

DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-12-16-31

\*<sup>1</sup>Есипов С.М., <sup>2</sup>Турков А.В., <sup>1</sup>Дьяченко А.Ю., <sup>1</sup>Есипова Д.В.<sup>1</sup>Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова<sup>2</sup>Орловский Государственный университет им. И.С. Тургенева

\*E-mail: sk31.sm@gmail.com

## НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ФУНДАМЕНТА В УСЛОВИЯХ ВЕЧНОЙ МЕРЗЛОТЫ И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА УСИЛИЯ В ЭЛЕМЕНТАХ НАДЗЕМНОЙ ЧАСТИ ЗДАНИЯ

**Аннотация.** В статье рассмотрены примеры объемно-планировочных и конструктивных решений каркасных зданий при строительстве в регионах с вечной мерзлотой. Проанализированы наиболее типовые схемы и методики решения задач, связанных с компенсацией деформаций при циклических замораживаниях и оттаиваниях, температурным влиянием на состояние фундаментов, а также составлением расчетных схем фундаментов и надфундаментных конструкций с учетом факторов действительной эксплуатации. Освещена проблематика оценки технического состояния фундаментов и составления математических моделей для расчета конструкций методом конечных элементов в условиях вечной мерзлоты. Разработана программа численных экспериментальных исследований, позволяющая получить искомые зависимости напряженно-деформированного состояния и создать расчетную модель, адекватно отвечающую реальной эксплуатации конструкций в вечной мерзлоте. Приведены разработанные авторами матрицы варьируемых факторов, на основании расчета по которым возможно выполнить учет дополнительных факторов, возникающих в конструкциях при нарушении однородности мерзлого основания. Даны предпосылки по составлению наиболее корректной расчетной схемы для моделирования поведения фундаментов на мерзлых грунтах. Предложена методика учета возможных температурных осадков основания на распределение внутренних силовых факторов в надфундаментной конструкции.

**Ключевые слова:** вечная мерзлота, каркасная система, напряженно-деформированное состояние, осадка, основания.

**Введение.** Интенсивное развитие методов строительства в условиях вечной мерзлоты с двадцатого века позволило существенно расширить экономическую деятельность, а также способствовало активному росту строительства городов в северной части России. Здесь созданы такие крупные городские промышленные комплексы, как Якутский, Воркутинский, Норильский и Магаданский. В связи с тем, что большое количество ресурсов нашей страны залегают в недрах северных регионов, нельзя оспорить актуальность строительного освоения территорий, расположенных в УВМ. Однако повышение плотности застройки, в свою очередь, приводит к изменению свойств оснований самих сооружений и негативно сказывается на их устойчивости. Также в исследованиях российских мерзловедов конца XX–начала XXI в. особое внимание уделялось влиянию потепления климата на прочность и устойчивость мерзлых оснований [1–5].

Дальнейшее освоение территории, расположенной на мерзлых грунтах, а также поддержание функционирования уже имеющейся инженерной инфраструктуры требуют углубленного изучения закономерностей взаимодействия возводимых зданий с мерзлым основанием. В связи с возрастанием темпов освоения регионов в УВМ вопросы повышения устойчивости, надежности и

долговечности сооружений, возводимых в сложных природно-климатических и инженерно-геологических условиях, приобретают большое практическое значение.

Для оптимизации подходов к проектированию зданий и сооружений в северных широтах первостепенной задачей является изучение влияния отдельных процессов на строительство, определение мерзлотно-гидрогеологических особенностей грунта с целью и выявления наиболее оптимальных путей решения проблемы возведения зданий в сложных инженерно-геологических условиях. При разработке обоснования проектных решений возведения зданий в условиях холодных регионов целесообразно выполнять предпроектные и технологические проработки вариантов устройства фундаментов с достаточным запасом и учетом всех негативных процессов, возникающих в многолетнемерзлых грунтах [1].

Необходимость выполнения совместных расчетов особенно важна для современного уровня развития строительной науки, при котором благодаря внедрению современных методов расчетов и новейших материалов была достигнута возможность проектирования строительных конструкций с минимальными запасами прочности. В таких условиях незначительное увеличение напряжений за счет совместной работы здания и основания может приводить к появлению

трещин и снижению общей надежности конструкции [6–9].

Для учета совместной работы надфундаментных конструкций и фундаментов на деформируемом основании необходимо создать объективный и надежный математический аппарат исследования элементов, учитывающий совместно изменяющееся во времени напряженно-деформированное состояние элементов каркаса. Данное обстоятельство способствует более пристальному вниманию к применяемым технологиям и материалам с учетом максимального использования инновационных разработок.

Целью исследования является определение особенностей строительства зданий в условиях вечной мерзлоты, изучение влияния фундаментов и грунтов в УВМ на напряженно-деформированное состояние надземной части здания. Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи: 1) выполнить анализ результатов исследований научных публикаций по данной теме; 2) проанализировать влияние взаимодействия грунтов и фундамента в условиях вечной мерзлоты на НДС каркаса здания; 3) разработать компьютерную модель для выполнения исследований взаимодействия системы "основание-фундамент-сооружение" в средних широтах и районах вечной мерзлоты; 4) исследовать на расчетной модели механизмы взаимодействия системы, оценить параметры НДС.

Объект исследования представляет собой взаимодействие под нагрузкой надземной части, в виде каркаса здания, с фундаментной конструкцией и грунтами основания в УВМ и при ее отсутствии. Предметом исследования является напряженно-деформированное состояние элементов каркаса.

**Материалы и методы.** Основными методами исследования стали комплексный подход к изучению текстового, иллюстративного материала в отечественных и зарубежных строительных изданиях, позволивший выявить тенденции проектирования, а также ряд сравнительных характеристик. В качестве материалов для исследования используются нормативно-правовые источники, доклады, статьи, книги и методические рекомендации. Применяемый теоретический метод исследования, опирается на комплексный подход. Он включает в себя изучение работ по исследованию вопросов разработки оптимальных конструктивных решений зданий на мерзлых грунтах и их применение на практике; анализ существующей нормативно-правовой документации и конкретных примеров реализации конструктивно-технических требований на территории субъектов Российской Федерации, расположен-

ных в УВМ. Все это позволило выявить предпосылки основных правил строительства зданий на вечной мерзлоте, определить проблематику и сформировать план для дальнейшего исследования с помощью численного моделирования в программных комплексах ЛИРА-САПР, САП-ФИР.

**Основная часть.** Весомый вклад в исследование строительства в условиях вечной мерзлоты внес коллектив научно-исследовательского, проектно-изыскательского и конструкторско-технологического института оснований и подземных сооружений им. Н.М. Герсеванова – институт ОАО «НИЦ «Строительство». Институтом были разработаны теория и методы расчета оснований и фундаментов по первому и второму принципу на вечномерзлых грунтах, обоснованы методы устойчивого строительства на этих грунтах и принципы использования их в качестве оснований зданий и сооружений.

Первоначальный опыт строительства на вечной мерзлоте показал, что богатая льдом вечная мерзлота неспособна поддерживать теплогенерирующие сооружения, построенные с использованием стандартных инженерных методов. Сооружения, возведенные в период 1935–1937 годов, получили деформации, вызванные неравномерной осадкой тающих ледяных отложений всего через несколько лет после строительства. В результате правила строительства на вечной мерзлоте, изданные в 1939 году, прямо запрещали строительство из несъемного бетона и кирпичные сооружения на замерзших отложениях с любым обнаруживаемым количеством грунтового льда. Под строительство промышленных объектов искали только скальные основания, но их было мало (рис. 1) [1].

Строительство полностью функционирующих северных городов началось в конце 1940-х годов. Согласно этим планам, города должны были включать 3–5-этажные кирпичные здания в неоклассическом стиле, расположенные в 7–10 прямоугольных городских кварталах, каждый площадью от 1,5 до 4 гектаров. Строительные работы включали ручную выемку замерзшего осадочного материала и возведение типичных отапливаемых подвалов на скальной породе. В районах с толстым осадочным слоем (>10 м) фундаменты не были сплошными, а состояли из нескольких бетонных опор 2×2 м, закрепленных на скальной породе и служащих основанием для горизонтальных балок, поддерживающих здания [2].

Несмотря на прочный скальный фундамент, проблемы, связанные с вечной мерзлотой, возникли сразу после строительства. Осадки образо-

вывалились вокруг отапливаемых подвалов и способствовали накоплению воды, вызывая регулярное затопление подвалов. В качестве меры по

смягчению последствий пришлось переоборудовать сложную дренажную систему вокруг каждого здания.



Рис. 1. Строительство Норильского медно-никелевого комбината

[Источник: [https://kislород.life/question\\_answer/kak\\_v\\_norilске\\_nauchilis\\_stroit\\_na\\_merzлоте/](https://kislород.life/question_answer/kak_v_norilске_nauchilis_stroit_na_merzлоте/)]

На основе этого первоначального опыта были разработаны три руководящих принципа городского планирования на вечной мерзлоте [2]:

1) Чтобы свести к минимуму негативные последствия таяния вечной мерзлоты, все инженерные коммуникации должны быть размещены в одном подземном коллекторе, проходящем по центру улиц на расстоянии не менее 10–12 м от зданий.

2) Чтобы свести к минимуму плотность инженерных сетей, здания должны быть как можно больше и иметь свободный доступ к улицам с коммунальными службами.

3) Использование неотапливаемых, вентилируемых подвалов предпочтительнее для всех зданий.

В 1956 году Владимир Ким предложил более эффективный метод строительства на вечной мерзлоте. Этот фундамент состоял из нескольких рядов железобетонных свай, вмёрзших в вечную мерзлоту, и набора бетонных балок (ростверков), уложенных поверх фундаментных свай на высоте 1,2–1,8 м над землей (рис. 2). Подъема ростверка эффективно обеспечивал свободную вентиляцию для отвода тепла, выделяемого конструкцией, от земли, подверженной вечной мерзлоте [3].



Рис. 2. Дом с конструкцией свайного фундамента с высоким ростверком в г. Якутске

[Источник: <https://ardexpert.ru/article/5072>]

С 1959 года свайный фундамент стал доминирующим методом строительства на вечной мерзлоте. Этот метод строительства был в три раза быстрее, требовал в 6–10 раз меньше рабочей силы и был вдвое дешевле фундаментов типа "столб на подушке" и "столбы на скальной породе", которые ранее использовались. Это способствовало ускорению темпов развития северных городов. В период 1960–1990 годов ежегодно возводилось примерно 18–20 новых жилых зданий. Первоначально большинство сооруже-

ний состояли из пятиэтажных бетонных панельных зданий, позже высота зданий увеличилась до 9–12 этажей (рис. 3) [4].

При проектировании и строительстве зданий в условиях вечной мерзлоты следует придерживаться основных принципов их возведения [5–9]:

1. Несущие и ограждающие строительные конструкции выполняются, как правило, с максимальной степенью сборности и тенденцией к применению легких транспортабельных и быстро возводимых изделий и деталей.



2. Особое внимание уделяется теплозащитным свойствам наружных ограждающих конструкций остовов зданий. Утепленные наружные ограждающие конструкции стен, заполнение дверных и оконных проемов изготавливаются воздухонепроницаемыми. Конструкции окон и

дверей применяются с обязательным утеплением притворов. В соответствии с теплотехническими расчетами в районах Крайнего Севера применяется тройное остекление в оконных и витражных блоках.



Рис. 3. Пятиэтажные и девятиэтажные жилые здания из бетонных панелей в г. Норильске  
[Источник: <https://kurl.ru/dNeiD>]

3. Геометрия крыш зданий выбирается несложной формы и простого профиля, что исключает образование больших снеговых отложений «снеговых мешков». Наружные боковые поверхности фасадов зданий выполняют плоской или криволинейной формы, без усложнений задерживающих снег.

4. В районах с наиболее суровым климатом продолжительного зимнего периода, современными нормативными источниками не допускается устройство лоджий и балконов (рис. 4). При проектировании входных групп гражданских и общественных зданий предусматриваются двойные тамбуры.



Рис. 4. Дома без балконов в г. Норильске  
[Источник: <https://masterok.livejournal.com/6892492.html>]

5. В приоритете проектные решения, в которых при максимальном сохранении функционального назначения и основных технологических процессов здания или сооружения, обеспечивается минимальная боковая поверхность, контактирующая с морозным воздухом. При проектировании предпочтение отдается простым в плане и по высоте геометрическим формам контуров зданий.

6. В зданиях с жесткой конструктивной схемой устраивают поэтажные железобетонные, или

армокирпичные пояса, связанные с перекрытиями. Кроме того, продольные и поперечные стены рекомендуется располагать симметрично относительно главных осей здания, не допуская излома стен в плане и ослабления их нишами и каналами. Поперечные несущие стены или рамы располагают на расстоянии не более 12 м друг от друга. Проемы в стенах принимают одинаковых размеров и размещают их равномерно.

7. Для зданий с податливой конструктивной схемой применяют разрезные конструкции с минимально допускаемыми жесткостями на изгиб и сдвиг в вертикальной плоскости. Многоэтажные и одноэтажные здания с пролетами до 12 м, как правило, проектируют по жесткой конструктивной схеме, а одноэтажные с пролетами более 12 м – по податливой схеме.

Что касается проектирования оснований и фундаментов зданий, возводимых в условиях вечной мерзлоты, работа выполняется на основе результатов специальных инженерно-геологических изысканий, которые включают специальные геокриологические и гидрогеологические изыскания. Они учитывают конструктивные и технологические особенности проектируемых сооружений, их тепловое и механическое взаимодействие с многолетнемерзлыми грунтами оснований и возможные изменения геокриологических условий в результате строительства и эксплуатации [10–16].

Использование вечномерзлых грунтов в качестве основания зданий базируется на двух принципах. Первый принцип заключается в сохранении мерзлого состояния грунта. Его целью является сохранение первоначального состояния основания не только во время строительства, но и на протяжении всей эксплуатации здания. Для этого предпочтительно применять свайный или столбчатый фундамент, при условии, что верхний слой грунта не изменит своих свойств под воздействием тепла от здания. Для этого подполье делают холодным и вентилируемым. Предусматривают продухи в забивке или цокольной части дома. Такая система позволяет осуществлять естественную вентиляцию и поддерживать оптимальные условия в подполье, что в свою очередь обеспечивает сохранение грунта в мерзлом состоянии (рис. 5). Также возможен вариант выполнения сплошного слоя теплоизоляции с высокими изоляционными свойствами под всей площадью здания [17–20].



Рис. 5. Проветриваемое подполье в жилом доме [Источник: <https://dzen.ru/a/ZF-4jF4IjXaBqpV7>]

Второй принцип допускает последующее оттаивание грунта. Этот метод применяется не так

часто. Необходимо убедиться, что грунт на строительной площадке не обладает высокими пучинистыми и просадочными свойствами, в виду чего в процессе изменения температуры могут произойти значительные деформации. Грунт предварительно оттаивают перед установкой фундамента, либо проводят все необходимые расчеты и допускают, что основание сможет оттаивать во время использования постройки [21–23].

При строительстве на вечномерзлом грунте, определение правильной глубины заложения фундаментов играет важную роль. Для различных типов фундамента это значение отличается [24]:

- при использовании свайных фундаментов, глубина заложения должна быть на два метра больше, чем толщина слоя грунта, который подвергается сезонным оттаиваниям и промерзаниям. Расчет основывается на предположении, что вечномерзлый грунт обеспечит требуемое значение сопротивления на сжатие.

- для всех остальных типов фундаментов, глубина заложения должна быть больше на один метр, чем толщина сезонно оттаивающего слоя грунта.

- при возведении здания на насыпном грунте с определенными характеристиками, значение глубины закладки подошвы не нормируется и определяется исходя из условий строительства.

Основным типом фундаментов для вечномерзлых грунтов являются висячие сваи, обеспечивающие несущую способность за счет смерзания боковой поверхности с грунтом и опирания острия сваи. Анализ литературы показал, что необходимо стремиться к созданию буроопускных свай с неровной боковой поверхностью, так как именно эта конфигурация позволяет существенно увеличить несущую способность грунтов основания. Грунт под рёбрами таких свай работает на сжатие, что намного эффективнее, чем работа грунта на сдвиг по поверхности смерзания с материалом обычной буроопускной сваи [25–30].

Однако бывают случаи, когда целесообразнее всего применить другой тип фундаментов. Например, когда здание возводится на подсыпке, на площадках с неглубоким залеганием кровли разрушенных скальных пород применяются сборные столбчатые фундаменты.

Ленточные фундаменты применяют в том случае, когда их подошвы проектируются в пределах насыпи из непучинистых грунтов. В районах Крайнего Севера Российской Федерации наибольшее распространение получили ленточ-



ные фундаменты на песчаных подсыпках с применением теплоизоляционных материалов. Это позволяет снизить затраты труда и денежных средств, более равномерно воспринимать деформации.

Известно также применение поверхностных вентилируемых пространственных фундаментов – оболочек. Они обладают рядом преимуществ, среди которых: совместимость функции несущей и охлаждающей грунт конструкции; возведение фундаментов без нарушения мерзлотно-грунтовых условий на строительных площадках. Это значительно упрощает процесс строительства, позволяя сэкономить время и ресурсы. Такой подход является эффективным решением для различных строительных объектов и помогает ликвидировать временной технологический разрыв, который необходим при устройстве свай, что обеспечивает более эффективную организацию работ [31–37].

Разработка эффективных фундаментов в виде вентилируемых оболочек для строительства на вечномёрзлых грунтах была проведена под руководством Гончарова Ю.М. Так в конце 1980-х годов в городе Игарка Красноярского края для строительства теплого гаража-стоянки транспортного предприятия, была разработана инновационная конструкция - пространственный вентилируемый сборно-монолитный фундамент-оболочка в сочетании с вентиляционными каналами (рис. 6). Главной целью данного проекта было снижение или полное исключение сезонного оттаивания подстилающих мерзлых грунтов основания [38].



Рис. 6. Часть строящегося здания АБК на поверхностном фундаменте-оболочке в г. Норильск  
[Источник: <https://kurl.ru/yQdKX>]

Вопросам совершенствования теоретических моделей взаимодействия фундамента с грунтовым основанием, выбора наиболее адекватных расчетных методов оценки осадок фундаментов, экспериментального исследования деформативности грунтов посвящено большое количество исследований. Для того, чтобы появилась возможность учитывать деформацию оснований как можно точнее, необходимо оценить их

влияние на НДС зданий. Не редко труднодоступность района строительства обусловлена сложностью грунтовых условий относящихся к ряду «неудобных», как вечномёрзлые грунты. С этих позиций, становится весьма актуальным проблема учета влияния неравномерных деформаций основания на напряженно-деформированное состояние (НДС) верхнего строения, а именно, на работу пространственных конструкций [39–43].

При определении напряженно-деформированного состояния (НДС), с одной стороны, встает вопрос об учете ярко выраженных реологических свойств мерзлых грунтов, так как при действии внешней нагрузки в мерзлых грунтах всегда возникают необратимые перестройки структуры, вызывающие релаксацию напряжений и деформацию ползучести даже при очень небольших нагрузках, то есть изменение прочностных и деформационных свойств мерзлых грунтов во времени. С другой стороны, в настоящее время не существует единой общепринятой теории, которая позволяла бы определить НДС грунтовой среды с учетом всех свойств конкретного грунта, поэтому в инженерных расчетах используется главным образом теория линейно-деформированной сплошной среды. Так как пересчет НДС планируется производить каждый месяц выбранного интервала прогноза (каждый месяц), и параметры среды будут меняться, то учет реологических свойств грунтов в небольшом интервале времени можно не учитывать в виду малости значений этих изменений.

Все основания и фундаменты (также в условиях вечной мерзлоты) следует рассчитывать на силовые воздействия по двум группам предельных состояний: по первой — по несущей способности и второй — по деформациям (осадкам, прогибам и пр.), затрудняющим нормальную эксплуатацию конструкций и оснований или снижающим их долговечность, а элементы железобетонных конструкций — и по трещиностойкости.

К первой группе предельных состояний основания относятся:

- потеря формы и положения;
- хрупкое или вязкое разрушение;
- разрушение под совместным действием силовых факторов и не благоприятных факторов внешней среды;
- резонансные колебания;
- чрезмерное развитие пластических деформаций.

Ко второй группе предельных состояний относятся:

- состояния основания, затрудняющие нормальную эксплуатацию здания или сооружения;
- состояния основания, снижающие долго-

вечность здания или сооружения вследствие появления недопустимых перемещений (осадок, прогибов, углов поворота).

Однако при расчете фундаментов в мерзлых грунтах следует учитывать действие дополнительных факторов, преобладающих в УВМ. Так при проектировании оснований и фундаментов зданий и сооружений, возводимых на вечномерзлых грунтах, должны выполняться статические и теплотехнические расчеты. При этих расчетах следует учитывать принятый в проекте принцип использования вечномерзлых грунтов в качестве основания и взаимное тепловое и механическое воздействия здания (сооружения) и основания.

Целью статического расчета является обеспечение прочности и устойчивости, а также эксплуатационной надежности здания или сооружения. Целью теплотехнического расчета является определение необходимого теплового режима грунтов основания в зависимости от принятого принципа использования этих грунтов и установление мероприятий, обеспечивающих соблюдение этого режима.

Таким образом, при расчете по предельным состояниям несущая способность основания и его ожидаемые деформации должны устанавливаться с учетом их температурного режима, а при принципе I – также и с учетом продолжительности действия нагрузок и реологических свойств грунтов, то есть изменения их свойств во времени.

Учет температурного режима основания осуществляется теплотехническим расчетом. При использовании грунтов основания по принципу I в результате таких расчетов определяется температура мерзлых грунтов, в зависимости от которой назначаются расчетные, прочностные и деформационные характеристики грунтов.

При использовании вечномерзлых грунтов по принципу I расчет оснований должен производиться:

- по несущей способности – для твердомерзлых грунтов;
- по несущей способности и по деформациям – для пластично мерзлых и сильнольдистых грунтов, а также подземных льдов.

Твердомерзлые грунты являются малосжимаемыми, и у них деформации объемного сжатия и деформации сдвиговой ползучести при напряжениях, не превышающих расчетные сопротивления, будут, как правило, незначительны.

Поэтому при нагрузках, меньших расчетных сопротивлений, осадки оснований, сложенных твердомерзлыми грунтами, как правило, не превысят предельно допускаемых значений. Соответственно расчет таких оснований по второй

группе предельных состояний можно не производить, ограничившись расчетом только по прочности (по несущей способности).

Пластично-мерзлые или сильнольдистые грунты, а также подземные льды обладают сильно выраженными вязкими свойствами и способны развивать большие деформации ползучести (включая деформации незатухающей ползучести). Кроме того, пластично-мерзлые или сильнольдистые грунты, а также подземные льды являются сжимаемыми и способны давать ощутимые осадки уплотнения. Поэтому основания, сложенные пластично-мерзлыми или сильнольдистыми грунтами, а также подземными льдами, рассчитываются по двум группам предельных состояний – по несущей способности и по деформациям.

Предельно длительное сопротивление мерзлых грунтов (кроме сильнольдистых и льда) рассматривается как нормативное сопротивление  $R_{\infty} = R^H$ .

Характерной особенностью мерзлых грунтов в силу своей криогенной текстуры является то, что даже при отрицательной температуре их механические свойства существенно зависят не только от гранулометрического состава и влажности, но и от их температуры. При оттаивании мерзлых грунтов происходит качественный скачок в их механическом поведении. Они дают значительную просадку в основаниях сооружений и приводят к потере устойчивости склонов и откосов, сложенных вечномерзлыми грунтами. Это обусловлено ослаблением цементирующих свойств замерзшей воды между частицами, что приводит к потере структуры и к большим объемным и сдвиговым деформациям.

По внешнему виду компрессионные кривые оттаивающих грунтов совпадают с компрессионными кривыми просадочных грунтов. Поэтому для описания механических свойств во многом можно воспользоваться аналогичными принципами построения механической модели оттаивающего грунта. Вместе с тем, очевидно, что процесс оттаивания мерзлых грунтов существенно отличается от процесса замачивания просадочных грунтов. Все эти особенности следует учитывать при прогнозировании НДС мерзлых и оттаивающих грунтов.

При оттаивании мерзлые и вечномерзлые грунты теряют свою прочность при сдвиге и претерпевают значительные объемные деформации из-за отжатая избыточной поровой воды, образовавшейся при оттаивании льда в межчастичном пространстве. Вследствие оттаивания мерзлого основания сооружения могут испытывать значительные и неравномерные осадки, а порой и те-

рять свою устойчивость. Драчков Д.С. в своей работе «Особенности строительства зданий и сооружений на многолетнемерзлых грунтах» пред-

ставил характерные зависимости  $\epsilon$ - $\sigma$  при компрессионном сжатии и  $\tau$ - $\sigma$  при плоском срезе мерзлого и оттаявшего грунтов (рис. 7).

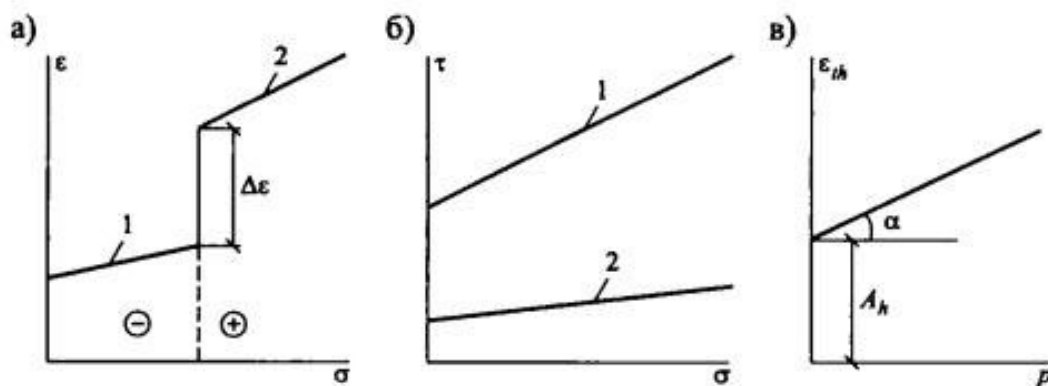


Рис. 7. А) зависимости  $\epsilon$ - $\sigma$ ; б)  $\tau$ - $\sigma$ ; в)  $\epsilon_{th}$ - $p$  мерзлого грунта до (1) и после (2) оттаивания

Из приведенных графиков следует, что относительная деформация оттаивающего грунта  $\epsilon_{th}$  равна:

$$\epsilon_{th} = (h_f - h_{th}) / h_f = A_{th} + \delta \cdot p,$$

где  $h_f$  и  $h_{th}$  – высота образца в мерзлом и талом состояниях соответственно, в условиях компрессионного сжатия,  $A_{th}$  и  $\delta = \text{tg}\alpha$  соответственно коэффициент оттаивания и сжимаемости.

Следовательно, осадка оттаявшего грунта состоит из осадки оттаивания, не зависящей от нагрузки и характеризуемой коэффициентами  $A_{th}$  и осадки уплотнения, развивающейся пропорционально приложенной нагрузке и характеризуемой коэффициентами  $\delta$ .

При прогнозировании НДС оттаивающих оснований сооружений не следует все сводить к проблеме прогноза осадок оснований, обусловленных одномерным уплотнением. Наряду с этим в оттаивающем массиве грунтов под воздействием местной нагрузки развиваются значительные сдвиговые деформации, которые также приводят к просадкам. Карлов В.Д. в своей работе представил механизм изменения НДС мерзлого грунта при оттаивании в условиях сложного НДС следующим образом (рис. 8).

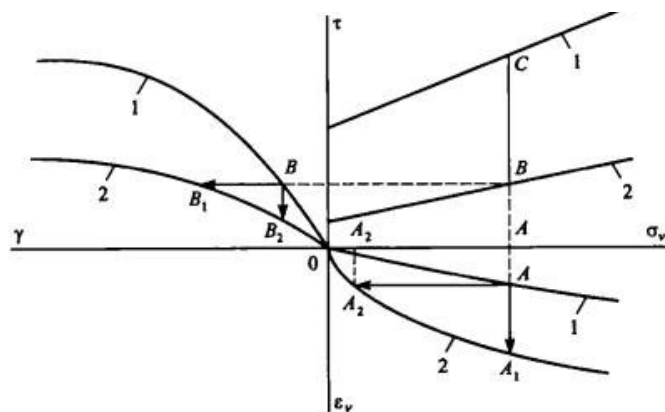


Рис. 8. К механизму изменения НДС мерзлого грунта при его оттаивании в условиях трехосного НДС при приращении температуры на  $\Delta\theta$  в условиях свободной и фиксированной деформаций сдвига и объема: 1,2 – кривые зависимости  $\tau$ - $\gamma$ ,  $\epsilon_v$ - $\sigma_v$  и  $\tau$ - $\sigma$  в мерзлом и талом состояниях грунта соответственно

Предположим, что образец в мерзлом и оттаявшем состояниях в условиях трехосного сжатия подвергся нагружению по траектории OABC и OAB соответственно. Тогда получим кривые  $\gamma$ - $\tau$  и  $\epsilon_v$ - $\sigma_v$  соответственно для мерзлого и оттаявшего состояний.

Если в точке A при гидростатическом обжатии увеличить температуру до  $t > 0$  °C, то получим

дополнительную объемную деформацию  $A\epsilon_y = AA_1$ . Если же в точке A на кривой 1 зафиксировать объемные деформации и увеличить температуру, то получим отрицательное приращение сжимающих напряжений  $\Delta\sigma_v = AA_2$ . Если в точке B при девиаторном нагружении по кривой 1 зафиксировать напряжения и оттаивать грунт, то полу-



чим дополнительные сдвиговую  $\Delta\gamma = BB1$  и объемную  $\Delta\varepsilon_v = AA1$  деформации. Если же в точке В по кривой 1 зафиксировать деформации и оттаивать грунт, то получим снижение касательных  $A_t = BB1$  и нормальных  $\Delta\sigma_v = AA2$  напряжений).

Из приведенного здесь анализа НДС мерзлого грунта, при переходе его в талое состояние грунта, видно, что в отличных от условий компрессионного сжатия условиях трехосного НДС процесс деформирования протекает сложнее. Наряду с объемными деформациями при оттаивании мерзлого грунта развиваются значительные сдвиговые деформации, которые могут являться основной причиной больших и неравномерных осадок оснований сооружений. Поэтому при изучении механических свойств мерзлых и оттаивающих грунтов следует в обязательном порядке провести испытания на сдвиг и на срез мерзлых грунтов в оттаявшем состоянии.

Известно, что общая осадка на оттаивающем основании складывается из осадки  $S_p$ , обусловленной дополнительным давлением на грунты основания от фундамента, и осадки вызванной действием собственного веса  $S_{th}$ , то есть

$$S = S_p + S_{th}.$$

В настоящее время существует три основных метода расчета осадок фундаментов: метод линейно деформируемого слоя (метод проф. К.Е. Егорова), метод послойного суммирования и метод одномерного компрессионного сжатия (частный случай метода эквивалентного слоя проф. Н.А. Цытовича). Все вышеназванные методы расчета осадок основаны на линейной зависимости деформаций от напряжений. Принципиальные отличия этих методов расчета заключаются в учете природных напряжений грунтов от собственного веса, способе определения сжимаемой толщи грунтов и определении распределения напряжений по глубине от внешнего давления. В практике проектирования оснований и фундаментов наиболее распространенным и авторитетным считается метод послойного суммирования.

Осадка при оттаивании мерзлых грунтов очень важный показатель, который необходим при расчетах оснований и фундаментов по второму предельному состоянию (по деформациям). Особенно это необходимо, если рекомендуется вести строительство с оттаиванием многолетнемерзлых грунтов в основании сооружений.

Для расчета величины относительного сжатия вечномерзлого грунта необходимо иметь такие показатели как коэффициент оттаивания  $A_{th}$  и коэффициент сжимаемости или уплотнения оттаивающего грунта  $\delta_i$ .

Коэффициенты  $A_{th}$  и  $\delta_i$ , характеризующие сжимаемость оттаивающего грунта, могут быть

определены горячими штампами в полевых условиях или методом компрессионных испытаний в лабораторных условиях. Допускается определять осадку при оттаивании расчетным методом.

Для определения первой и второй частей осадок используется традиционный метод элементарного послойного суммирования:

$$S = \sum_{i=1}^n [A_{th,i} + \delta_i (\sigma_{zp,i} + \sigma_{zg,i})] h_i,$$

где  $A_{th,i}$ ,  $\delta$  – соответственно коэффициенты оттаивания и сжимаемости  $i$ -ого слоя;  $\sigma_{zp,i}$  и  $\sigma_{zg,i}$  – вертикальные напряжения от действия внешней нагрузки и собственного веса соответственно.

При таком подходе к расчету осадки оттаивающего основания учитывается только один компонент напряжений  $\sigma_z$  и не учитывается возможность бокового расширения. Однако, очевидно, что осадка (просадка) оттаивающего грунта может произойти не столько из-за одномерного уплотнения, сколько сдвиговыми деформациями слабого водонасыщенного грунта, каким является мерзлый грунт сразу после оттаивания.

Поэтому наряду с традиционными методами определения осадок оттаивающего основания, основанного на компрессионных испытаниях, целесообразно использовать более прогрессивные методы, учитывающие свойства грунтов при уплотнении:

$$S = \sum_{i=1}^n \left[ A_{th,i} + \frac{\tau_{xz,i}}{2G_i} + \frac{\sigma_i}{K_i} \right] h_i,$$

где  $\tau_{xz,i} = \sigma_{zp,i} = \sigma_i$ ,  $\sigma_i = (\sigma_{xp,i} + \sigma_{yp,i} + \sigma_{zp,i})/3$ ,  $G_i$  и  $K_i$  – модули деформаций  $i$ -ого слоя оттаивающего грунта, которые на порядок меньше модулей деформации того же грунта в мерзлом состоянии.

Приведенные выше выражения определяют только лишь стабилизированную осадку, что необходимо для принятия конструктивных решений по проектированию зданий и сооружений, возводимых на мерзлых и оттаивающих основаниях (рис. 9).

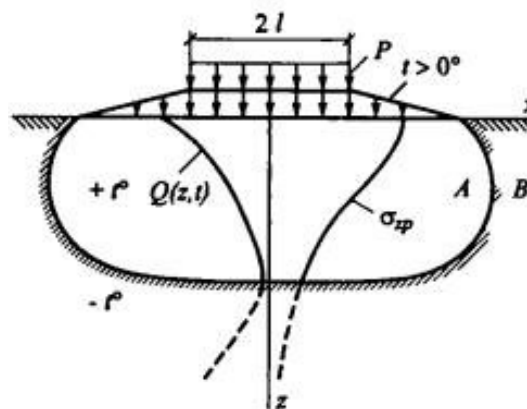


Рис. 9. Расчетная схема для определения НДС основания от действия местной нагрузки в процессе оттаивания

Нагрузки и воздействия на основания, передаваемые фундаментами зданий и сооружений или их отдельных элементов, устанавливаются в соответствии с СП 25.13330.2020 «Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах». В дополнение к указаниям нагрузки на основания допускается определять без учета их перераспределения надфундаментной конструкцией и принимать в соответствии со статической схемой здания или сооружения при использовании вечномерзлых грунтов в качестве основания по принципу I, если эти грунты находятся в твердомерзлом состоянии.

Нагрузки, передаваемые на грунты основания, используемые по принципу II, определяются, как правило, расчетом из условия совместной работы здания (сооружения) и основания или фундамента и основания.

Твердомерзлые грунты (кроме сильнольдистых) рассматриваются как малосжимаемые, и потому при использовании основания по принципу I определение нагрузок производится без учета жесткости конструкций здания или сооружения.

Нагрузки на основания, которые рассчитываются по деформациям, как правило, определяются с учетом их перераспределения конструкциями здания (сооружения). Совместная работа здания (сооружения) и основания может не учитываться, когда ожидаемые деформации от

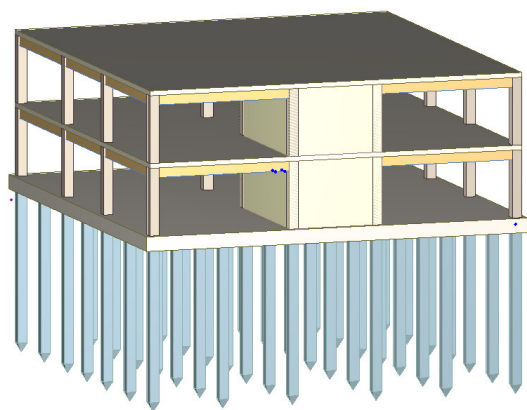


Рис. 10. Предлагаемая модель здания (общий вид)

В качестве варьируемых параметров предлагаются структура и состав грунтовых массивов, глубина заложения фундаментов и погонная жесткость стержневых элементов расчетной схемы надземной части здания.

#### Выводы.

1. Проведенный в статье обзор говорит о том, что большой опыт и эволюция методов стро-

нагрузок, определенных без учета жесткости конструкций, не превосходят предельные значения.

При учете совместной работы здания (сооружения) и основания или фундамента и основания, используемого по принципу II с допущением оттаивания грунтов в процессе эксплуатации, воздействие неравномерных деформаций основания, вызванных оттаиванием вечномерзлых грунтов, рассматривается как длительно действующее. При расчете конструкций здания (сооружения) по 1-й группе предельных состояний усилия в них от этого воздействия рассчитываются с коэффициентом перегрузки  $n=1$ .

Моделирование НДС конструкций здания вследствие неравномерных деформаций основания, возникающих в процессе просадки и деградации мерзлоты, позволит решить актуальную задачу по оценке несущей способности и прогнозированию дальнейшей эксплуатационной пригодности. Для выполнения исследования взаимодействия системы «основание – фундамент – здание» планируется выполнить компьютерное моделирование в программе САПФИР. В качестве моделируемого объекта будет каркасное здание с традиционными конструктивными решениями, жесткость которого обеспечивается за счет соединения монолитного перекрытия с колоннами (рис. 10, 11). Расчет модели будет производиться в ЛИРА-САПР.

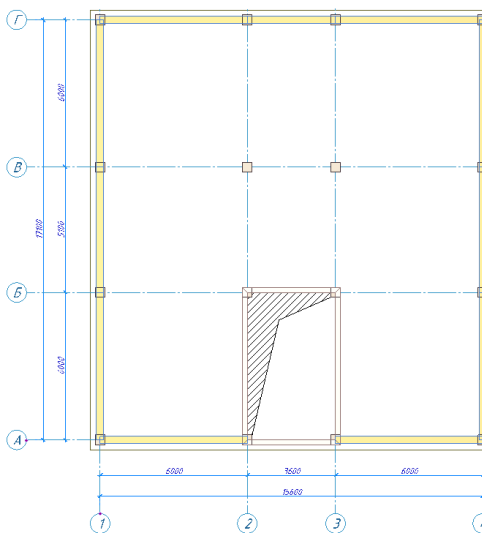


Рис. 11. Схема плана здания

ительства в условиях вечной мерзлоты на протяжении двадцатого века привела к возможности существенно расширить строительную деятельность в данных условиях. Однако следует обратить внимание на то, что возведение зданий с учетом условий вечной мерзлоты обладает рядом особенностей, которые включают специальные требования к проектированию, строительству и эксплуатации сооружений.

2. В виду большого количества выпадающего снега и значительных ветровых нагрузок, при их проектировании зданий предпочтение отдается геометрическим формам контуров зданий. В проектах стремятся к созданию минимальной боковой поверхности, контактирующей с морозным воздухом, при максимальном сохранении функционального назначения и основных технологических процессов здания.

3. Учеными и специалистами, занимающимися вопросами мерзлотоведения, совместно с архитекторами, строителями и технологами, разработаны два принципа устройства оснований с использованием многолетнемерзлых грунтов: I принцип – вечно мерзлое состояние грунта основания сохраняют в течение всего периода строительства и эксплуатации здания или сооружения; II принцип – вечномерзлые грунты оснований используют в оттаявшем состоянии с оттаиванием на расчетную глубину до начала возведения или в процессе эксплуатации здания. Конкретный выбор делается при сопоставлении технико-экономических расчетов и эффективности рассматриваемых решений.

4. Требования современных строительных технологий ставят задачи совершенствования методов исследования многолетнемерзлых грунтов и разработке эффективных конструкций фундаментов, важнейшей целью которых более эффективно использовать потенциал несущей способности грунтов в УВМ с учетом перспективы климатических изменений. Рассмотренные конструктивные решения фундаментов, позволяют повысить эффективность использования потенциальной несущей способности мерзлых грунтов оснований. Наиболее перспективные из них – сваи с неровной боковой поверхностью (винтовые, с арматурными стержнями, приваренными к стволу сваи; рифленые).

5. Оценка напряженно-деформированного состояния конструктивных элементов здания при деформациях на мерзлых грунтах представляет собой сложную задачу, решить которую становится возможным с применением компьютерных программных комплексов. В связи с этим было принято решение выполнить расчетную модель в программном комплексе САПФИР с последующим расчетом в ЛИРА-САПР для анализа влияния взаимодействия грунтов и фундамента в различных грунтовых условиях на НДС каркаса здания.

6. По сей день главными вопросами в развитии данного направления остается изучение влияния отдельных процессов на строительство, в частности, можно выделить вопрос о влиянии грунтового основания и фундамента в УВМ на напряженно-деформированное состояние каркаса здания. Результаты планируемого исследования могут позволить оценить достоверность

выполняемых расчетов и определить необходимость учета ряда факторов при расчете каркаса. Данные также могут помочь в решении вопросов о повышении устойчивости, надежности и долговечности зданий, возводимых в условиях вечной мерзлоты, что приобретает большое практическое значение.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тазаян Ю. Строительство зданий и сооружений на вечной мерзлоте // Молодой ученый. 2020. № 48. С. 67–72.
2. Шикломанов Н.И., Стрелецкий Д.А., Гребенец В.И., Луис Сутер. Покорение вечной мерзлоты: развитие городской инфраструктуры в Норильске, Россия // Полярная география. 2017. С. 22–32.
3. Ким М.В. Фундаменты капитальных зданий на мерзлоте в Норильске. Красноярск: Красноярское книж. изд-во, 1960. 19 с.
4. Алёшина Т.А. Строительство на мерзлоте: опыт и новшества [Электронный ресурс] URL: sibforum.sfu-kras.ru/node/106.
5. Алексеева О.И., Балобаев В.Т., Григорьев М.Н., Макаров В.Н., Чжан Р.В., Шац М.М., Шепелев В.В. О проблемах градостроительства в криолитозоне (на примере Якутска) // Криосфера Земли. 2007. т. XI. №2. С. 78–83.
6. Охлопкова Т.В., Гурьянов Г.Р., Плотников А.А. Строительство и проектирование зданий и сооружений в условиях вечной мерзлоты // Инженерный вестник Дона. 2018. №4. С. 62–75.
7. Мельников В.П., Мельникова А.А., Аникин Г.В., Иванов К.С., Спасенникова К.А. Инженерные решения в строительстве на вечной мерзлоте в плане повышения энергоэффективности сооружений // Криосфера Земли. 2014. Т. 18. № 3. С. 82–90.
8. Васьковский А.П., Шкляров Н.Д. Конструкции гражданских зданий для строительства на Севере. Л.: Стройиздат, 1979. 136 с.
9. Максимов Г.Н., Смирнов В.Д. К вопросу о возведении жилых зданий в районах распространения вечномерзлых грунтов без проветриваемых подполий // Регулирование температуры грунтов основания с помощью сезоннодействующих охлаждающих устройств : сб. науч. тр. Якутск, 1983. С. 77–81.
10. Цуканов Н.А., Баев М.А., Бабух А.П., Поз Г.М. О некоторых характерных особенностях теплового взаимодействия между массивами вечномерзлых грунтов под отапливаемыми зданиями и снаружи при различных условиях снегоотложения у фундаментов // Вестник Тюм-ГАСУ. 2015. № 4. С. 52–59.
11. Никифорова Н.С., Коннов А.В. Несущая способность свай в многолетнемерзлых грунтах при изменении климата // Construction and

Geotechnics. 2021. Т. 12. № 3. С. 14–24. DOI: 10.15593/2224-9826/2021.3.02

12. Ильичев В.А., Никифорова Н.С., Коннов А.В. Влияние преобразования грунтов криолитозоны на их температурное состояние в основании здания // Жилищное строительство. 2022. № 9. С. 12–17. DOI: 10.31659/0044-4472-2022-9-12-17

13. Рожкова К.В. Численное моделирование аэродинамики и теплового влияния на грунт здания с открытым подпольем при варьировании его размеров // V конференция «Технологии обустройства нефтяных, газовых и газоконденсатных месторождений», г. Томск. 2022. С. 14–24.

14. Грибовский Г.В., Кушнарёв А.Г. О проблеме оценки теплообмена грунта с воздухом с учетом воздействия солнечной радиации для теплотехнических расчетов инженерных сооружений на ММГ // VI конференция геокриологов России «Мониторинг в криолитозоне», г. Москва. 2022. С. 113–121.

15. Nikiforova N.S., Konnov A.V. Forecast of the soil deformations and decrease of the bearing capacity of pile foundations operating in the cryolithozone. International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2022. No. 18. Pp. 141–150. DOI: 10.22337/2587-9618-2022-18-1-141-150

16. Grebenets V., Streletskiy D., Shiklomanov N. Geotechnical safety issues in the cities of Polar Regions. Geography, Environment, Sustainability Journal. 2012. Vol. 5. No. 3. Pp. 104–119.

17. Плотников А.А. Макаров В.И. Методы охлаждения оснований зданий, построенных по принципу сохранения грунтов в мерзлом состоянии (на примере г. Мирного) // ОФМГ. 2017. №5. С. 26–31

18. Горелик Я.Б., Хабитов А.Х., Земеров И.В. Эффективность поверхностного охлаждения мерзлых оснований с применением агрегата принудительной циркуляции хладагента // Криосфера Земли. 2021. Т. XXV. № 4. С. 36–46.

19. Абросимов А.И., Тепляков А.В., Залетаев С.В. Увеличение несущей способности свай путем установки в проветриваемое подполье охладителей грунта // Сб. докл. расширенного заседания Совета по криологии Земли. М., МГУ. 2018. Т. 2. С. 9–15.

20. Gao Q. Effect of a ventilated open structure on the stability of bored piles in permafrost regions of the Tibetan Plateau. Cold Regions Science and Technology. 2020. 178 p.

21. Горелик Я.Б., Земеров И.В. Влияние поверхностного обводнения на температурный режим мерзлых грунтов // Вестн. Тюм. гос. ун-та. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2020. № 1. С. 10–40/ DOI: 10.21684/2411-7978-2020-6-1-10-40.

22. Горелик Я.Б., Романюк С.Н., Хабитов А.Х. Учет совместного теплового действия скважин в кусте при расчете параметров области протаивания мерзлых грунтов // Криосфера Земли. 2019. т. XXIII. № 2. С. 79–87.

23. Функ А.А. Строительство зданий и сооружений в экстремальных климатических условиях: особенности организации работ и используемых стройматериалов // Интернет-журнал «Транспортные сооружения». 2018. №4. С. 3-9. DOI: 10.15862/06SATS418.

24. Радостев А.Я., Валдаев Д.М. Особенности оснований и фундаментов зданий и сооружений, возводимых на территории распространения вечномерзлых грунтов// Современные технологии в строительстве. Теория и практика. 2018. Т. 2. С. 16–24.

25. Зуев С.С., Каменских Е.М., Маковецкий О.А. О возможности применения технологии струйной цементации грунта в зоне многолетнемерзлых грунтов // Жилищное строительство. 2022. № 9. С. 32–39. DOI: 10.31659/0044-4472-2022-9-32-39

26. Кочерженко В.В. Инновационные свайные технологии в современном фундаментостроении // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2022. № 4. С. 57–67.

27. Драчков Д.С. Особенности строительства зданий и сооружений на многолетнемерзлых грунтах // Сб. ст. V междунар. науч.-практ. конф. Пенза. 2017. С. 133–135.

28. Строкова В.В., Нелюбова В.В., Бодман Л.Н. Композиционное вяжущее для монолитного строительства в северных регионах // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2016. №11. С. 36–42.

29. Кузнецова В.Н. Анализ результатов сжимаемости мерзлых грунтов // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2016. № 7. С. 90–93.

30. Рекомендации по проектированию фундаментов мобильных (инвентарных) зданий на вечномерзлых грунтах. М.: Стройиздат, 1988. 112 с.

31. Трохалин А.А., Роговая А.П. Принципы и конструктивные решения по возведению фундаментов на вечномерзлых грунтах // Сборник научных трудов 3-й Всероссийской конференции. 2021. С. 258–260.

32. Набережный А.Д., Кузьмин Г.П., Посельский Ф.Ф. Анализ причин снижения несущей способности оснований и фундаментов в геокриологических условиях Якутии // Промышленное и гражданское строительство. 2016. №8. С. 64–69.

33. Майструк А.Г., Пегин П.А. Анализ конструкции фундаментов, устраиваемых на вечномерзлых грунтах // Заметки ученого. 2021. №9. С. 31–35.

34. Губко Г.Л. Конструктивные и технологические решения фундаментов из лопастных



свай в многолетнемерзлых грунтах // Вестник науки и образования. 2018. №9. С 52–58.

35. Войтиковский К.Ф., Мельников П.И., Порхаев Г.В., Вотяков И.Н. Фундаменты сооружений на мерзлых грунтах в Якутии. М.: Наука, 1968. 198 с.

36. Саввина А.Е., Сыроватский А.А. Проблемы свайного фундаментостроения в Республике Саха (Якутия) // Архитектура и строительство: тез. докл. научн.-техн. конф. Томск. 1999. С. 45–47.

37. Гончаров Ю.М. Эффективный тип фундамента для строительства на многолетнемерзлых грунтах [Электронный ресурс]. URL: <http://imz-2000.narod.ru/ugnhtml>

38. Познаркова С.В., Зепалов Ф.Н. Оценка 20-летней эксплуатации фундамента-оболочки в г. Игарка // Труды IX Международного симпозиума по проблемам инженерного мерзлотоведения. Якутск. 2011. 44 с.

39. Улицкий В.М., Шашкин А.Г., Шашкин К.Г., Шашкин В.А. Основы совместных расчетов

зданий и оснований. Спб.: Издательство института «Геореконструкция», 2014. 328 с.

40. Набережный А.Д. Анализ эффективности технологии обустройства фундаментов в условиях многолетнемерзлых грунтов // В сб. Международной научно-технической конференции молодых ученых и исследователей. 2010. С. 15–19.

41. Афанасьева Ю.С. Исследование напряженно-деформированного состояния несущих конструкций монолитного железобетонного здания с учётом последовательности возведения // Молодой ученый. 2021. № 22. С. 83–90.

42. Андреев, В.И. Расчет модели системы конструкция – фундамент – основание с учетом деформаций сдвига // Строительная механика и расчет сооружений. 2010. № 6. С. 2–5.

43. Кудрявцев С.А., Кажарский А.В., Шишкина К.М. Исследование напряженно-деформированного состояния основания и фундамента жилого здания на слабых промерзающих грунтах. Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2008. 98 с.

#### Информация об авторах

**Есипов Станислав Максимович**, кандидат технических наук, доцент кафедры строительства и городского хозяйства. E-mail: [sk31.sm@gmail.com](mailto:sk31.sm@gmail.com). Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Турков Андрей Викторович**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры строительных конструкций и материалов. E-mail: [aturkov@bk.ru](mailto:aturkov@bk.ru). Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева. Россия, 302002, г. Орел, ул. Московская, д. 77.

**Дьяченко Анастасия Юрьевна**, магистрант кафедры строительства и городского хозяйства. E-mail: [dyachenko.anastasya28n@yandex.ru](mailto:dyachenko.anastasya28n@yandex.ru). Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

**Есипова Диана Васильевна**, аспирант кафедры строительства и городского хозяйства. E-mail: [dianagridi-akina@mail.ru](mailto:dianagridi-akina@mail.ru). Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 23.10.2023 г.

© Есипов С.М., Турков А.В., Дьяченко А.Ю., Есипова Д.В., 2023

<sup>1,\*</sup>*Esipov S.M.*, <sup>2</sup>*Turkov A.V.*, <sup>1</sup>*Diachenko A. Yu.*, <sup>1</sup>*Esipova D.V.*

<sup>1</sup>*Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*

<sup>2</sup>*Oryol State University named after I.S. Turgenyev*

*\*E-mail: sk31.sm@gmail.com*

## THE STRESS-STRAIN STATE OF THE FOUNDATION IN PERMAFROST CONDITIONS AND ITS EFFECT ON THE FORCES IN THE ELEMENTS OF THE ABOVEGROUND PART OF THE BUILDING

**Abstract.** *The article considers examples of space-planning and structural solutions of frame buildings during construction in permafrost regions. The most typical schemes and methods of solving problems related to compensation of deformations during cyclic freezing and thawing, temperature influence on the condition of foundations, as well as the compilation of design schemes of foundations and aboveground structures, taking into account the factors of actual operation, are analyzed. The problems of assessing the technical condition of foundations and compiling mathematical models for calculating structures by the finite element method in permafrost conditions are highlighted. A program of numerical experimental studies has been developed that allows obtaining the desired dependencies of the stress-strain state and creating a computational model that adequately corresponds to the actual operation of structures in permafrost. The following are the matrices*

developed by the authors of varied factors, on the basis of which calculation it is possible to take into account additional factors arising in the structures when the homogeneity of the frozen base is violated. Prerequisites are given for drawing up the most correct calculation scheme for controlling the behavior of foundations on frozen soils. A method of taking into account the possible temperature precipitation of the base on the distribution of internal force factors in the above fundament structure is proposed.

**Keywords:** permafrost, frame system, stress-strain state, sediment, foundations.

## REFERENCES

1. Tazayan Yu. Construction of buildings and structures on permafrost [Stroitel'stvo zdaniy i sooruzhenij na vechnoj merzlotte]. Molodoy uchenyj. 2020. No. 48. Pp. 67–72. (rus)
2. Shiklomanov N.I., Streleckij D.A., Grebenec V.I., Luis Suter. Conquering Permafrost: Urban Infrastructure Development in Norilsk, Russia [Pokorenie vechnoj merzloty: razvitie gorodskoj infrastruktury v Noril'ske, Rossiya]. Polyarnaya geografiya. 2017. Pp. 22–32. (rus)
3. Kim M.V. Foundations of capital buildings on permafrost in Norilsk [Fundamenty kapital'nyh zdaniy na merzlotte v Noril'ske]. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk book publishing house, 1960. 19 p. (rus)
4. Alyoshina TA. Building on permafrost: experience and innovations [Stroitel'stvo na merzlotte: opyt i novshestva]. URL: sibforum.sfu-kras.ru/node/106.
5. Alekseeva O.I., Balobaev V.T., Grigor'ev M. N., Makarov V.N., CHzhan R.V., SHac M.M., SHepelev V.V. On the problems of urban development in cryolithozone (on the example of Yakutsk) [O problemah gradostroitel'stva v kriolitozone (na primere YAkutsk)]. Kriosfera Zemli. 2007. Vol. XI. No2. Pp. 78–83. (rus)
6. Ohlopokova T.V., Gur'yanov G.R., Plotnikov A.A. Construction and design of buildings and structures in permafrost conditions [Stroitel'stvo i proektirovanie zdaniy i sooruzhenij v usloviyah vechnoj merzloty]. Inzhenernyj vestnik Dona. 2018. No4. Pp. 62–75. (rus)
7. Mel'nikov V.P., Mel'nikova A.A., Anikin G.V., Ivanov K.S., Spasennikova K.A. Engineering solutions in permafrost construction in terms of improving energy efficiency of structures [Inzhenernye resheniya v stroitel'stve na vechnoj merzlotte v plane povysheniya energoeffektivnosti sooruzhenij]. Kriosfera Zemli. 2014. Vol. 18. No 3. Pp. 82–90. (rus)
8. Vas'kovskij A.P., Shklyarov N.D. Structures of Civil Buildings for Construction in the North [Konstrukcii grazhdanskikh zdaniy dlya stroitel'stva na Severe]. L.: Strojizdat, 1979. 136 p. (rus)
9. Maksimov G.N., Smirnov V.D. To the question of erection of residential buildings in areas of permafrost soils without ventilated subfields [K voprosu o vozvedenii zhilyh zdaniy v rajonah rasprostraneniya vechnomerzlyh gruntov bez provetrivayemyh podpolij]. Regulation of foundation soil temperature by means of seasonally acting cooling devices: Collection of scientific works Yakutsk, 1983. Pp. 77–81. (rus)
10. Cukanov N.A., Baev M.A., Babuh A.P., Poz G.M. On some characteristic features of thermal interaction between permafrost soil masses under heated buildings and outside under different conditions of snow deposition at foundations [O nekotoryh harakternyh osobennostyakh teplovogo vzaimodejstviya mezhdru massivami vechnomerzlyh gruntov pod otaplivaemymi zdaniyami i snaruzhi pri razlichnyh usloviyah snegootlozheniya u fundamentov]. Bulletin of Tyum GASU. 2015. No 4. Pp. 52–59. (rus)
11. Nikiforova N.S., Konnov A.V. Bearing capacity of piles in permafrost soils under climate change [Nesushchaya sposobnost' svaj v mnogoletnemerzlyh gruntah pri izmenenii klimata]. Construction and Geotechnics. 2021. Vol. 12. No. 3. Pp. 14–24. DOI: 10.15593/2224-9826/2021.3.02 (rus)
12. Il'ichev V.A., Nikiforova N.S., Konnov A.V. Effect of transformation of cryolithozone soils on their temperature state at the base of the building [Vliyaniye preobrazovaniya gruntov kriolitozony na ih temperaturnoe sostoyanie v osnovanii zdaniya]. Residential construction. 2022. No 9. Pp. 12–17. DOI: 10.31659/0044-4472-2022-9-12-17 (rus)
13. Rozhkova K.V. Numerical modeling of aerodynamics and thermal influence on the ground of a building with an open cellar at varying its dimensions [Chislennoe modelirovanie aerodinamiki i teplovogo vliyaniya na grunt zdaniya s otkryтым podpol'em pri var'irovanii ego razmerov]. V Conference "Technologies of Oil, Gas and Gas Condensate Fields Development", Tomsk. 2022. Pp. 14–24. (rus)
14. Gribovskij G.V., Kushnaryov A.G. On the problem of estimation of soil-air heat exchange taking into account the impact of solar radiation for thermal engineering calculations of engineering structures on permafrost soils [O probleme ocenki teploobmena grunta s vozduhom s uchetom vozdejstviya solnechnoj radiacii dlya teplotekhnicheskikh raschetov inzhenernyh sooruzhenij na MMG]. VI Conference of Geocryologists of Russia "Monitoring in Cryolithozone", Moscow. 2022. Pp. 113–121. (rus)
15. Nikiforova N.S., Konnov A.V. Forecast of the soil deformations and decrease of the bearing capacity of pile foundations operating in the cryolithozone. International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2022. No. 18. Pp. 141–150. DOI: 10.22337/2587-9618-2022-18-1-141-150
16. Grebenets V., Streletskiy D., Shiklomanov N. Geotechnical safety issues in the cities of Polar

Regions. Geography, Environment, Sustainability Journal. 2012. Vol. 5. No. 3. Pp. 104–119.

17. Plotnikov A.A., Makarov V.I. Methods of cooling the bases of buildings constructed on the principle of preservation of soils in the frozen state (on the example of Mirny) [Metody ohlazhdeniya osnovanij zdaniy, postroennyh po principu sohraneniya gruntov v merzлом sostoyanii (na primere g. Mirnogo)]. OFMG. 2017. No. 5. Pp. 26–31. (rus)

18. Gorelik Ya.B., Habitov A.H., Zemerov I.V. Efficiency of surface cooling of frozen bases using forced refrigerant circulation unit [Effektivnost' poverhnostnogo ohlazhdeniya merzlyh osnovanij s primeneniem agregata prinuditel'noj cirkulyacii hladagenta]. Earth's cryosphere. 2021. Vol. XXV. No 4. Pp. 36–46. (rus)

19. Abrosimov A.I., Teplyakov A.V., Zaletaev S.V. Increasing the bearing capacity of piles by installing soil coolers in a ventilated sub-floor [Uvelichenie nesushchej sposobnosti svaj putem ustanovki v provetrivaemoe podpol'e ohladitelej grunta]. Proceedings of the Extended Meeting of the Council on Earth Cryology. MOSCOW, MSU. 2018. Vol. 2. Pp. 9–15. (rus)

20. Gao Q. Effect of a ventilated open structure on the stability of bored piles in permafrost regions of the Tibetan Plateau. Cold Regions Science and Technology. 2020. 178 p.

21. Gorelik Ya.B., Zemerov I.V. Influence of surface watering on the temperature regime of frozen soils [Vliyanie poverhnostnogo obvodneniya na temperaturnyj rezhim merzlyh gruntov]. Vestn. Tyum. gos. un-sta. Physical and mathematical modeling. Oil, gas, power engineering. 2020. No 1. Pp. 10–40. DOI: 10.21684/2411-7978-2020-6-1-10-40. (rus)

22. Gorelik Ya.B., Romanyuk S.N., Habitov A.H. Taking into account the joint thermal effect of wells in a cluster when calculating the parameters of the permafrost thawing area [Uchet sovместnogo teplovogo dejstviya skvazhin v kuste pri raschete parametrov oblasti protaivaniya merzlyh gruntov]. Earth's Cryosphere. 2019. Vol. XXIII. No 2. Pp. 79–87. (rus)

23. Funk A.A. Construction of buildings and structures in extreme climatic conditions: peculiarities of work organization and used construction materials [Stroitel'stvo zdaniy i sooruzhenij v ekstremal'nyh klimaticheskikh usloviyah: osobennosti organizacii rabot i ispol'zuemyh strojmaterialov]. Internet journal "Transport Structures". 2018. No. 4. Pp. 3–9. DOI: 10.15862/06SATS418 (rus)

24. Radostev A.YA., Valdaev D.M. Peculiarities of bases and foundations of buildings and structures erected on the territory of permafrost soils distribution [Osobennosti osnovanij i fundamentov zdaniy i sooruzhenij, vozvodimyh na territorii rasprostraneniya vechnomerzlyh gruntov]. Modern technologies in construction. Theory and practice. 2018. Vol. 2. Pp. 16–24. (rus)

25. Zuev S.S., Kamenskih E.M., Makoveckij O.A. On the possibility of applying the technology of jet grouting of soil in the zone of permafrost soils [O vozmozhnosti primeneniya tekhnologii strujnoj cementacii grunta v zone mnogoletnemerzlyh gruntov]. Residential construction. 2022. No 9. Pp. 32–39. DOI: 10.31659/0044-4472-2022-9-32-39 (rus)

26. Kocherzhenko V.V. Innovative pile technologies in modern foundation construction [Innovacionnye svajnye tekhnologii v sovremennom fundamentostroenii]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2022. No 4. Pp. 57–67. (rus)

27. Drachkov D.S. Peculiarities of construction of buildings and structures on permafrost soils [Osobennosti stroitel'stva zdaniy i sooruzhenij na mnogoletnemerzlyh gruntah]. Collection of articles. V International Scientific and Practical Conf. Penza. 2017. Pp. 133–135. (rus)

28. Stokova V.V., Nelyubova V.V., Bocman L.N. Composite binder for monolithic construction in northern regions [Kompozicionnoe vyazhushchee dlya monolitnogo stroitel'stva v severnyh regionah]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2016. No. 11. Pp. 36–42. (rus)

29. Kuznecova V. N. Analysis of the results of compressibility of frozen soils [Analiz rezul'tatov szhimaemosti merzlyh gruntov]. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2016. No. 7. Pp. 90–93. (rus)

30. Recommendations for designing foundations of mobile (inventory) buildings on permafrost soils [Recommendations for designing foundations of mobile (inventory) buildings on permafrost soils] M.: Stroyizdat, 1988. 112 p. (rus)

31. Trohalin A.A., Rogovaya A.P. Principles and design solutions for the construction of foundations on permafrost soils [Principy i konstruktivnye resheniya po vozvedeniyu fundamentov na vechnomerzlyh gruntah]. Collection of scientific papers of the 3rd All-Russian Conference. 2021. Pp. 258–260. (rus)

32. Naberezhnyj A.D., Kuz'min G.P., Posel'skij F.F. Analysis of the causes of reduction of bearing capacity of foundations in geocryological conditions of Yakutia [Analiz prichin snizheniya nesushchej sposobnosti osnovanij i fundamentov v geokriologicheskikh usloviyah Yakutii]. Industrial and civil engineering. 2016. No. 8. Pp. 64–69. (rus)

33. Majstruk A.G., Pegin P.A. Analysis of the design of foundations constructed on permafrost soils [Analiz konstrukcii fundamentov, ustraivayemyh na vechnomerzlyh gruntah]. Scientist's Notes. 2021. No. 9. Pp. 31–35. (rus)

34. Gubko G.L. Structural and technological solutions for foundations made of pile piles in permafrost soils [Konstruktivnye i tekhnologicheskie resh-

eniya fundamentov iz lopastnyh svaj v mnogoletnemerzlyh gruntah]. Bulletin of Science and Education. 2018. No. 9. Pp. 52–58. (rus)

35. Vojtikovskij K.F., Mel'nikov P.I., Porhaev G.V., Votyakov I.N. Foundations of structures on frozen soils in Yakutia [Fundamenty sooruzhenij na merzlyh gruntah v Yakutii]. M.: Nauka, 1968. 198 p. (rus)

36. Savvina A.E., Syrovatskij A.A. Problems of pile foundation construction in the Republic of Sakha (Yakutia) [Problemy svajnogo fundamentostroeniya v Respublike Saha (Yakutiya)]. Architecture and Construction: abstracts of scientific and technical conf. Tomsk. 1999. Pp. 45–47. (rus)

37. Goncharov YU.M. Effective foundation type for construction on permafrost soils [Effektivnyj tip fundamenta dlya stroitel'stva na mnogoletnemerzlyh gruntah]. URL: <http://imz-2000.narod.ru/ygnhtml>

38. Poznarkova S.V., Zepalov F.N. Evaluation of 20-year operation of the foundation-shell in Igarka city [Ocenka 20-letnej ekspluatatsii fundamenta-obolochki v g. Igarka]. Proceedings of the IX International Symposium on Problems of Engineering Permafrost Science. Yakutsk. 2011. 44 p. (rus)

39. Ulickij V.M., Shashkin A.G., Shashkin K.G., Shashkin V.A. Fundamentals of joint calculations of buildings and foundations [Osnovy sovmestnyh raschetov zdaniy i osnovanij]. Spb.: Publishing house of the Institute "Georeconstruction", 2014. 328 p. (rus)

#### Information about the authors

**Esipov, Stanislav M.** Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Builders and Horoscopes. E-mail: [sk31.sm@gmail.com](mailto:sk31.sm@gmail.com). Belgorod National Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova str., 46.

**Turkov, Andrey V.** Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Building Structures and Materials. E-mail: [aturkov@bk.ru](mailto:aturkov@bk.ru). Oryol National University named after I.S. Turgenev. Russia, 302002, Orel, Moskovskaya str., 77.

**Dachenko, Anastasia Yu.** Master's student of the departments of Builder and the city government. E-mail: [dyachenko.anastasya28n@yandex.ru](mailto:dyachenko.anastasya28n@yandex.ru). Belgorod National Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova str., 46.

**Esipova, Diana V.** Postgraduate student of the Department of Builder and Urban Education. E-mail: [dianagridiakina@mail.ru](mailto:dianagridiakina@mail.ru). Belgorod National Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova str., 46.

*Received 23.10.2023*

#### Для цитирования:

Есипов С.М., Турков А.В., Дьяченко А.Ю., Есипова Д.В. Напряженно-деформированное состояние фундамента в условиях вечной мерзлоты и его влияние на усилия в элементах надземной части здания // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023. №12. С. 16–31. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-12-16-31

#### For citation:

Esipov S.M., Turkov A.V., Diachenko A.Yu., Esipova D.V. The stress-strain state of the foundation in permafrost conditions and its effect on the forces in the elements of the aboveground part of the building. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2023. No. 12. Pp. 16–31. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-8-12-16-31