которой определяются температурой и фазовым состоянием влаги. Ключевое проектное решение – выбор принципа использования многолетнемерзлых грунтов: либо сохранение их мерзлого состояния, либо контролируемый переход к талому состоянию с расчетом соответствующих деформаций. Именно эта альтернатива задает логику последующих расчетов и состав защитных мероприятий.

При принципе I надежность обеспечивается сочетанием свайных фундаментов, проветриваемого подполья, теплоизоляции, организованного водоотвода и, при необходимости, сезоннодействующих охлаждающих устройств. Каждый элемент такой системы должен оцениваться по тепловому балансу и проверяться в неблагоприятных климатических условиях. Свайный фундамент (без сохранения расчетного температурного режима) не может рассматриваться как самодостаточное решение.

К числу наиболее опасных факторов относятся неравномерная льдистость, «теплая» мерзлота, локальные источники тепла, нарушение снегового и водного режима, а также постепенное климатическое потепление. По этой причине проект должен предусматривать не только исходный запас надежности, но и адаптационный резерв; речь идет о возможности усилить охлаждение, изменить режим вентиляции и компенсировать деформации инженерных сетей. Примечательно, что именно такая предусмотренность определяет устойчивость решения при изменении внешних условий.

Геотехнический мониторинг выступает обязательной частью эксплуатационной модели объекта. Температура грунта, глубина сезонного оттаивания и деформации должны сопоставляться с расчетными порогами, после достижения которых запускаются конкретные инженерные действия. Такой подход переводит работу с основанием из режима реагирования на повреждения в режим управления его состоянием – и тем самым существенно повышает долговечность сооружений в условиях Крайнего Севера.

Литература

1. СП 25.13330.2020. СНиП 2.02.04-88 Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. – М.: Минстрой России, 2020. – URL: <https://minstroyrf.gov.ru/docs/117292/> (дата обращения: 07.10.2026).
2. ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация. – Введ. 2021-01-01. – М.: Стандартинформ, 2020.
3. СП 131.13330.2020. СНиП 23-01-99* Строительная климатология (с изменениями № 1, 2). – М.: Минстрой России, 2020.
4. Hjort J. Degrading permafrost puts Arctic infrastructure at risk by mid-century / J. Hjort, O. Karjalainen, J. Aalto et al. // Nature Communications. – 2018. – Vol. 9. – DOI: 10.1038/s41467-018-07557-4.

5. Haynes F.D. Thermosyphons and foundation design in cold regions / F.D. Haynes, J.P. Zarling // Cold Regions Science and Technology. – 1988. – Vol. 15, No.3. – P. 251-259. – DOI: 10.1016/0165-232X(88)90072-9.
6. Shang Y. Freezeback behavior of a cast-in-place pile foundation surrounded by two-phase closed thermosyphons in permafrost regions / Y. Shang, F. Niu, K. Yuan, L. Wu // Applied Thermal Engineering. – 2023. – Vol. 225. – DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2023.120151.
7. Wang F. Applicability analysis of thermosyphon for thermally stabilizing pipeline foundation permafrost and its layout optimization / F. Wang, G. Li, A. Fedorov et al. // Cold Regions Science and Technology. – 2023. – Vol. 208. – DOI: 10.1016/j.coldregions.2022.103769.
8. Shang Y. Analysis of the cooling effect of a concrete thermal pile in permafrost regions / Y. Shang, F. Niu, Z. Lin, T. Sun // Applied Thermal Engineering. – 2020. – Vol. 173. – DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115254.
9. Mu Y. Thermal performance of a combined cooling method of thermosyphons and insulation boards for tower foundation soils along the Qinghai-Tibet Power Transmission Line / Y. Mu, G. Wang, Q. Yu et al. // Cold Regions Science and Technology. – 2016. – Vol. 121. – P. 226-236. – DOI: 10.1016/j.coldregions.2015.06.006.
10. Цытович Н.А. Механика мерзлых грунтов / Н.А. Цытович. – М.: Высшая школа, 1973. – 448 с.
11. Растегаев И.К. Разработка мерзлых грунтов в северном строительстве / И.К. Растегаев. – Новосибирск: Наука, 1992. – 346 с.
12. Коновалов А.А. Закономерности кинетической теории прочности мерзлых грунтов / А.А. Коновалова // Прикладная механика и техническая физика. – 1992. – Т.33, №6. – С. 134-139. – DOI: 10.1007/BF00851982.