

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-2-31-44

Меркулов С.И., *Есипов С.М., Дьяченко А.Ю.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

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

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЗДАНИЯ НА МЕРЗЛЫХ И НЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы оценки напряженно-деформированного состояния зданий и сооружений, возводимых на основаниях с различными грунтовыми условиями, включая мерзлые, немерзлые и тающие грунты. Основное внимание уделяется влиянию грунтового массива на осадку фундамента и устойчивость конструкций, а также применению современных методов расчета для анализа взаимодействия «здание + фундамент + основание». В работе применены методы сравнительного анализа для оценки осадок фундаментов и напряжений в несущих конструкциях при различных типах грунтов. Рассмотрены результаты расчета пространственной модели здания, включающей каркас, фундамент и основание, с использованием программных комплексов ЛИРА-САПР и САПФИР. Основные параметры, такие как осадка основания, напряжения в плитах перекрытия и ростверка, а также площади арматуры в различных зонах конструкции, были детально проанализированы для разных грунтовых условий. Результаты показывают значительное влияние типа грунта на осадку основания и перераспределение усилий в конструкциях. В частности, установлено, что осадки и напряжения в конструкциях зависят не только от типа грунта, но и от его состояния (мерзлое, немерзлое, тающее). Также выявлено, что мерзлые грунты обеспечивают меньшую осадку и меньший крен здания по сравнению с талым и немерзлым грунтами. Практическое применение полученных данных подчеркивает необходимость учета всех факторов, влияющих на грунтовый массив, для корректного проектирования и обеспечения надежности строительных конструкций.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, осадка фундамента, мерзлые и немерзлые грунты, каркасное здание, методы конечных элементов, программные комплексы

Введение. Для обеспечения долговечности и безопасности конструкций зданий и сооружений необходимо уделять особое внимание надежности их эксплуатации. В современных условиях проектирования и строительства наибольшую значимость приобретают вопросы, связанные с оценкой воздействия различных категорий сложности грунтовых условий на напряженно-деформированное состояние (НДС) конструкций и оснований. Также важно разработать рациональные и надежные проектные решения, а также инженерные мероприятия, направленные на улучшение эксплуатационных характеристик зданий и сооружений, возводимых в сложных грунтовых условиях [1–4].

При проведении оценки НДС сооружений следует учитывать деформации основания, вызванные как равномерной, так и неравномерной осадкой, что может происходить по разным причинам [5, 6]. Через контакт с подстилающим грунтом на сооружение передаются нагрузки, и именно деформация грунта под основанием вызывает неравномерную осадку, что может привести к повреждению и разрушению конструкции. Учитывая это, особое внимание необходимо уделить влиянию мерзлого состояния грунта основания, которое изменяет физико-механические свойства контактного слоя в системе «основание –

фундамент – здание» [7–11]. Исследованию вопросов трансформации НДС грунта под фундаментом сооружений в условиях различных состояний грунтового массива и посвящена данная работа.

В настоящее время численный расчет зданий и сооружений совместно с грунтовым основанием стал широко распространенной практикой благодаря использованию различных программных комплексов, таких как MOHOMAX-САПР, ЛИРА-САПР, Plaxis, Ansys, SCAD office и другие. В этих комплексах реализованы разнообразные методики расчета оснований, начиная от простых моделей с известными параметрами до сложных, требующих дополнительных исследований. Для инженера-расчетчика критически важно правильно выбрать модель грунтового основания и установить ее параметры, чтобы обеспечить адекватное описание напряженно-деформированного состояния основания и несущих конструкций [12–14].

Основная цель данной работы заключается в определении и сравнении осадок, полученных в результате численных расчетов с применением различных моделей грунтового основания, реализованных в программных комплексах САПФИР и ЛИРА-САПР. Для достижения этой цели требуется выполнить следующие задачи:

– разработать компьютерную модель для исследования взаимодействия системы «основание – фундамент – здание» на мерзлых и немерзлых грунтах;

– изучить на расчетной модели механизмы взаимодействия компонентов системы;

– провести оценку параметров напряженно-деформированного состояния.

Материалы и методы. В современном строительстве подавляющее большинство проектов, приблизительно 60 % от общего объема, реализуется с применением железобетонных конструкций. Эти конструкции обладают высокой прочностью и долговечностью, что делает их оптимальными для возведения зданий и сооружений различного назначения. Однако при проектировании и строительстве необходимо учитывать разнообразие грунтовых условий, на которых будут возводиться здания. В зависимости от специфики грунтовых массивов на строительных площадках, конструктивные решения могут включать устройство свайных фундаментов, что особенно актуально на слабых или неоднородных грунтах.

При расчете таких сооружений важно использовать комплексный подход, включающий моделирование системы «здание – фундамент – грунт» как единого целого. В этом контексте критическим аспектом является правильное описание свойств грунта, который является неотъемлемой частью конструкции. Существует несколько методов для учета характеристик грунта в расчетах. Один из них – это использование коэффициентов постели, которые позволяют моделировать взаимодействие грунта с фундаментом. Этот метод прост в применении и достаточно распространен, однако он имеет ограничения в точности при моделировании сложных грунтовых условий.

Другим, более детализированным подходом является использование специальных конечных элементов, которые более точно отражают особенности работы грунтовых массивов, включая их упругие и пластические свойства, а также влияние изменения нагрузки на различные глубины залегания грунтов [15]. Этот метод позволяет создать более реалистичную модель системы, что способствует точному прогнозированию поведения сооружения в различных эксплуатационных условиях [16–20].

Проведение таких сложных расчетов вручную практически невозможно из-за их трудоемкости и необходимости учесть множество факторов. Поэтому на практике широко используются специализированные

программные комплексы, которые позволяют автоматизировать процесс вычислений. Эти программы обеспечивают выполнение различных типов расчетов, начиная от анализа напряженно-деформированного состояния конструкций и заканчивая оценкой их устойчивости при воздействии различных нагрузок. Кроме того, программы учитывают последовательность возведения сооружений, что особенно важно для комплексных конструкций, состоящих из множества взаимосвязанных элементов.

Основой большинства современных программных комплексов является метод конечных элементов (МКЭ), который благодаря своим широким возможностям позволяет моделировать как простые, так и сложные конструкции. МКЭ позволяет учесть все аспекты, влияющие на поведение конструкции, включая геометрию, физико-механические параметры материалов и грунтов, а также условия нагружения. Это дает возможность создать модель, максимально приближенную к реальным условиям эксплуатации. Более того, использование таких программных средств существенно ускоряет процесс расчета, снижая затраты времени и ресурсов, что особенно важно в условиях сжатых сроков проектирования и строительства [21].

В данной работе был использован метод сравнительного анализа для оценки осадки фундамента с учетом различных моделей грунта, что позволило провести комплексный анализ взаимодействия системы «основание – фундамент – здание» в различных грунтовых условиях. Для проведения исследований применялись несколько методов, каждый из которых был направлен на решение специфических задач. Среди них можно выделить:

1. **Описательный метод.** Использовался для систематизации и интерпретации данных, полученных в ходе исследования. Этот метод позволил подробно описать исходные условия, в которых проводились расчеты, а также определить ключевые параметры, влияющие на поведение системы.

2. **Аналитический метод.** Применялся для анализа полученных данных и выявления взаимосвязей между различными параметрами модели. Аналитический подход помог глубже понять механизмы взаимодействия элементов системы, а также оценить влияние различных факторов на осадку.

3. **Математический метод.** Включал использование математических моделей и формул для расчета деформаций основания. Этот

метод основывался на решениях, предложенных теорией упругости, и позволил определить количественные характеристики деформаций, что было важно для точного расчета осадки фундамента.

4. Методы расчета конструкций на деформируемом основании. Эти методы использовались для моделирования взаимодействия фундамента с грунтом, что позволило учесть деформации основания и их влияние на поведение надземной части здания.

Расчет пространственной модели «здание + фундамент + основание» проводился с помощью специализированных программных комплексов ЛИРА-САПР и САПФИР. Эти программные продукты обладают широкими возможностями для выполнения сложных инженерных расчетов, что позволяет учитывать множество факторов, влияющих на напряженно-деформированное состояние конструкции.

Для исследования взаимодействия системы «основание – фундамент – здание» в различных грунтовых условиях было выполнено компьютерное моделирование в программе САПФИР. В качестве объекта моделирования было выбрано каркасное здание с традиционными конструктивными решениями. Такое здание характеризуется жесткой конструкцией, где основную роль в обеспечении жесткости играют монолитные перекрытия, соединенные с колоннами. Это типичное решение для современных многоэтажных зданий, где важна надежность и устойчивость конструкции.

Расчет модели был выполнен в программном комплексе ЛИРА-САПР, который позволяет детально моделировать и анализировать конструкции на деформируемом основании. Модель представляла собой двухэтажное здание с тремя пролетами, выполненное из железобетона и смонтированное на свайный фундамент. Каркасная конструктивная система здания включает в себя несущие элементы, такие как колонны, стены лестничных клеток, а также плиты перекрытия и покрытия. Эти элементы обеспечивают равномерное распределение нагрузок и устойчивость здания в различных эксплуатационных условиях. Здание опирается на сваи с плитным ростверком, с возвышением свай на 1,2 м над уровнем земли для создания вентилируемого подполья. Несущие элементы выполнены из бетона класса В25 с использованием арматуры класса А500. В плите перекрытия первого этажа предусмотрены отверстия для устройства лестничных клеток.

Параметры несущих элементов:

- колонны сечением 400×400 мм;

- стены ядра жесткости толщиной 200 мм;
- балки сечением 200×300 мм по контуру здания;
- плиты перекрытия и покрытия толщиной 200 мм;
- монолитный ростверк толщиной 600 мм;
- сваи буронабивные сечением 400×400 мм;
- вылет консолей фундамента относительно осей крайних колонн 500 мм;
- глубина заложения фундамента 5,8 м.

Во всех вариантах оснований было задано одинаковое напластование грунтов. В качестве основания свайного фундамента служит суглинок (ИГЭ-2) с расчетными характеристиками:

- мощность $h \approx 7,0$ м (усредненное значение);
- удельный вес $\gamma = 17,1$ кН/м³;
- коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$;
- модуль деформации $E_1 = 10000$ кПа; $E_2 = 20000$ кПа (зависит от состояния грунта).

В расчете будет учтено действие на здание постоянных нагрузок. Постоянные нагрузки включают в себя:

- собственный вес монолитных конструкций (задается автоматически в структуре программы ЛИРА-САПР);
- вес кровли на покрытие ($q_1 = 3,5$ кН/м²);
- вес полов и перегородок на перекрытие ($q_2 = 2,0$ кН/м²);
- вес полов на фундамент ($q_3 = 1,9$ кН/м²);
- вес стен ограждающих конструкций ($Q = 30$ кН/м);
- вес парапетов ($Q/2 = 15$ кН/м).

Расчет каркаса будет производиться на основные сочетания нагрузок, в состав которых входят:

- загрузка 1 – собственный вес монолитных конструкций здания;
- загрузка 2 – вес кровли, полов, перегородок, наружного стенового ограждения (q_1, q_2, q_3, Q).

Расчетная модель здания и грунтовый массив представлены на рис. 1–4.

Для проведения расчетной работы по проектированию необходимо создать пространственную модель каркасного здания с использованием программного комплекса ЛИРА-САПР. На начальном этапе моделирования требуется задать параметры жесткости всех несущих железобетонных элементов конструкции. Эти параметры включают характеристики материалов, такие как модуль упругости и прочностные свойства, которые определяют, как элементы будут сопротивляться действующим нагрузкам.

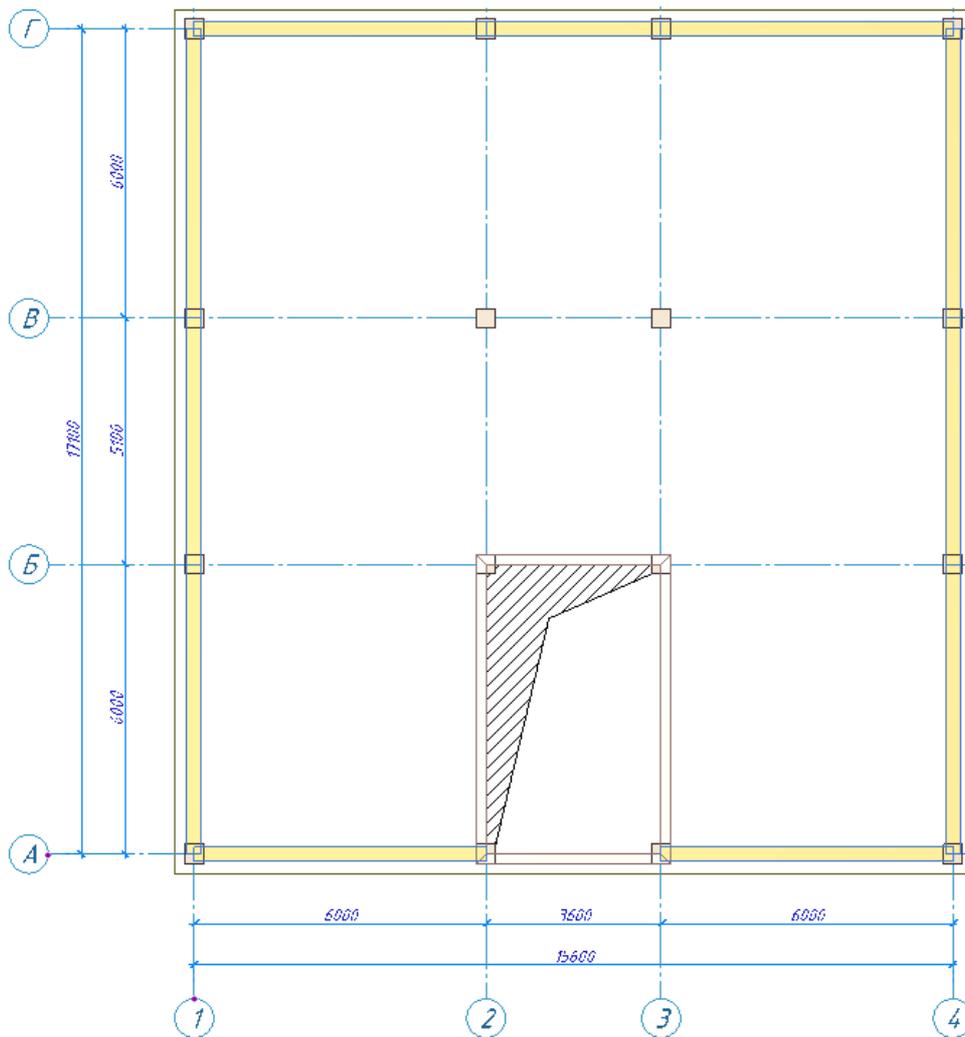


Рис. 1. Схема плана здания

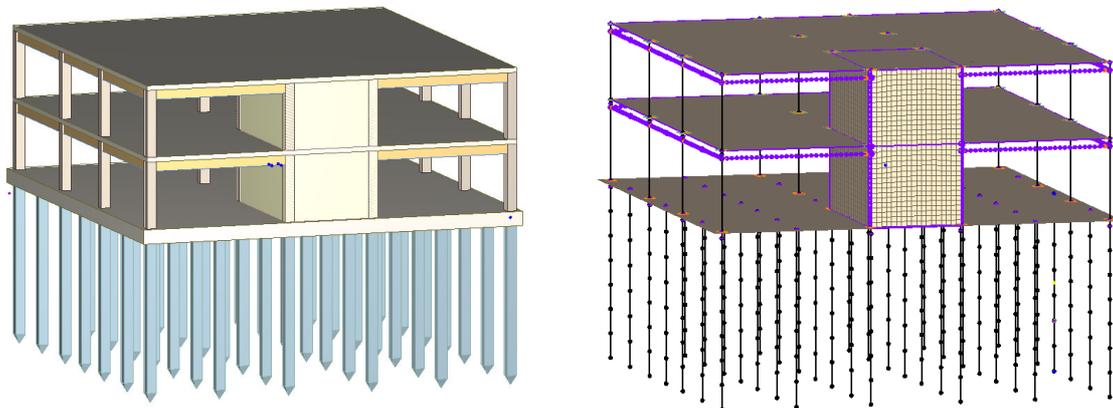


Рис. 2. Общий вид модели здания и его расчетная модель

Все скважины						
[иконки] (м) [иконка]						
№	1	2	3	4	5	6
X	0.285638	0.285638	30.2856	30.2856	0.285638	30.2856
Y	3.25219	28.2522	28.2522	3.25219	25.2522	26.2522
Z	100	100	100	100	100	100
ИГЭ + t	1 + 3	1 + 1.2	1 + 2	1 + 2	1 + 3	1 + 2
ИГЭ + t	2 + 7.5	2 + 5.8	2 + 7	2 + 7	2 + 7.5	2 + 7
...	3 + 1.5	3 + 5	3 + 3	3 + 3	3 + 1.5	3 + 3

Рис. 3. Таблица скважин грунтового массива

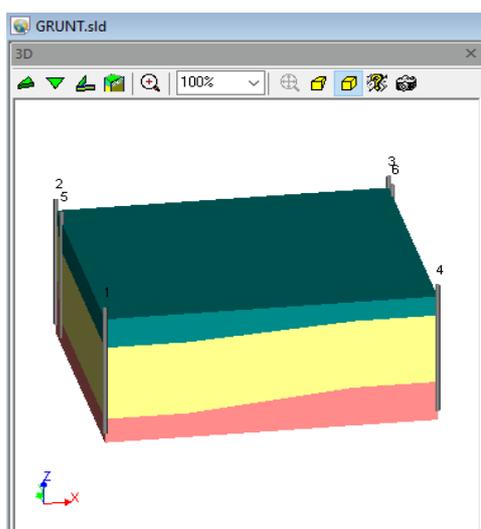


Рис. 4. Модель грунтового массива

Следующим шагом является определение опорных соединений и закреплений. Это включает в себя установку всех необходимых связей, которые обеспечивают правильное распределение нагрузок и жесткость конструкции. Важно точно настроить опорные условия, чтобы адекватно смоделировать взаимодействие элементов конструкции.

Составляем расчетную комбинацию нагрузок из двух загрузений. Первое заграждение включает в себя собственный вес монолитных конструкций, который включает вес всех конструктивных элементов, таких как перекрытия и стены. Второе заграждение учитывает нагрузки, возникающие от эксплуатации здания, такие как вес кровли, полов, перегородок, наружных стен и парапетов. Эти нагрузки обозначаются как q_1 , q_2 , q_3 и Q соответственно.

После задания нагрузок и опорных условий необходимо сформировать таблицу расчетных сочетаний усилий. Это включает в себя создание различных сценариев нагрузки, которые могут возникнуть в процессе эксплуатации здания, чтобы оценить, как конструкция будет себя вести в различных условиях.

Затем в программном комплексе выполняется расчет модели для определения напряженно-деформированного состояния (НДС) несущих элементов. Этот расчет позволяет определить, как различные части конструкции будут деформироваться под воздействием заданных нагрузок и как распределяются внутренние усилия.

Для визуализации результатов расчета создается расчетная комбинация нагрузок. Это позволяет наглядно представить, как различные нагрузки влияют на конструкцию и какие

максимальные и минимальные напряжения и деформации возникают в различных элементах модели.

Основная часть. Основная часть работы заключается в численных экспериментах, целью которых является определение влияния вечномёрзлых грунтов на НДС элементов системы «здание + фундамент + основание». Это достигается путем сопоставления двух расчетных решений – одно с учетом вечной мерзлоты, другое без нее, а затем вычисляется разница соответствующих параметров.

В случае присутствия вечномёрзлых грунтов и учета таяния верхних слоев грунтового массива, полные деформации основания определяются по формуле [22]:

$$S_m = S + S_s, \quad (1)$$

где S_m – осадка, происходящая в процессе эксплуатации здания на оттаивающем основании; S – составляющая осадки основания, вызванная действием собственного веса оттаивающего грунта; S_s – сумма осадок, обусловленных специфическими грунтами.

Деформации оттаивающего основания накапливаются в пределах расчетной глубины оттаивания H . В качестве расчетной глубины оттаивания грунтов H принимается минимальная глубина сжимаемой толщи грунта.

Составляющая осадки основания, вызванная действием собственного веса грунта, определяется по формуле [22]:

$$S_s = \sum_{i=1}^n (A_{th,i} + m_{th,i} \sigma_{zg,i}) h_i, \quad (2)$$

где $A_{th,i}$ – коэффициент оттаивания i -го слоя грунта, доли единицы; $m_{th,i}$ – коэффициент сжимаемости, $(\text{т}/\text{м}^2)^{-1}$; $\sigma_{zg,i}$ – вертикальное напряжение от собственного веса грунта в середине i -го слоя грунта, $\text{т}/\text{м}^2$; h_i – толщина i -го слоя.

Составляющая осадки основания S от действия веса сооружения рассчитывается в зависимости от напряжений в грунте от веса сооружения σ_p и коэффициента сжимаемости m_{th} . При этом, используется модель упругого полупространства, а напряжения σ_p рассчитываются по методу Буссинеска [23].

Рассмотрим пример осадки здания с учетом оттаивания первых двух слоев грунтового массива, в которых располагаются сваи. Первый слой представлен насыпным грунтом из крупнозернистого песка, второй слой – суглинок, а третий – супесь. Границы слоев распределены пространственно неоднородно по объему грунта. Природный рельеф участка не имеет выраженных перепадов высот (рис. 5).

Характеристики грунтов

СП 22.13330.21

Основные Просадочные Набухающие Засоленные Вечномерзлые

№ ИГЭ	Наименование грунта	Цвет	Модуль деформации, кН/м ²	Коеффициент Пуассона	Удельный вес грунта, кН/м ³	Коеффициент пористости	Природная влажность, доли	Показатель текучести IL	Вода Лёсс Насыпь Органи	Коеффициент пористости e	Удельное сцепление c, кН/м ²	Угол внутреннего трения Fi, °	Предельное напряжение растяжения Rs, кН/м ²	Коеффициент Савинова Со, кН/м ³	Коеффициент пропорциональности K, тс/м ^{**4} и код грунта
1	Песок		38000	0.3	16.6	5	0.12		0.66	3	38	0.02	9806.65	440	
2	Суглинок		20000	0.3	17.1	5	0.25	0.2	0.74	35	20	0.4	8825.98	400	
3	Супесь		36000	0.3	21.9	5	0.13	-0.06	0.36	45	30	0.16	14710	500	

Рис. 5. Характеристики мерзлого грунтового массива

В ПК ЛИРА-САПР реализован вариант формирования коэффициентов A_{th} и m_{th} . Возможно задать соответствующие

коэффициенты оттаивания A_{th} и сжимаемости m_{th} для указанных слоев грунта (рис. 6).

№ ИГЭ	A_{th} (коэф. оттаивания), доли единицы	m_{th} (коэф. сжимаемости), 1/кН/м ²
1	0.00175	0.00021
2	0.00105	0.00072

Рис. 6. Задание коэффициентов оттаивания A_{th} и сжимаемости m_{th}

Для проведения расчетов статической устойчивости и анализа напряженно-деформированного состояния грунтового основания используется модель Винклера, которая предполагает представление основания как системы независимых упругих элементов (пружин), реагирующих на приложенные нагрузки [24, 25]. Этот подход широко применяется в инженерной практике для моделирования взаимодействия фундамента и грунта.

1. Экстраполяция модели грунта. Перед началом расчета необходимо выполнить экстраполяцию модели грунта. Это включает в себя определение физико-механических характеристик грунта на различных глубинах заложения, таких как модуль деформации, коэффициент Пуассона, удельный вес и другие параметры, которые влияют на поведение основания при нагрузке. Экстраполяция позволяет уточнить параметры модели и учесть возможные изменения в структуре грунта, такие как неоднородность, наличие подземных вод или наличие вечномерзлых слоев.

2. Расчет свайного фундамента. На основе экстраполированных данных выполняется расчет свайного фундамента. Этот процесс включает в себя определение оптимальной длины, диаметра и количества свай, а также их расположения под зданием для обеспечения необходимой несущей способности. При этом необходимо учитывать взаимодействие свай с грунтом, которое моделируется с помощью упругих

коэффициентов. Коэффициенты упругого основания, которые определяются на этом этапе, играют ключевую роль в последующих расчетах, так как они отражают способность грунта сопротивляться нагрузкам.

3. Итерационный расчет. После выполнения первоначального расчета свайного фундамента необходимо провести итерационный расчет для уточнения коэффициентов упругого основания (коэффициентов постели). Этот процесс включает в себя последовательные пересчеты значений коэффициентов до тех пор, пока они не стабилизируются, а погрешность между максимальными и минимальными значениями не будет составлять не более 5 %. Количество итераций определяется в зависимости от сложности задачи и характеристик грунта. В данном исследовании было выполнено 10 итераций, что позволило достичь требуемой точности (рис. 7).

4. Импорт данных в модуль «Грунт». После завершения итерационного процесса, результаты, полученные на предыдущих этапах, импортируются в модуль «Грунт» программы для дальнейшего анализа. В этом модуле производится расчет осадок и распределение напряжений в грунтовой основе с учетом взаимодействия фундамента со строительной конструкцией. Модуль также позволяет проводить проверку на устойчивость фундамента и оценку его поведения при различных сценариях нагружения.

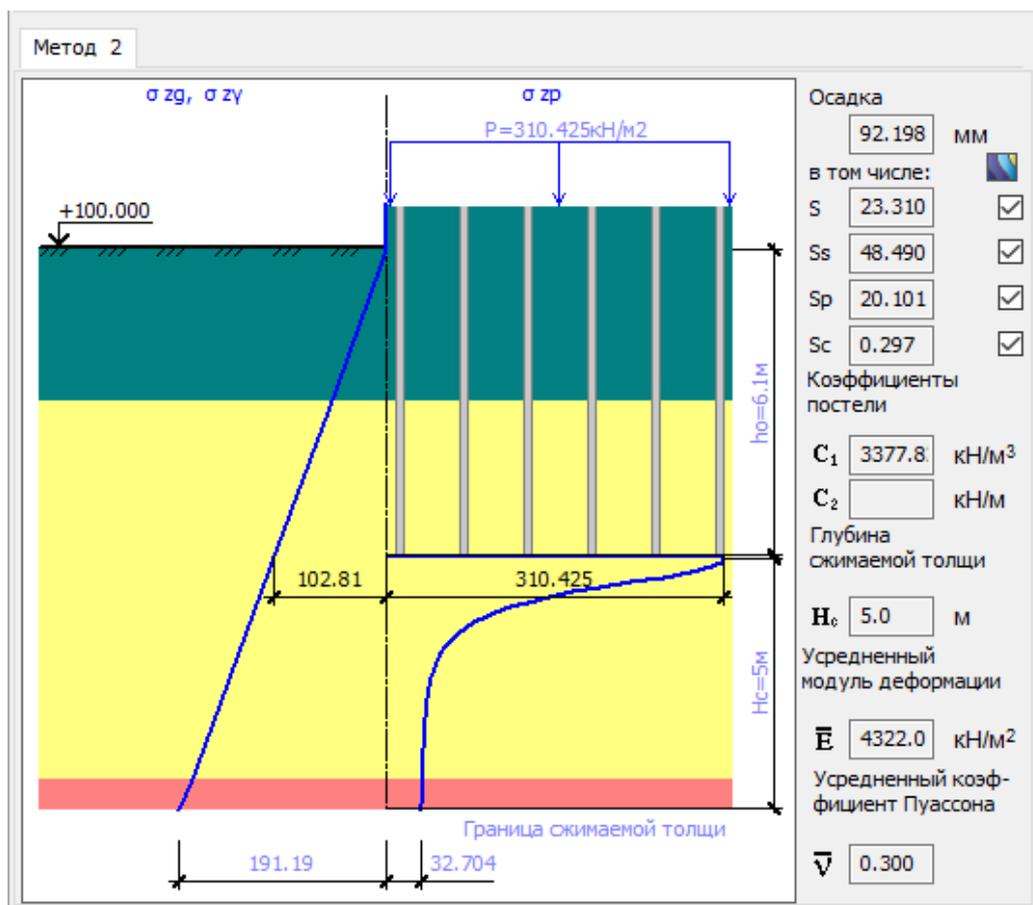


Рис. 7. Осадка свай в мерзлом грунте при оттаивании в системе Лира-грунт

5. Оценка результатов. После того как итерации завершены и коэффициенты постели стабилизированы, проводится окончательная оценка результатов. В ходе анализа рассматриваются значения осадок, распределение напряжений и другие параметры, которые позволяют сделать выводы о надежности и устойчивости фундамента в данных грунтовых условиях. Полученные результаты визуализируются с помощью графиков и диаграмм, что позволяет наглядно представить изменения в поведении грунта и конструкции под воздействием нагрузки.

Итогом проделанной работы становится получение детализированной картины напряженно-деформированного состояния системы «здание – фундамент – основание», что позволяет принять обоснованные инженерные решения и провести корректировку проектных решений при необходимости.

Осадка основания от действия веса сооружения рассчитывается с использованием модели упругого полупространства, что предполагает представление грунта как однородного, изотропного и упругого материала. В этом подходе ключевую роль играют два параметра:

Коэффициент сжимаемости m_{th} – параметр, который характеризует деформационную способность грунта под нагрузкой. Этот коэффициент определяется экспериментально и зависит от типа грунта, его влажности, плотности, а также от условий, в которых он находится.

Напряжение σ_r – напряжение в грунте, возникающее под действием нагрузки от веса сооружения. Это напряжение рассчитывается с использованием метода Буссинеска, который применяется для определения напряжений в упругом полупространстве под концентрированной нагрузкой.

В результате расчетов, произведенных по этим параметрам, осадка основания S от веса сооружения была определена как 23,31 мм.

Кроме того, необходимо учитывать осадку, вызванную собственным весом грунта σ_{zg} . Для расчета этой составляющей осадки используется формула (2), в которой учитываются вертикальные напряжения от собственного веса грунта на различных глубинах заложения. Эти напряжения зависят от плотности и состава грунта, а также от его структурных особенностей. Осадка грунта, обусловленная его собственным весом, будет увеличиваться только в пределах глубины оттаивания.

Для условий, где грунт находится в вечномёрзлом состоянии, общая деформация основания S_m определяется как сумма двух компонентов по формуле (1).

В данном случае расчеты показали, что полная осадка в условиях вечномёрзлого грунта составляет $S_m = S + S_s = 48,49 + 23,31 = 71,8$ мм.

Полная осадка основания учитывает все возможные компоненты деформаций и составляет:

$$S_{sum} = S + S_s + S_p + S_c = 92,2 \text{ мм}, \quad (3)$$

где S – осадка от веса сооружения; S_s – осадка от действия собственного веса грунта; S_p – осадка от дополнительных нагрузок, возникающих при эксплуатации сооружения; S_c – осадка, связанная с криогенными процессами, такими как замерзание и оттаивание грунтов.

В период оттаивания грунты, такие как тугопластичные и мягкопластичные суглинки, существенно теряют свои прочностные и деформационные характеристики. Это явление называется разупрочнением и составляет

порядка 30–50 %. В результате, несущая способность свай в слоях, где происходит смерзание с грунтом, значительно снижается, что требует особого внимания при проектировании фундаментов на таких грунтах.

Для случая, когда все слои грунта остаются в мерзлом состоянии, коэффициенты оттаивания A_{th} и сжимаемости m_{th} не учитываются. Расчет осадки в этом случае выполняется по модели Пастернака, которая более точно описывает взаимодействие фундамента с основанием за счет учета боковой жесткости грунта. Итоговая осадка для данной модели составила 32 мм.

Для сравнения была выполнена аналогичная модель расчета, но уже для условий немерзлого грунта. Параметры грунтового массива в этом случае изменяются, и расчет производится с учетом этих изменений (рис. 8). В итоге осадка на немерзлом грунтовым массиве составила 58 мм, что также свидетельствует о значительных изменениях в поведении грунтов при переходе от мерзлого состояния к немерзлому.

Характеристики грунтов

№ ИГЭ	Наименование грунта	Цвет	Модуль деформации, кН/м ²	Коэффициент Пуассона	Удельный вес грунта, кН/м ³	Коэффициент пористости	Природная влажность, %	Показатель текучести IL	Вода Лёсс Насыпь Органи-	Коэффициент пористости e	Удельное сцепление c, кН/м ²	Угол внутреннего трения φ_i , °	Предельное напряжение R_s , кН/м ²	Коэффициент Савинова C_o , кН/м ³	Коэффициент пропорциональности K, тс/м ^{**4} и код грунта
1	Песок		28000	0.3	16.6	5	0.12		0.66	2	32	0.02	9806.65	440	
2	Суглинок		10000	0.3	17.1	5	0.25	0.2	0.74	14	14	0.4	8825.98	400	
3	Супесь		26000	0.3	21.9	5	0.13	0.1	0.36	39	26	0.16	14710	378	

Рис. 8. Характеристики немерзлого грунтового массива

Перемещения элементов каркаса по вычисленным результатам разных вариантов грунтового массива представлены на рисунках 9 и 10 (для наглядности перемещения элементов каркаса увеличены в 50 раз).

При моделировании системы с полностью замороженным грунтом наблюдается снижение осадки и крена здания по сравнению с аналогичными показателями на грунтах в умеренных климатических условиях. Это снижение объясняется увеличенной жесткостью мерзлого основания. Замороженный грунт становится значительно более прочным и жестким, что снижает его подвижность и сопротивляемость деформациям под нагрузкой. В результате, нагрузка распределяется более

равномерно по жесткому основанию, что приводит к уменьшению осадки и крена здания.

В противоположность этому, когда рассматривается сценарий с оттаиванием верхних слоев грунта, наблюдаются иные результаты. Оттаивание верхних слоев приводит к неравномерной осадке основания, поскольку верхний слой становится более пластичным и подверженным деформациям. Эта неравномерная осадка вызывает увеличение усилий в несущих конструкциях здания, таких как колонны и балки, так как нагрузки распределяются неравномерно. Это может привести к возникновению дополнительных напряжений и ухудшению структурной стабильности, если не принять соответствующих мер.

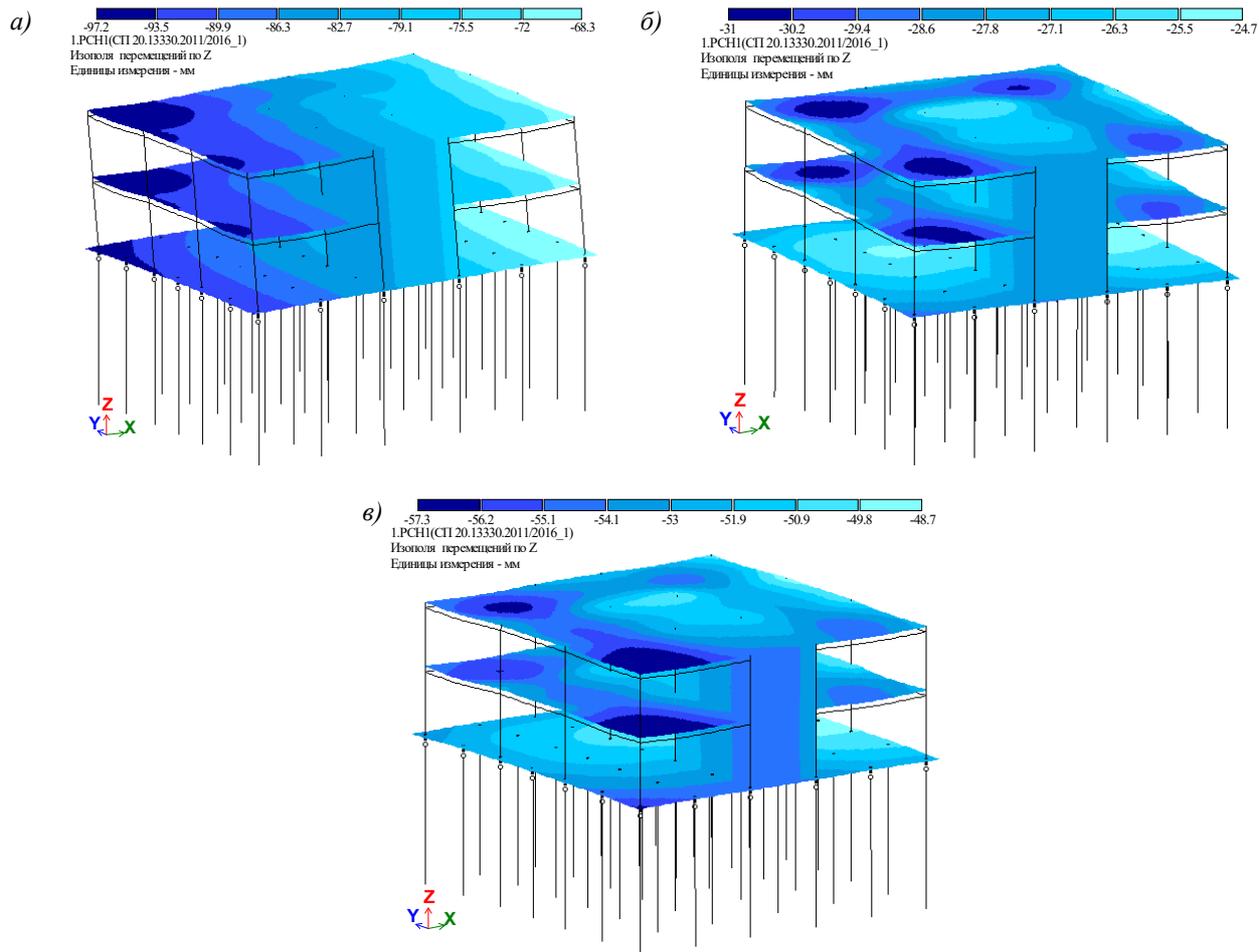


Рис. 9. Изополю перемещений по оси z: а – при оттаивании грунта; б – при мерзлом состоянии грунта; в – при немерзлом состоянии грунта

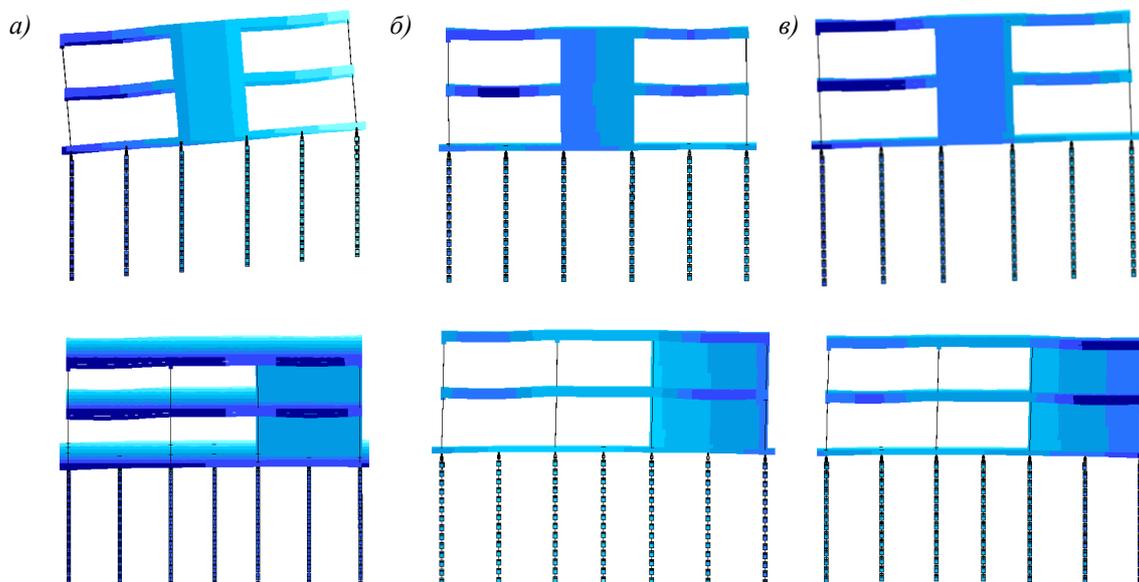


Рис. 10. Перемещения элементов каркаса здания вид с фронтальной (вверху) и торцевой стороны (внизу) здания: а – при оттаивании грунта; б – при мерзлом состоянии грунта; в – при немерзлом состоянии грунта

Эти различия подчеркивают важность учета всех факторов при проведении расчетов. Необходимо учитывать состояние грунта (замороженный или оттаявший), физико-

механические характеристики грунта и сезонные климатические изменения. Также следует моделировать взаимодействие фундамента и

грунта, чтобы получить более точные результаты по осадке и крену здания.

Для наглядной оценки влияния различных типов грунтов на проектируемое здание,

результаты расчетов по ключевым показателям, таким как осадка, крен и усилия в несущих конструкциях, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчета модели здания на грунтовом основании разных условий

Показатель	Талый грунт	Мерзлый грунт	Немерзлый грунт
Осадка, мм	92	31	57
Плита покрытия			
Напряжения M_x (min/max), кН·м	-58,9/20,4	-62,1/20,3	-62,6/20,4
Напряжения M_y (min/max), кН·м	-66,6/18,5	-70,3/18,5	-71,9/18,6
Плита ростверка			
Напряжения M_x (min/max), кН·м	-195/121	-190/97,9	-188/101
Напряжения M_y (min/max), кН·м	187/101	-183/105	-188/100
Площадь полной арматуры m_{ax} (верхняя зона плиты, ось X), см ²	24,5 (s200d25)	24,5 (s200d25)	24,5 (s200d25)
Площадь полной арматуры m_{ax} (верхняя зона плиты, ось Y), см ²	19 (s200d22)	19 (s200d22)	19 (s200d22)
Площадь полной арматуры m_{ax} (нижняя зона плиты, ось X), см ²	7,69 (s200d14)	7,69 (s200d14)	7,69 (s200d14)
Площадь полной арматуры m_{ax} (нижняя зона плиты, ось Y), см ²	7,69 (s200d14)	7,69 (s200d14)	5,66 (s200d12)
Площадь полной вертикальной арматуры колонн m_{ax} , см ²	14,8	12,6	12,9
Площадь полной арматуры балок m_{ax} , см ²	8,92	8,99	9,08
Сваи			
Нагрузка на сваи min/max, кН	298/456	352/412	298/456
Несущая способность свай min/max, кН	817/834	1490/1500	817/834

Результаты расчетов, представленные в табл. 1, показывают различия в поведении конструкции в зависимости от типа грунта.

Осадка основания значительно варьируется в зависимости от состояния грунта. В случае талого грунта осадка составляет 92 мм, что является наибольшим значением среди всех рассматриваемых типов грунтов. Это указывает на значительное влияние таяния верхних слоев грунта на деформации основания. В мерзлом грунте осадка равна 31 мм, что значительно меньше по сравнению с талым грунтом. Это связано с повышенной жесткостью мерзлого грунта, которая ограничивает деформации. Немерзлый грунт демонстрирует осадку в 57 мм, что находится между значениями для талого и мерзлого грунтов, показывая умеренные деформации.

Анализ напряжений в плитах перекрытия показывает, что максимальные отрицательные напряжения в плитах наиболее выражены для немерзлого грунта, составляя -62,6 кН·м, а наименьшие положительные значения наблюдаются в талом грунте - 20,4 кН·м. В мерзлом грунте напряжения близки к значениям для немерзлого грунта. Максимальные напряжения по оси Y также выше в немерзлом грунте (-71,9 кН·м), чем в мерзлом грунте, и ниже в талом грунте (18,5 кН·м).

В плите ростверка напряжения по оси X достигают максимальных отрицательных

значений в мерзлом грунте (-190 кН·м), в то время как для талого и немерзлого грунтов они близки. По оси Y напряжения для плиты ростверка в талом грунте наибольшие (187/101 кН·м), в то время как для мерзлого грунта напряжения более сбалансированы, а для немерзлого грунта они близки к значениям для мерзлого грунта.

Выводы.

1. Анализ распределения напряжений и деформаций в плитах перекрытия и ростверке для трех рассматриваемых расчетных моделей демонстрирует их общую закономерность. Изополя перемещений показывают неоднородное распределение деформаций, которое плавно увеличивается при увеличении толщины слоев песчаного и суглинистого грунта, в то время как деформации уменьшаются при увеличении толщины слоя супеси. Это свидетельствует о том, что крен здания может возникнуть не только из-за выраженной асимметрии жесткостных характеристик конструкций или неравномерного распределения нагрузок, но также из-за неоднородности грунтового массива. Включение фундамента и конструктивных элементов здания в расчет на изгиб из-за неравномерных осадок основания способствует снижению этих неравномерностей. Интенсивность этого процесса возрастает при уменьшении податливости основания.

2. Напряжения в конструктивных элементах зависят от геометрических параметров и жесткости здания, а также от инженерно-геологических условий грунтового основания. В условиях неравномерных осадок основания не возникает дополнительных усилий; наоборот, конструкции и фундаменты с определенной жесткостью не могут полностью следовать за осадкой основания, что приводит к перераспределению давления. В результате происходит снижение давления в зонах с более высокой податливостью грунта и увеличение давления в более жестких участках, что вызывает перераспределение нагрузки и может приводить к дополнительным деформациям и напряжениям в конструктивных элементах.

3. Расхождение напряжений M для расчетных схем на талых и немерзлых грунтах варьируется от 0,5 до 7,5 %, при этом разница в осадке составляет 40 %. Для мерзлых и немерзлых грунтов расхождение напряжений M составляет от 0,5 до 2,7 %, а разница в осадке – 45,6 %. Между талым и мерзлым грунтами расхождение напряжений M колеблется от 0,5 до 19,1 %, с разницей в осадке 67,4 %.

4. Анализ распределения арматуры в плите ростверка по трем расчетным вариантам показал, что различия в напряжениях незначительны, что приводит к схожести шагов арматуры и диаметра для всех случаев – 14 мм. Единственное отличие наблюдается в диаметре арматуры нижней зоны плиты по оси Y для немерзлых грунтов, где диаметр составляет 12 мм.

5. По результатам расчета нагрузок на сваи и их несущей способности в различных грунтовых условиях, можно отметить, что сваи в немерзлых и мерзлых грунтах с учетом оттаивания показывают одинаковые значения. Однако сваи в полностью мерзлом грунте имеют несущую способность, которая почти в два раза превышает показатели для других вариантов. Это объясняется большей величиной модуля деформации мерзлых грунтов.

6. Практическое решение задачи показало, что неравномерные осадки основания и фундамента приводят к значительному перераспределению усилий в элементах надземной части здания. Таким образом, корректность расчета возможна только при совместном учете зданий и оснований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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. 6. № 2. С. 78–83.

2. Алешина Т.А. Строительство на мерзлоте: опыт и новшества [Электронный ресурс]. URL: sibforum.sfu-kras.ru/node/106 (дата обращения: 05.09.2024).

3. Васьковский А.П., Шкляр Н.Д. Конструкции гражданских зданий для строительства на Севере. Л.: Стройиздат, 1979. 136 с.

4. 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.

5. Тазаян Ю. Строительство зданий и сооружений на вечной мерзлоте // Молодой ученый URL: <https://moluch.ru/archive/338/75879/> (дата обращения: 05.09.2024).

6. Шикломанов Н.И., Стрелецкий Д.А., Гребенец В.И., Луис С. Покорение вечной мерзлоты: развитие городской инфраструктуры в Норильске, Россия // Полярная география. 2017. С. 22–32.

7. Sun L., Mahmoud A., Ding Y., Yetisir M., Numerical analysis of permafrost heat transfer for small module reactor installation in northern areas // International Journal of Thermofluids. 2022. Vol. 16. 100202. DOI: 10.1016/j.ijft.2022.100202.

8. Hwang C.T., Murray D.W., Brooker E.W. A Thermal Analysis for Structures on permafrost // Canadian Geotechnical Journal. 2011. Vol. 9(1). Pp. 33–46. DOI: 10.1139/t72-003.

9. Rūhaak W., Anbergen H., Grenier Ch., McKenzie J., Kurylyk B.L., Molson J., Roux N., Sass I. Benchmarking Numerical Freeze/Thaw Models // Energy Procedia. 2015. Vol. 76. Pp. 301–310. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.07.866.

10. Burn C.R., Mackay J.R., Kokelj S.V. The thermal regime of permafrost and its susceptibility to degradation in upland terrain near Inuvik, N.W.T // Permafrost and Periglacial Processes. 2009. Vol. 20. Pp. 221–227 DOI: 10.1002/ppp.649

11. Kurylyk B.L., McKenzie J.M., MacQuarrie K.T.B., Voss C.I. Analytical solutions for benchmarking cold regions subsurface water flow and energy transport models: One-dimensional soil thaw with conduction and advection // Advances in Water Resources. 2014. Vol. 70. Pp. 172–184. DOI: 10.1016/j.advwatres.2014.05.005.

12. Улицкий В.М., Шашкин А.Г., Шашкин К.Г., Шашкин В.А. Основы совместных расчетов зданий и оснований. – Спб.: Геореконструкция, 2014. 328 с.

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

14. Егорова Е.С., Иоскевич А.В., Иоскевич В.В., Агишев К.Н., Кожевников В.Ю. Модели грунтов, реализованные в программных

комплексах SCAD Office и Plaxis 3D // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2016. № 3. С. 31–60. DOI: 10.18720/CUBS.42.3

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

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

17. 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.

18. Tan X., Chen W., Tian H., Cao J. Water flow and heat transport including ice/water phase change in porous media: Numerical simulation and application // Cold Regions Science and Technology. 2011. Vol. 68. Pp. 74–84. DOI: 10.1016/j.coldregions.2011.04.004.

19. Hansson K., Šimůnek J., Mizoguchi M., Lundin L.-C., van Genuchten M.T. Water flow and

heat transport in frozen soil: Numerical solution and freeze-thaw applications // Vadose Zone Journal. 2004. Vol. 3. Pp. 693–704. DOI: 10.2113/3.2.693.

20. Painter S.L. Three-phase numerical model of water migration in partially frozen geological media: Model formulation, validation, and applications // Computational Geosciences. 2011. Vol. 15. Pp. 69–85. DOI: 10.1007/s10596-010-9197-z

21. Розин Л.А. Основы метода конечных элементов в теории упругости. Л.: Издательство ЛПИ, 1972. 77 с.

22. Нагаева С.П., Кочеткова А.А. Определенные несущей способности сваи в вечномерзлых грунтах. – Новгород: ННГАСУ, 2022. 73 с.

23. Пьянков С.А. Механика грунтов. – Ульяновск: УлГТУ, 2018. 195 с.

24. Бурлакова А.М., Кондратьева Л.Е., Маврина С.А., Филатов В.В. Математическое моделирование. Владимир: Издво ВлГУ, 2017. 128 с.

25. Пастернак П.Л. Основы нового метода расчета фундаментов на упругом основании при помощи двух коэффициентов постели. М.: Госстройиздат, 1954. 56 с.

Информация об авторах

Меркулов Сергей Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой промышленного и гражданского строительства. E-mail: mersi.dom@yandex.ru. Курский государственный университет. Россия, 305000, Курск, ул. Радищева, д. 33.

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

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

Поступила 30.03.2024 г.

© Меркулов С.И., Есипов С.М., Дьяченко А.Ю., 2025

Merkulov S.I., *Esipov S.M., Dyachenko A.Yu.
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhova
*E-mail: sk31.sm@gmail.com

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE STRESS-STRAIN STATE OF A BUILDING ON FROZEN AND NON-FROZEN SOILS

Abstract. The article considers the issues of assessing the stress-strain state of buildings and structures erected on foundations with different soil conditions, including frozen, non-frozen and thawing soils. The main attention is paid to the influence of the soil mass on the foundation settlement and the stability of structures, as well as the use of modern calculation methods for analyzing the interaction "building + foundation + base". The paper uses comparative analysis methods to assess foundation settlements and stresses in supporting structures for different types of soil. The results of calculating a spatial model of a building, including a frame, foundation, and base, using the LIRA-SAPR and SAPFIR software packages are considered. Key parameters, such as foundation settlement, stresses in floor slabs and grillage, as well as reinforcement areas in different

zones of the structure, were analyzed in detail for different soil conditions. The results show a significant impact of soil type on foundation settlement and redistribution of forces in structures. In particular, it was found that settlement and stress in structures depend not only on the type of soil, but also on its condition (frozen, unfrozen, thawing). It was also found that frozen soils provide less settlement and less tilt of the building compared to thawed and unfrozen soils. Practical application of the obtained data emphasizes the need to take into account all factors affecting the soil massif for correct design and ensuring the reliability of building structures.

Keywords: stress-strain state, foundation settlement, frozen and unfrozen soils, frame building, finite element methods, software packages

REFERENCES

1. Alekseeva O.I., Balobaev V.T., Grigoriev M.N., Makarov V.N., Zhang R.V., Shats M.M., Shepelev V.V. On the problems of urban development in the cryolithozone (on the example of Yakutsk) [O problemah gradostroitel'stva v kriolitozone (na primere YAkut'ska)]. *Kriosfera Zemli*. 2007. Vol. 6. No. 2. Pp. 78–83. (rus)
2. Aleshina T.A. Construction on permafrost: experience and innovations [Stroitel'stvo na merzlotе: opyt i novshestva] [Electronic resource]. URL: sibforum.sfu-kras.ru/node/106 (date of access: 09/05/2024). (rus)
3. Vas'kovsky A.P., Shklyarov N.D. Civil engineering structures for construction in the North [Konstrukcii grazhdanskikh zdaniy dlya stroitel'stva na Severe]. L.: Stroyizdat, 1979. 136 p. (rus)
4. Okhlopko T.V., Guryanov 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]. *Engineering Bulletin of the Don*. 2018. No. 4. Pp. 62–75. (rus)
5. Tazayan Yu. Construction of buildings and structures on permafrost [Stroitel'stvo zdaniy i sooruzhenij na vechnoj merzlotе]. *Molodoj uchenyj* [Electronic resource]. URL: <https://moluch.ru/archive/338/75879/> (date of access: 09/05/2024). (rus)
6. Shiklomanov N.I., Streletsky D.A., Grebenets V.I., Louis S. Conquering permafrost: development of urban infrastructure in Norilsk, Russia [Pokorenie vechnoj merzloty: razvitie gorodskoj infrastruktury v Noril'ske, Rossiya]. *Polar Geography*. 2017. Pp. 22–32. (rus)
7. Sun L., Mahmoud A., Ding Y., Yetisir M. Numerical analysis of permafrost heat transfer for small module reactor installation in northern areas. *International Journal of Thermofluids*. 2022. Vol. 16. 100202. DOI: 10.1016/j.ijft.2022.100202.
8. Hwang C.T., Murray D.W., Brooker E.W. A Thermal Analysis for Structures on permafrost. *Canadian Geotechnical Journal*. 2011. Vol. 9(1). Pp. 33–46. DOI: 10.1139/t72-003.
9. Rühaak W., Anbergen H., Grenier Ch., McKenzie J., Kurylyk B.L., Molson J., Roux N., Sass I. Benchmarking Numerical Freeze/Thaw Models. *Energy Procedia*. 2015. Vol. 76. Pp. 301–310. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.07.866.
10. Burn C.R., Mackay J.R., Kokelj S.V. The thermal regime of permafrost and its susceptibility to degradation in upland terrain near Inuvik, N.W.T. *Permafrost and Periglacial Processes*. 2009. Vol. 20. Pp. 221–227 DOI: 10.1002/ppp.649.
11. Kurylyk B.L., McKenzie J.M., MacQuarrie K.T.B., Voss C.I. Analytical solutions for benchmarking cold regions subsurface water flow and energy transport models: One-dimensional soil thaw with conduction and advection. *Advances in Water Resources*. 2014. Vol. 70. Pp. 172–184. DOI: 10.1016/j.advwatres.2014.05.005.
12. Ulitsky V.M., Shashkin A.G., Shashkin K.G., Shashkin V.A. Basics of joint calculations of buildings and foundations [Osnovy sovmestnyh raschetov zdaniy i osnovanij]. - St. Petersburg: Georekonstruktsiya, 2014. 328 p. (rus)
13. Andreev V.I. Calculation of the model of the structure-foundation-base system taking into account shear deformations [Raschet modeli sistemy konstruktsiya – fundament – osnovanie s uchedom deformatsij sdviga]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenij*. 2010. No. 6. Pp. 2–5. (rus)
14. Egorova E.S., Ioskevich A.V., Ioskevich V.V., Agishev K.N., Kozhevnikov V.Yu. Soil models implemented in the SCAD Office and Plaxis 3D software packages [Modeli gruntov, realizovannye v programmnykh kompleksah SCAD Office i Plaxis 3D]. *Construction of unique buildings and structures*. 2016. No. 3. Pp. 31–60. DOI: 10.18720/CUBS.42.3 (rus)
15. Kocherzhenko V.V. Innovative pile technologies in modern foundation engineering [Innovacionnye svajnye tekhnologii v sovremennom fundamentostroenii]. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2022. No. 4. Pp. 57–67. (rus)
16. Maystruk A.G., Pegin P.A. Analysis of the design of foundations built on permafrost soils [Analiz konstrukcii fundamentov, ustraivaemykh na vechnomerzlykh gruntah]. *Zametki uchenogo*. 2021. No. 9. P. 31–35. (rus)
17. Nikiforova N.S., Konnov A.V. Forecast of the soil deformations and decrease in 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.

18. Tan X., Chen W., Tian H., Cao J. Water flow and heat transport including ice/water phase change in porous media: Numerical simulation and application. Cold Regions Science and Technology. 2011. Vol. 68. Pp. 74–84. DOI: 10.1016/j.coldregions.2011.04.004.

19. Hansson K., Šimůnek J., Mizoguchi M., Lundin L.-C., van Genuchten M.T. Water flow and heat transport in frozen soil: Numerical solution and freeze-thaw applications. Vadose Zone Journal. 2004. Vol. 3. P. 693–704. DOI: 10.2113/3.2.693.

20. Painter S.L. Three-phase numerical model of water migration in partially frozen geological media: Model formulation, validation, and applications. Computational Geosciences. 2011. Vol. 15. Pp. 69–85. DOI: 10.1007/s10596-010-9197-z

21. Rozin L.A. Fundamentals of the finite element method in elasticity theory [Osnovy metoda

konechnykh elementov v teorii uprugosti]. L.: LPI Publishing House, 1972. 77 p. (rus)

22. Nagaeva S.P., Kochetkova A.A. Determination of the bearing capacity of a pile in permafrost soils [Opredelenie nesushchej sposobnosti svai v vechnomerzlyh gruntah]. - Novgorod: NNGASU, 2022. 73 p. (rus)

23. Pyankov S.A. Soil mechanics [Mekhanika gruntov]. - Ulyanovsk: UISTU, 2018. 195 p. (rus)

24. Burlakova A.M., Kondratieva L.E., Mavrina S.A., Filatov V.V. Mathematical modeling [Matematicheskoe modelirovanie]. Vladimir: Izdvo VISU, 2017. 128 p. (rus)

25. Pasternak P.L. Fundamentals of a new method for calculating foundations on an elastic base using two bedding coefficients [Osnovy novogo metoda rascheta fundamentov na uprugom osnovanii pri pomoshchi dvuh koefficientov posteli]. M.: Gosstroyizdat, 1954. 56 p. (rus)

Information about the authors

Merkulov, Sergey I. Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Industrial and Civil Engineering. E-mail: mersi.dom@yandex.ru. Kursk State University. Russia, 305000, Kursk, st. Radishcheva, 33.

Esipov, Stanislav M. PhD, Assistant professor. E-mail: sk31.sm@gmail.com. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Diachenko, Anastasia U. Master student. E-mail: dyachenko.anastasya28n@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 30.03.2024

Для цитирования:

Меркулов С.И., Есипов С.М., Дьяченко А.Ю. Сравнительный анализ напряженно-деформированного состояния здания на мерзлых и немерзлых грунтах // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2025. № 2. С. 31–44. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-2-31-44

For citation:

Merkulov S.I., Esipov S.M., Dyachenko A.Yu. Comparative analysis of the stress-strain state of a building on frozen and non-frozen soils. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2025. No. 2. Pp. 31–44. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-10-2-31-44