



Научная статья  
УДК 622.83

## Оценка деформаций при строительстве эскалаторных тоннелей метрополитена способом искусственного замораживания грунтов для стадии формирования ледопородного ограждения

Е.М.ВОЛОХОВ, Д.З.МУКМИНОВА ✉

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

**Как цитировать эту статью:** Волохов Е.М. Оценка деформаций при строительстве эскалаторных тоннелей метрополитена способом искусственного замораживания грунтов для стадии формирования ледопородного ограждения / Е.М.Волохов, Д.З.Мукминова // Записки Горного института. 2021. Т. 252. С. 826-839. DOI: 10.31897/PMI.2021.6.5

**Аннотация.** Работа посвящена изучению процессов сдвижений и деформаций поверхности при строительстве эскалаторных тоннелей метрополитена способом искусственного замораживания грунтов. Рассмотрены особенности технологии строительства и замораживания, характеристики пород, в которых производится проходка эскалаторных тоннелей. Представлены данные специально организованных, натуральных маркшейдерских наблюдений за деформациями на земной поверхности. Определены основные факторы, влияющие на деформационные процессы в замороженной толще слоистого неоднородного массива с наклонной выработкой, показана сложность прогнозной задачи и необходимость упрощения расчетной схемы. Работа ориентирована на оценку наименее изученных геомеханических процессов пучений-поднятий и деформаций в периоды активной и пассивной стадий замораживания. При изучении процессов сдвижений земной поверхности и породного массива использовался метод конечных элементов и анализ полученных данных с использованием натуральных наблюдений за сдвигами. Для моделирования предложена упрощенная расчетная схема, позволяющая учитывать неравномерное влияние замораживаемых пород неоднородной слоистой толщи массива с крупной наклонной тоннельной выработкой. Показана удовлетворительная сходимости данных натуральных маркшейдерских наблюдений на земной поверхности и результатов моделирования геомеханических процессов для периода активной и пассивной стадий замораживания. Предложенная схема расчета рекомендована для прогноза деформаций на стадиях подземного строительства, характеризующихся развитием на поверхности наиболее опасных для зданий и сооружений деформаций растяжения.

**Ключевые слова:** эскалаторные тоннели; замораживание грунтов; активная и пассивная стадия замораживания; сдвижение и деформация пород; пучение; оседание земной поверхности

**Благодарность.** Исследование выполнено за счет субсидии на выполнение государственного задания в сфере научной деятельности на 2021 год № FSRW-2020-0014.

Принята: 30.11.2021

Онлайн: 28.02.2022

Опубликована: 27.12.2021

**Введение.** Развитие современных мегаполисов невозможно без совершенствования их транспортной инфраструктуры. Одним из надежных и проверенных решений в области развития системы общественного транспорта является проектирование и строительство метрополитенов. Большое сечение выработок метрополитена, часто неглубокое заложение и сложная компоновка создают неблагоприятные условия для проявления деформаций на земной поверхности и определяют проблему охраны зданий и сооружений от вредного влияния горных работ, особенно для районов с плотной исторической застройкой.

Из известного комплекса выработок метрополитена глубокого заложения наиболее существенное влияние на земную поверхность и подрабатываемые здания оказывает строительство эскалаторных тоннелей, соединяющих станцию с земной поверхностью. Например, при строительстве комплекса основных станционных тоннелей (согласно имеющимся данным натуральных наблюдений) оседания

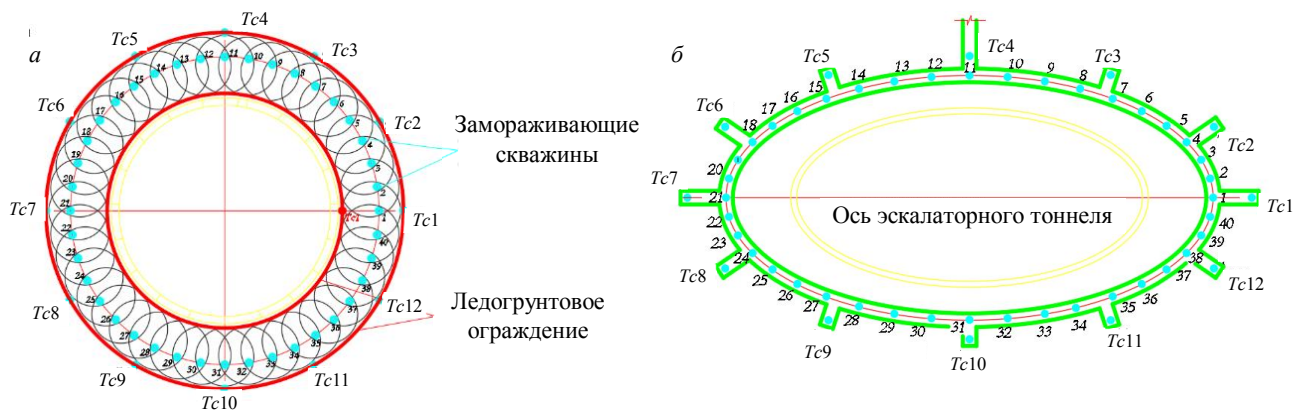


Рис.1. Расположение замораживающих термометрических скважин перпендикулярно оси тоннеля (а) и на земной поверхности (б) [27]

на поверхности, как правило, не превышают 100 мм, а при строительстве эскалаторных тоннелей эти значения могут достигать 400-450 мм [15]. В сложных инженерно-геологических условиях (при наличии в толще слабых, неустойчивых пород и нескольких водоносных горизонтов) проходка таких наклонных выработок осуществляется только специальными способами, например, способом замораживания. Для горно-геологических условий Санкт-Петербурга и Москвы строительство эскалаторных тоннелей способом замораживания является экономически более выгодным и технически хорошо отработанным в сравнении с новым способом на базе тоннелепроходческих механизированных комплексов (ТПМК) [13, 16].

Подземное строительство всегда сопровождается нарушением напряженно-деформированного состояния массива, а при строительстве эскалаторных тоннелей способом замораживания эти нарушения связаны не только с проходкой выработки, но и с процессами нарастания ледопородного ограждения, а затем и оттаивания горных пород.

При классическом способе замораживания грунтов вокруг будущего сооружения искусственным образом создается временное ледогрунтовое ограждение [7, 17]. Это ограждение формируется из ледопородных цилиндров замороженных пород, формирующихся вокруг скважин, пробуриваемых по внешнему контуру подземного сооружения (рис.1). Технологически здесь выделяют три стадии: активное замораживание (формирование в массиве ледопородного ограждения), пассивное замораживание (поддержание грунта в замороженном состоянии на период строительства) и оттаивание ледопородного ограждения (после завершения проходки).

На первом этапе начинают проявляться и развиваться деформации, неравномерные пучения пород в массиве. Они проявляются и на земной поверхности, приводя к развитию наиболее опасных для существующих объектов деформаций растяжения над осью тоннеля. Для второго этапа также характерно проявление развития пучений (они не стабилизируются и продолжают нарастать). Скорость развития пучений-поднятий на земной поверхности здесь в два-три раза меньше, чем при активной стадии замораживания, однако суммарные максимальные значения пучений на поверхности могут достигать 200-250 мм [4]. Процесс естественного оттаивания пород на третьем этапе продолжается до 4-5 лет после завершения строительства. Этап характеризуется медленным развитием оседаний и сложных, неоднородных деформаций в породном массиве за счет наложения процессов восстановления объема пород при оттаивании, вторичного перераспределения напряжений и деформаций, снижения показателей прочностных и деформационных свойств пород, миграции грунтовых вод и вымывания с ней породных частиц.

Несмотря на большое количество исследований в области механики пучинистых грунтов и мерзлотоведения, искусственного замораживания грунтов, геомеханического контроля и оценки сдвижений, проблема достоверной количественной оценки деформаций при использовании данной технологии по-прежнему актуальна, так как в исследованиях в области механики пучинистых грунтов [26, 28] математически описываются циклические процессы оттаивания и промерзания приповерхностных толщ грунтов, но практически не рассматриваются деформационные процессы при искусственном (регулируемом) замораживании. В исследованиях в области



искусственного замораживания грунтов [1, 5, 6] главное внимание уделено оценке движения фронта промерзания через описание теплофизических и геомеханических процессов [11], оценке толщины ледопородных ограждений, их прочности и изменения модуля деформаций, но не оценке деформаций при замораживании-оттаивании пород. Многочисленные исследования в области геомеханической оценки сдвижений при подземном строительстве [3, 22, 25], ориентированные именно на количественное описание деформационных процессов на поверхности, часто оперируют горизонтальными выработками [29, 30] и не рассматривают в расчетных оценках замораживание как силовой или механических фактор [3, 22].

Наиболее глубокая и комплексная проработка вопросов оценки сдвижений при строительстве эскалаторных тоннелей была сделана С.Н.Сильвестровым\*. Несмотря на ряд очевидных достоинств комплексного подхода С.Н.Сильвестрова, использовавшего теоретические методы, натурные данные и физическое моделирование, приходится отметить, что в его методе не учитывается влияние деформационных процессов в период нарастания ледопородного ограждения и дискретная неоднородность породного массива, а также слишком упрощены подходы к определению положения точки максимальных оседаний в мульде, оценке формы и положению границ зоны деформаций на поверхности.

В современных работах, опирающихся на численное моделирование методом конечных элементов [2, 20, 21], также предпринимались попытки оценить сдвижения пород и земной поверхности для эскалаторных тоннелей. Однако сравнение данных такого моделирования с данными, полученными по традиционной методике и по натурным данным, показало их существенные расхождения [16], которые объяснялись часто имеющим место на практике значительным перемораживанием грунта, а также наложением двух разных процессов – обусловленным замораживанием-оттаиванием пород и собственно горными работами при проходке тоннелей. Главным недостатком таких модельных исследований следует признать недостаточное использование результатов маркшейдерских наблюдений, которые способны позволить корректно верифицировать такие конечно-элементные модели.

Представленный обзор позволяет отметить следующие основные недостатки применяемых ранее подходов к оценке деформаций при строительстве эскалаторных тоннелей способом замораживания:

- отсутствие в большинстве работ комплексного подхода, сочетающего теоретическую оценку движения фронта промерзания, эмпирические методы и моделирование, для выявления закономерностей сдвижений и оценки реальных параметров ледопородного ограждения;
- недопустимое усреднение параметров ледопородного ограждения по литологическим разностям и по сечению выработки;
- игнорирование в расчетных оценках деформаций для стадии формирования ледогрунтового ограждения, при которой развиваются большие деформации растяжения на поверхности;
- отсутствие зависимостей для определения параметров процесса сдвижения под конкретные горно-геологические условия, которые используют в инженерных методах.

Сложная задача количественной оценки параметров процесса сдвижений и деформаций в породном массиве при строительстве эскалаторных тоннелей способом замораживания связана с одновременным рассмотрением разных по физической природе процессов, сложным трехмерным и асимметричным характером силового воздействия, физических, теплофизических и гидрогеологических процессов, параметры по которым меняются во времени. Необходимо разделение задачи на ряд более простых последовательных, обоснованное исключение из расчета второстепенных факторов и параметров, привлечение теоретических методов и обобщение натурных данных, упрощение расчетных схем.

Из-за малой изученности процессов деформирования массива на первых двух технологических стадиях строительства эскалаторных тоннелей (стадиях развития зон замораживания), а также проявления наиболее опасных для зданий и сооружений деформаций растяжения, задача

---

\* Пособие по проектированию мероприятий для защиты эксплуатируемых зданий и сооружений от влияния горнопроходческих работ при строительстве метрополитена / В.Ф.Подиков, Ю.Ф.Соловьев, В.М.Капустин и др. Л.: Стройиздат, 1973. 72 с.



построения прогнозной оценки наиболее актуальна. Более простая физическая природа процессов первых стадий позволяет рассматривать возможности разработки современных способов достоверного и доступного прогнозирования проявлений указанных процессов. Далее рассматриваются процессы, связанные со стадиями замораживания, для которых необходимо обосновать расчетную схему и методику оценки сдвижений и деформаций, учитывающую основные факторы и типовые данные инженерных изысканий.

**Постановка задачи оценки деформаций.** *Постановка прогнозного расчета.* Сложная геомеханическая задача прогнозной оценки деформаций в современных условиях может быть успешно решена на основе моделирования численными методами. Эти методы апробированы и достаточно распространены в исследовательской практике [12, 18, 24]. Они позволяют учесть в расчетах геологическую неоднородность толщи пород, изменение свойств пород при замораживании, физическую нелинейность, температурные деформации пород, деформации при проходке выработок, в том числе и по стадиям (отбойка и обнажение пород, временное крепление, постоянное крепление и т.д.), причем на уровне корректного описания физико-механических процессов. Такой подход имеет и недостатки – расчеты являются приближенными и напрямую зависят от входных свойств, параметров и моделей среды. Указанные недостатки возможно минимизировать путем использования многовариантного моделирования и корректировки моделей на основе натуральных данных (т.е. верификации моделей). В качестве натуральных данных для этих целей предлагается использовать данные по деформациям земной поверхности и контуров выработок как выходных параметров математических моделей.

Использование сложных моделей сред, учитывающих кроме механических свойств и свойства тепломассопереноса, не всегда оправдано. Поэтому в большинстве случаев можно обойтись однофазными физическими моделями пород и корректным заданием рассчитанных теоретически деформаций пучения в режиме моделирования заданных деформаций.

Ключевую роль в развитии деформаций в неоднородном массиве и на поверхности для рассматриваемой технологии замораживания играют именно объемные деформации расширения-сжатия (пучения-уплотнения) при фазовом переходе и степень их развития по толще.

*Оценка формирования ледопородного ограждения.* Начало процесса замораживания водоносных грунтов связано с организацией в породном массиве искусственного теплообмена, при котором вокруг замораживающих скважин формируются зоны отрицательной температуры, где зарождаются и развиваются ледопородные цилиндры, которые имеют неоднородную толщину в каждом слое, а фронт замораживания движется неравномерно (с замедлением) и неоднородно по слоям. Параметры ледопородного цилиндра и его изменений во времени определяются целой группой независимых параметров: температурой ( $t$ ), типом пород, их природной влажностью ( $W$ ), плотностью ( $\rho$ ), теплопроводностью и т.д. Формирование ледопородного ограждения в период активной стадии замораживания связано с набуханием породы, образованием прослоек льда, миграцией воды к фронту промерзания и т.п., что обеспечивает развитие деформаций объемного расширения (пучения) в породном массиве и на земной поверхности [10, 23, 34].

С технологической точки зрения основным количественным показателем замораживания является толщина ледогрунтового ограждения. Замораживающие скважины пересекают множество геологических слоев с различными физико-механическими и теплофизическими характеристиками, которые влияют на скорость движения фронта промерзания. В условиях сложно предсказуемых теплофизических и гидрогеологических процессов на первый план выходит использование средств контроля параметров ограждения (наблюдательные термометрические скважины, геофизические и др. методы), когда толщина ограждения обеспечивается вариацией режима замораживания опытным путем. Наблюдения показывают, что глинистые водонасыщенные грунты тяжелее всего поддаются замораживанию [20, 21], поэтому за период активной стадии замораживания вынужденно принимается период достижения проектной толщины ледопородного ограждения одного из таких «тяжелых» слоев, в это время в других слоях наблюдается перемораживание грунтов и фактическая толщина ледогрунтового ограждения превышает значения проектного.

Для предварительной оценки параметров замораживания исследователями предлагаются различные модели развития фронта замораживания и зависимости для толщины ледогрунтового



ограждения, в том числе и временные [21]. На практике эти предварительные технологические параметры корректируются по результатам контрольных наблюдений за замораживанием, а показатели модели могут уточняться для конкретных горно-геологических условий.

Таким образом, для решения задачи прогноза деформаций нам необходимо численно оценить два главных определяющих параметра: толщину ледогрунтового ограждения (или объем замороженной породы) и относительную объемную деформацию этих замораживаемых пород отдельно по литологическим разностям.

**Методология и методы исследования.** *Теоретический метод оценки развития фронта замораживания.* Оценка толщины ледогрунтового ограждения может быть получена на основе известных зависимостей. Например, для условий строительства эскалаторных тоннелей Д.А.Потемкиным предложена зависимость, определяющая толщину ледогрунтового ограждения по каждой литологической разности [21]:

$$\xi(t) = \frac{A}{\xi(t)} + B \rightarrow A = -\frac{\lambda(T_c - T_{хл})}{\gamma(E_b W_0 + c(T_c - T_3))} t; \quad B = \frac{7,67 \sqrt{\frac{c\lambda}{\gamma}} (T_3 - T_c)}{E_b W_0 + c(T_c - T_3)} \sqrt{t}, \quad (1)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, кДж/м·ч·°С;  $W_0$  – влажность, %;  $c$  – удельная теплоемкость, кДж/кг·°С;  $\gamma$  – объемный вес, т/м<sup>3</sup>;  $T_{хл}$  – температура стенки замораживающей колонки, °С;  $T_c$  – температура сублимации, °С;  $T_3$  – температура замерзания, °С;  $E_b$  – скрытая теплота льдообразования воды, кДж/кг.

Зависимость получена из общего уравнения теплопроводности, учитывает зону перепада температур при охлаждении до начала формирования ледопородного ограждения, используемые параметры оценены для пород четвертичной толщи. Зависимость (1) позволяет рассчитать толщину ледопородного ограждения в момент времени  $t$  (т.е. потенциально может позволить решать задачи с учетом фактора времени), учитывает реальные теплофизические свойства четвертичных пород.

*Обоснование упрощенного способа прогнозной оценки развития деформаций для стадий формирования и поддержания ледопородного ограждения.* Определяющим силовым фактором в расчетной схеме для первых стадий сооружения эскалаторных тоннелей являются нагрузки, связанные с объемным расширением – пучением замораживаемых пород. Поэтому задача его корректного учета по разным геологическим слоям первостепенна. Главными исходными параметрами в таком расчете являются геометрические размеры зоны замороженных пород и параметр, определяющий объемное расширение. Если первый параметр достаточно строго оценивается через известные зависимости типа (1), то второй оценить строгими методами сложно. Именно для второго параметра предлагается обосновать упрощенный подход.

Предпринятый в исследовании первичный модельный анализ с использованием натуральных данных по сдвигениям для тоннелей в Санкт-Петербурге показал, что дифференцированная по слоям модели задаваемая деформация пучения позволяет обеспечить соответствие модельного расчета натурным данным, а показатели деформирования коррелируют с удельными показателя содержания жидкости в порах конкретных пород (которую оценивали по природной влажности пород). В качестве одного из вариантов оценки объемных деформаций был предложен упрощенный подход, основанный на учете известного эффекта объемного расширения воды (несвязной воды в породах) при ее кристаллизации с учетом дифференцированной оценки геометрических параметров реального ледопородного ограждения.

Реализация самой геомеханической задачи объемного расширения может быть основана на использовании численного моделирования (например, методом конечных элементов) в режиме заданных объемных деформаций, позволяющего корректно учесть геометрию неоднородного ледопородного ограждения для эскалаторного тоннеля. При таком упрощенном способе расчет производится на заданный момент времени замораживания через  $\xi = \xi(t)$ . Расчет позволяет учитывать измерение толщины ледопородного ограждения по породным слоям и параметры объемного расширения  $\varepsilon_v$  (оцененные, например, по природной влажности пород), а главное – дополнительную



механическую нагрузку на породный массив от замораживания и динамику его сложного неоднородного деформирования. Расчет не позволяет учесть сложные процессы миграции влаги, связанные с замораживанием или изменением фильтрационных свойств пород, неоднородность температурных полей в подрабатываемой толще и динамику ее изменения (особенно после начала проходки тоннеля)

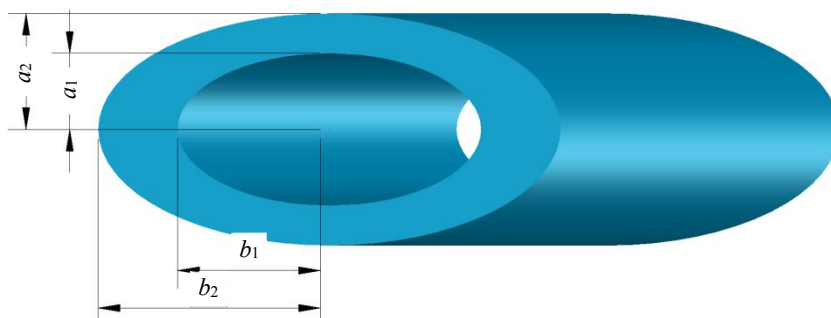


Рис.2. Сектор ледопородного цилиндра мощностью  $h$  в пределах одного слоя (вид сверху)

и другие факторы и процессы, сопровождающие эту технологию, однако характер их влияния на рассматриваемые деформационные процессы, по нашим оценкам, больше связан с показателем природной влажности пород. Последнее утверждение относится к конкретным горно-геологическим условиям и в других условиях требует обоснования или эмпирического подтверждения.

Для учета удельных показателей влажности можно воспользоваться данными стандартных испытаний пород при изысканиях. Основной параметр – относительная природная влажность по массе, поэтому в расчетах его необходимо привести к объемным показателям.

Для учета размеров зон замороженных пород сложной геометрической формы можно воспользоваться формулами аналитической геометрии, если пренебречь негоризонтальностью геологических контактов. В слоистом, дискретно неоднородном массиве с различными физико-механическими и теплофизическими свойствами объем нарастающего ледопородного ограждения на заданный момент времени будем рассчитывать для каждого слоя отдельно по секторам полого усеченного цилиндра (рис.2).

Объем замороженной породы для сектора можно рассчитать по формуле

$$V = \pi a_2 b_2 h - \pi a_1 b_1 h, \quad (2)$$

где  $h$  – мощность геологического слоя, м;  $a_2$  – внешний радиус ледопородного ограждения, м;  $a_1$  – внутренний радиус ледопородного ограждения, м;  $a_2 - a_1$  – проектная толщина ледопородного ограждения, м;  $b_2 - b_1$  – проекция толщины ледопородного ограждения с учетом наклона, м.

Так как ось эскалаторного тоннеля проходит под углом в  $30^\circ$ , то размеры полуосей эллипсов  $b$  можно выразить как

$$\begin{aligned} a_1 &= b_1 \sin 30^\circ = \frac{b_1}{2} \Rightarrow 2a_1 = b_1, \\ a_2 &= b_2 \sin 30^\circ = \frac{b_2}{2} \Rightarrow 2a_2 = b_2. \end{aligned} \quad (3)$$

Подставив выражения (3) в формулу (2), получим:

$$V = \pi a_2 b_2 h - \pi a_1 b_1 h = \pi a_2 2a_2 h - \pi a_1 2a_1 h = 2\pi h(a_2^2 - a_1^2). \quad (4)$$

Таким образом, рассчитываются объемы секторов ледопородного цилиндра проектной толщины для каждого геологического слоя с мощностью  $h$ .

Специфика модельных расчетов (когда размеры зон замораживания по литологическим разностям технически сложно дифференцировать и задать в модели) не позволяет просто вводить в расчет индивидуальные параметры толщины ограждения по породам, обычно приходится обходиться однородной (на всю длину тоннеля) толщиной ледопородного ограждения. Для упрощения таких модельных расчетов в качестве условной однородной толщины логичнее принимать проектную толщину. Поэтому для корректной оценки деформаций в расчетах необходимо дополнительно



учитывать несоответствие проектного (усредненного) объема ледопородного ограждения фактическому (например, оцененному по методу Д.А.Потемкина). Такой учет возможен через расчет показателя, учитывающего разницу этих объемов для каждого выделенного в модели слоя пород.

Важным для геомеханических расчетов параметром ледопородного ограждения является несимметричность развития ледопородных цилиндров вокруг скважин из-за неоднородности теплофизических параметров по внутреннему и внешнему контуру ограждения. Наблюдения за развитием ледопородных ограждений при строительстве эскалаторных тоннелей показывают, что на внутреннюю часть приходится 60 % от общей толщины и 40 % на внешнюю часть (см. рис.1, а).

Для учета указанной асимметрии и перехода на фактическую толщину ограждения введем параметр  $r$  (радиус сечения осевой поверхности замораживающих скважин):

$$\begin{aligned} a'_1 &= r - 0,6\xi_{\text{рас}}, \\ a'_2 &= r + 0,4\xi_{\text{рас}}. \end{aligned} \quad (5)$$

Полученные выражения (5) подставляем в формулу (4), получим объем сектора для каждого геологического слоя мощностью  $h$ :

$$\begin{aligned} V' &= 2\pi h(a_2^2 - a_1^2) = 2\pi h((r + 0,4\xi_{\text{рас}})^2 - (r - 0,6\xi_{\text{рас}})^2) = \\ &= 2\pi h(r^2 + 0,8r\xi_{\text{рас}} + 0,16\xi_{\text{рас}}^2 - r^2 + 0,12r\xi_{\text{рас}} - 0,36\xi_{\text{рас}}^2) = \\ &= 2\pi h(2r\xi_{\text{рас}} - 0,2\xi_{\text{рас}}^2) = 4\pi h\xi_{\text{рас}}(r - 0,1\xi_{\text{рас}}), \end{aligned} \quad (6)$$

где  $\xi_{\text{рас}}$  – толщина ледопородного ограждения, рассчитанная по формуле (1) для каждого геологического слоя мощностью  $h$ .

Теперь оценим параметр расширения замораживаемых пород, исходя из известного параметра для кристаллизующейся воды, увеличивающейся в объеме на 9 % [21]. Традиционно в практике изысканий основной параметр, характеризующий содержание воды в породах, это удельная влажность пород  $W$ , т.е. отношение массы воды к массе сухой породы (породного скелета),

$$W = \frac{m_{\text{в}}}{m_{\text{п}}} \Rightarrow m_{\text{п}} = \frac{m_{\text{в}}}{W}. \quad (7)$$

Общую массу замораживаемой породы нужно рассматривать как сумму масс воды и породного скелета, ее можно оценить и через плотность породы

$$m = m_{\text{в}} + m_{\text{п}} = V'\rho. \quad (8)$$

Получим выражение для массы воды в рассматриваемом объеме замораживаемого массива (секторе):

$$m_{\text{в}} + m_{\text{п}} = V'\rho \Rightarrow m_{\text{в}} + \frac{m_{\text{в}}}{W} = V'\rho \Rightarrow m_{\text{в}}(1 + \frac{1}{W}) = V'\rho \Rightarrow m_{\text{в}}(\frac{W+1}{W}) = V'\rho \Rightarrow m_{\text{в}} = \frac{V'\rho W}{W+1}. \quad (9)$$

Далее перейдем к объему воды в рассматриваемом секторе:

$$V_{\text{в}} = \frac{m_{\text{в}}}{\rho_{\text{в}}} = \frac{V'\rho W}{\rho_{\text{в}}(W+1)}, \quad (10)$$

где  $\rho_{\text{в}}$  – плотность воды,  $\rho_{\text{в}} = 1000 \text{ кг/м}^3$ .

Относительное изменение рассматриваемого объема или заданный показатель объемной деформации (для модельных расчетов) будет определяться следующим выражением:

$$\varepsilon_{\text{v}} = \frac{0,09V_{\text{в}}}{V} = \frac{0,09V'\rho W}{\rho_{\text{в}}(W+1)V}. \quad (11)$$

Оценка этого показателя для наиболее востребованных типов пород показала следующие уровни: для четвертичных отложений 4-5 %, для протерозойских пород 2-3 %.



*Моделирование геомеханических процессов методом конечных элементов (МКЭ).* Натурные данные обычно ограничены и позволяют оценивать и прогнозировать развитие деформаций только на земной поверхности и в сооруженном тоннеле. Осуществление мониторинговых наблюдений через скважины сопряжено с серьезными техническими проблемами, интенсивное развитие больших знакопеременных деформаций будет приводить к существенному нарушению стволов наблюдательных скважин. Поэтому, в условиях отсутствия возможностей организовать моделирование на эквивалентных материалах наиболее доступным средством оценки влияния на породный массив активного и пассивного замораживания являются средства математического моделирования [8, 14, 25].

МКЭ позволяет рассчитать напряженно-деформированное состояние неоднородного, анизотропного, физически нелинейного массива с меняющимися физико-механическими свойствами. Он позволяет учитывать параметры крепи и возможности поэтапного моделирования проходки выработок. При комплексном использовании данных натуральных маркшейдерских наблюдений и моделирования геомеханических процессов для оценки вредного влияния подземного строительства на земную поверхность становится возможным обеспечить достоверность полученных результатов на уровне количественных показателей деформаций [18, 31].

В данной работе построение и расчет моделей были реализованы в программном комплексе PLAXIS 3D. Это один из самых популярных и адаптированных программных комплексов для геотехнических расчетов, реализующий МКЭ. Задачи решались в пространственной постановке (для задач с эскалаторным тоннелем плоская постановка не способна обеспечить адекватный результат), при симметрии расчетной схемы преимущественно рассматривались половинные модели, граничные условия задавались стандартные (по боковым граням и оси симметрии запрещались горизонтальные перемещения, по нижней границе – вертикальные), основной тип конечных элементов – многоузловой (изопараметрический) тетраэдр.

Основные модели, применяемые при моделировании проходки тоннелей в данном исследовании: линейно-упругая (для моделирования крепи); идеальная упругопластическая Кулона – Мора; упругопластическая с упрочнением грунта (Hardening Soil).

В результате проведенных серий расчетов с использованием указанных типов моделей для моделирования эскалаторных тоннелей в связи с лучшей сходимостью результатов моделирования и натурных данных маркшейдерских наблюдений было принято решение использовать упругопластическую модель с упрочнением грунта с дренированным типом грунтов.

Упругопластическая модель с упрочнением грунта (HS) лучше описывает поведение массива в условиях последовательного нагружения и разгрузки. В отличие от модели Кулона – Мора здесь поверхность текучести не зафиксирована в пространстве главных напряжений и может расширяться благодаря пластическому деформированию. В данной модели упрочнение грунта происходит как при сдвиге, так и при сжатии. Упругопластическая модель с упрочнением грунта предназначена для моделирования грунтов. Жесткость, зависящая от напряжений согласно степенному закону, задается тремя различными входными показателями. Это модуль деформации при трехосном нагружении  $E_{50}$ , при разгрузке  $E_{ur}$  и одометрический модуль  $E_{oed}$  [9, 32].

Размеры моделей породного массива принимались с учетом минимизации влияния граничных эффектов на результаты расчетов. В качестве основных вариантов для моделирования приняты модели размерами 300 и 150 м соответственно вдоль горизонтальной проекции оси эскалаторного тоннеля и поперек нее. Породные толщи представлены упрощенно – в виде совокупности горизонтальных слоев (так как мощность геологических элементов была относительно выдержана).

Основными объектами при моделировании проходки эскалаторных тоннелей выступали элементы, моделирующие горные породы, область ледопородного ограждения (в виде усеченного полого цилиндра с заданной

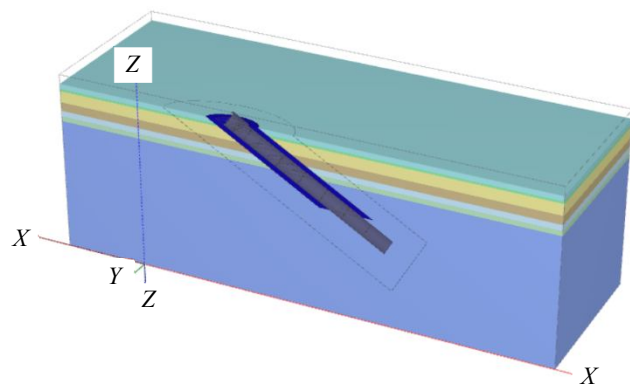


Рис.3. Пример половины расчетной схемы массива с толщиной ледопородного ограждения и эскалаторным тоннелем

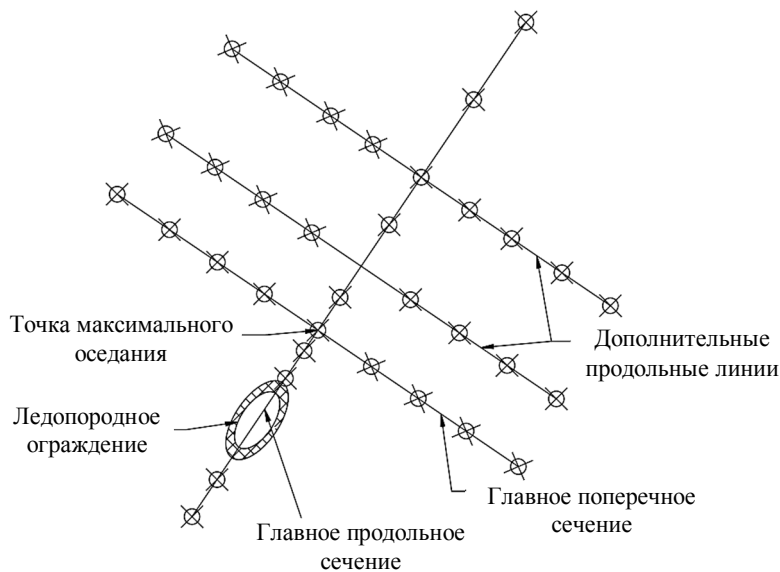


Рис.4. Наблюдательная станция при сооружении эскалаторного тоннеля, пройденного с замораживанием грунтов

ный тоннель станции метро «Казаковская» в Санкт-Петербурге, на котором получена внушительная серия натуральных данных по пучениям на поверхности над тоннелем.

Физико-механические свойства пород четвертичных отложений рассматриваемых участков варьируются в широких пределах. По данным инженерно-геологических испытаний модуль деформации  $E$  изменяется от 7 до 20 МПа, сцепление  $c$  от 13 до 80 кПа, угол внутреннего трения  $\varphi$  от 14 до 20°. Массивы, в которых производится строительство эскалаторных тоннелей способом замораживания грунтов, характеризуются значительной неоднородностью гранулометрического состава и консистенции, влажность пород изменяется в пределах 14-25 %. Для каждого эскалаторного тоннеля необходимо строить свою уникальную математическую модель, учитывая все физико-механические и теплофизические свойства пород.

Для второй стадии строительства моделируется проходка тоннеля (разработка породы и установка крепления в замороженном массиве).

**Методы натуральных исследований.** Основным источником достоверных данных при изучении процессов сдвижений на земной поверхности являются результаты натуральных маркшейдерских наблюдений. До начала работ над будущим тоннелем закладывают специальные наблюдательные станции. Наблюдательная станция на земной поверхности должна представлять собой сеть взаимно перпендикулярных линий реперов (хорошо закрепленных на поверхности точек), расположенных вдоль и поперек оси эскалаторного тоннеля. Из-за выявленных ранее особенностей развития мульды над эскалаторными тоннелями [19] для обеспечения достоверных результатов за сдвигами и деформациями на земной поверхности в поперечном направлении необходимо ориентироваться не только на точку максимального оседания, но и на дополнительные профильные линии, перпендикулярные оси тоннеля, например, точку максимальной ширины мульды (рис.4).

На данных принципах была спроектирована и заложена наблюдательная станция для эскалаторного тоннеля станции «Казаковская» Лахтинско-Правобережной линии Петербургского метрополитена. Этап активной стадии замораживания длился здесь 54 дня (в среднем период активного замораживания длится 50-60 дней, в зависимости от глубины заложения замораживающих скважин). Высотное положение исходных реперов определяется путем их нивелирования, с точностью нивелирования III класса [33].

**Основные результаты оценки деформаций.** Сдвигения в массиве и на земной поверхности по данным натуральных наблюдений. Натурные наблюдения в период активного и пассивного замораживания показали, что поднятия (пучения) нарастают планомерно без перехода в оседания,

толщиной) и обделка эскалаторного тоннеля, моделируемая двумерными упругими элементами типа plate (рис.3).

Из-за сложности реального увеличения объема в моделях толщина ледопородного ограждения принималась постоянной (соответствующей проектной). Для моделирования реальных деформаций по каждому геологическому элементу по формуле (1) рассчитывалась своя (реальная) толщина ледопородного ограждения. В соответствии с предложенной упрощенной методикой для реализации режима заданной деформации для каждого слоя находился показатель объемной деформации по формуле (11).

В качестве основного тестового объекта выступал эскалатор-

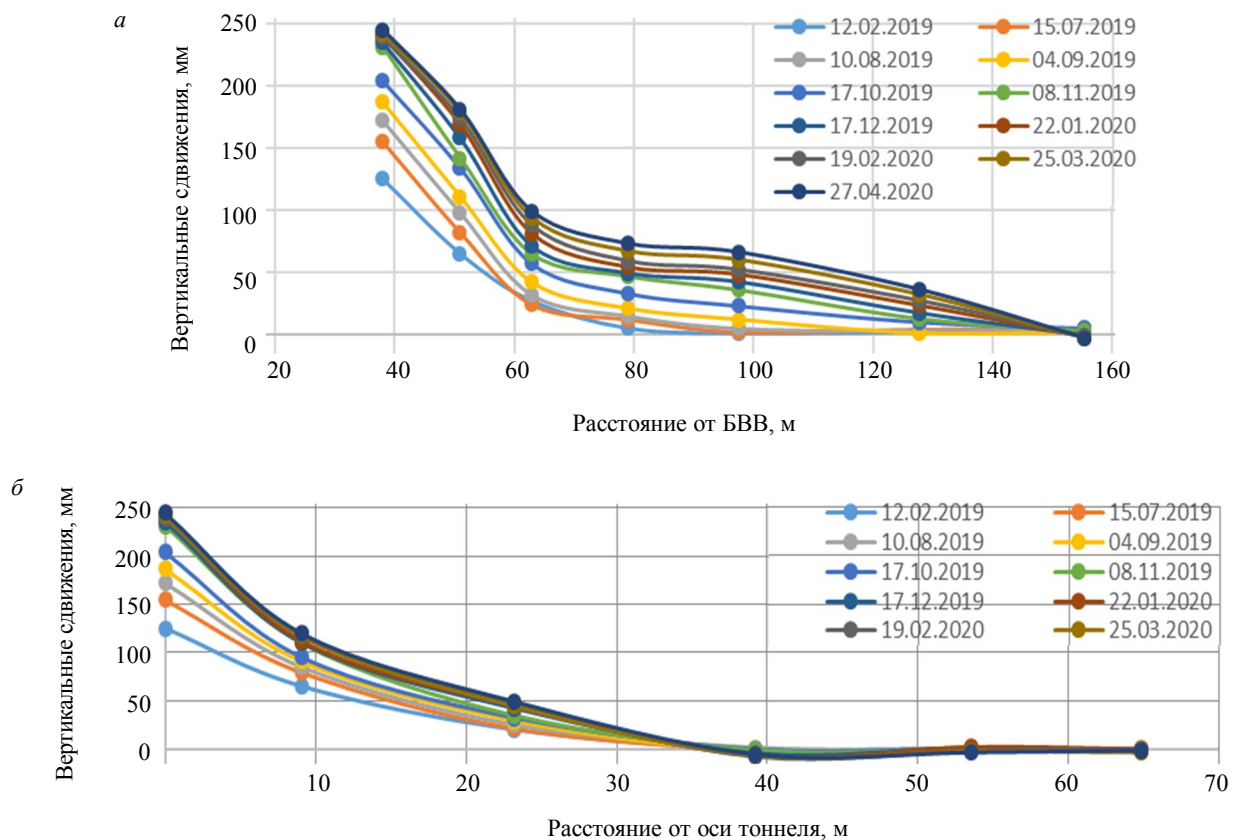


Рис.5. Полумульда главного продольного сечения (а) и главного поперечного сечения (б) станции Петербургского метрополитена «Казакowsкая»

скорости нарастания пучений для реперов неодинаковы и неоднородны во времени, скорости и уровни пучений выше у реперов, расположенных над осью тоннеля. В 35-40 м от оси тоннеля пучения на поверхности практически не проявлялись. Развитие мульд сдвижений (пучений) в главном продольном и главном поперечном сечении для эскалаторного тоннеля станции «Казакowsкая» представлены на рис.5.

На момент окончания активной стадии замораживания и начала проходки максимальные пучения на земной поверхности составили 98 мм, на момент отключения холодильной установки – около 245 мм. Таким образом, большая часть итоговых сдвижений (около 60 %) инициирована на стадии пассивного замораживания и проходки выработки, что изначально не предполагалось и не прогнозировалось.

Существенная неравномерность сдвижений (поднятий) по реперам определила проявление больших горизонтальных деформаций растяжения на поверхности, которые оценивались на уровне до 0,03-0,04. Такой уровень на порядок превышает известный уровень предельных деформаций для земной поверхности. В реальных условиях наличия асфальтового покрытия в нем фиксировались трещины с раскрытием до 3-7 см.

*Сдвигения и деформации по результатам моделирования.* Моделирование на стадиях замораживания показало интенсивное развитие деформаций и сдвижений пород в четвертичной толще от лотковой части тоннеля и до земной поверхности (по всей налегающей толще), максимальные концентрации деформаций и самые большие вертикальные сдвигения в массиве фиксировались в надсводовой части массива в верхней трети длины тоннеля (рис.6, а). Максимальные вертикальные сдвигения – пучения (желтая зона) приурочены к водонасыщенным слоям с наиболее низкими деформационными характеристиками, что объясняется не сколько этими свойствами, сколько задаваемыми в модели деформациями (так как толщина ледопородного ограждения здесь наибольшая).

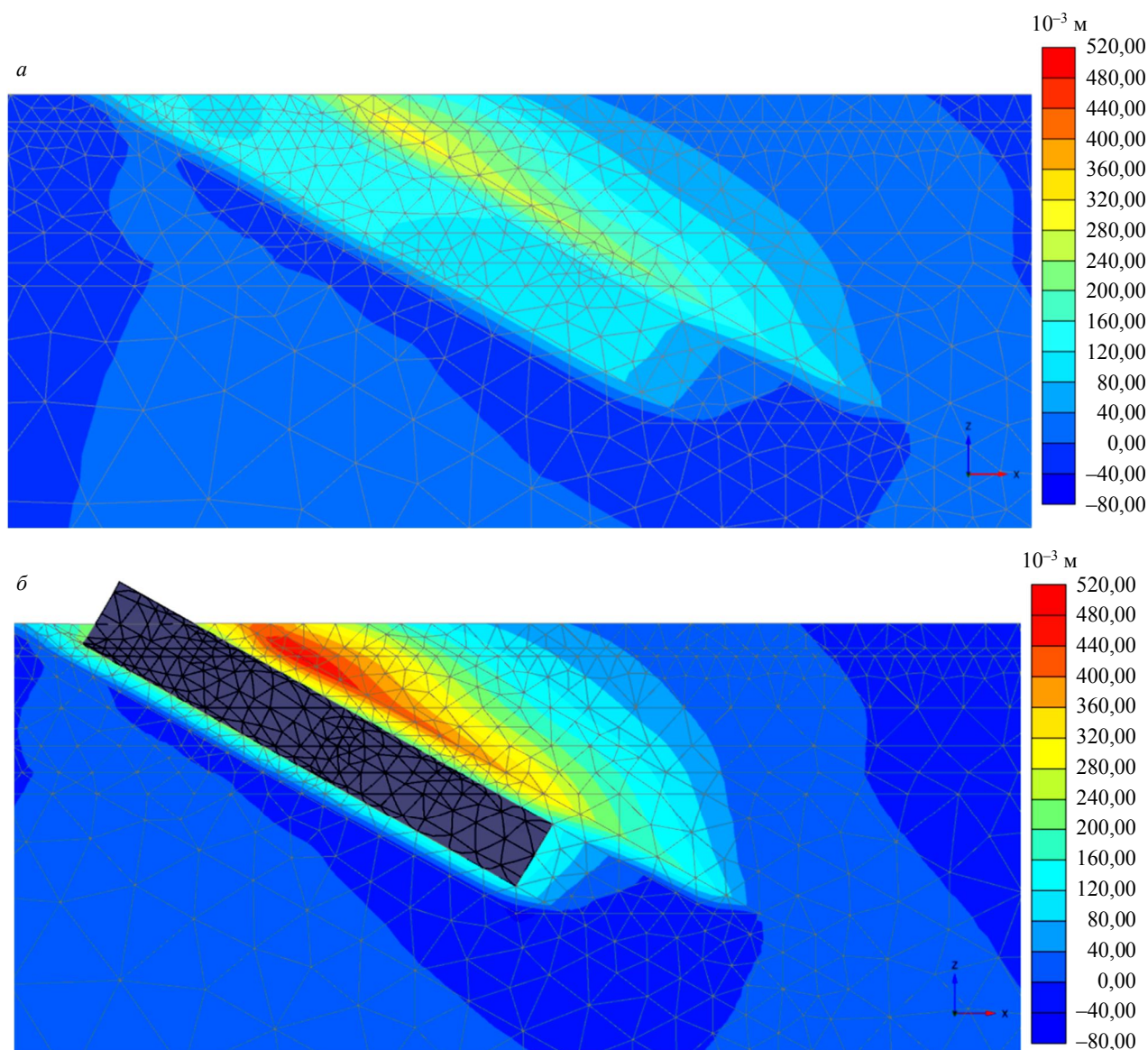


Рис.6. Моделирование распределений вертикальных сдвижений на момент отключения холодильной установки (а) и проходки в замороженном массиве (б) для эскалаторного тоннеля станции метро «Казаковская»

Моделирование показало, что влияние поэтапной разработки породы и монтажа чугунной обделки также нестандартно сказывается на изменении НДС породного массива. Пучения на земной поверхности и в массиве продолжали развиваться (с меньшей скоростью в сравнении с периодом активной стадии замораживания), перехода в оседания не происходило (рис.6, б). Частичная интенсификация вертикальных сдвижений – поднятий поверхности определялась и эффектом «всплытия» сооружаемой конструкции (вес породы в 5-6 раз превышает вес чугунных тубинговых колец – основной весовой нагрузки) [14].

По результатам моделирования максимальные пучения на земной поверхности в период перехода с активной стадии замораживания на пассивную составили 100-105 мм, на момент окончания проходки с заморозкой – 260-265 мм.

Поэтапная проходка тоннеля показала постепенное неравномерное нарастание вертикальных смещений обделки до величины около 100 мм в своде. Неравномерность таких смещений приводила к деформациям обделки: увеличивалась кривизна оси тоннеля в вертикальной плоскости, развивались продольные (вдоль оси тоннеля) растяжения в обделке и другие вторичные эффекты.

**Обсуждение и анализ результатов.** Из натурных данных видно, что уровень поднятий (пучений) на поверхности может достигать весьма существенных значений, а их неравномерность



приводить к весьма большим деформациям кривизны и горизонтальным деформациям растяжения до 0,03-0,04. Эти уровни в 10-20 раз превышают предельные значения ( $2 \cdot 10^{-3}$ ). Такие деформации весьма опасны и разрушительны для наземных объектов, их неучет при проектировании, даже при временном характере проявления, недопустим.

Предложенный постадийный модельный расчет деформаций и схема оценки уровня заданных деформаций расширения от заморозки способны удовлетворительно описать даже нарастающую динамику сдвижений в слоистом массиве с различными физико-механическими и теплофизическими свойствами пород. Модели показали схожую динамику нарастания поднятий по стадиям (рис.7). В целом по результатам моделирования максимальные поднятия (в точке ожидаемого максимального оседания) на момент отключения холодильной установки составили 264 мм, а по натурным данным 245 мм (рис.7), для основной зоны поднятий такие расхождения не превышали 10-20 %. Объяснением выявленного в исследовании парадоксального эффекта превалирования сдвижений на пассивной стадии (которая вообще не должна увеличивать поднятия) может быть известный эффект перемораживания массива и длительность этой стадии, кратно превышающая длительность активной стадии замораживания.

Помимо выявления основного механизма развития поднятий (пучений) поверхности, моделирование позволило оценить и картину развития деформаций во всей породной толще. Неравномерное распределение сдвижений в массиве определяется концентрациями деформаций как в зонах замораживания (зона объемного расширения), так и в зонах непосредственно к ним прилегающих, особенно в зоне «верхнего треугольника» над тоннелем (зона подрабатываемого массива). Распределение сдвижений характеризуется распространением протяженной зоны максимальных сдвижений над сводом выработки (зона локализована примерно в 2-3 м над тоннелем в верхней четверти по его длине), здесь сдвигения достигают 400-460 мм. С удалением от этой зоны они затухают, к поверхности сдвигения значительно (в 1,5-2 раза) снижаются и не превышают 200-250 мм. Зоны заморозки и прилегающие к ней зоны с глубиной, ближе к концу замораживающих скважин (т.е. достижении протерозойских глин) они уже не превышают 100-150 мм и быстро затухают по налегающей толще к поверхности. Такие распределения сдвижений (с максимумами внутри массива над тоннелем) объясняются развитием высоких значений остаточных (пластических) деформаций сжатия в локальных зонах наиболее слабых пород четвертичной толщи, вызванным действием мощного давления пучения замораживаемых пород.

Достоверность обоснованного в работе подхода к оценке деформаций подтверждается хорошей сходимостью результатов моделирования с натурными маркшейдерскими наблюдениями и по параметру объемов мульд, где рассчитанные объемы по натурным данным и по результатам моделирования имеют расхождение в пределах 6-10 %.

**Заключение.** Строительство метрополитенов – вынужденная мера для мегаполиса. Развитая инфраструктура и историческая застройка городов обязывает производить оценку вредного влияния такого подземного строительства на земную поверхность. При глубоком заложении линий метрополитена самой сложной технологически и опасной по деформациям задачей является сооружение эскалаторного тоннеля по технологии замораживания.

Технология искусственного замораживания неустойчивых и обводненных грунтов, традиционно применяемая для эскалаторных тоннелей, с одной стороны характеризуется меньшей стоимостью и отработанностью технологии, с другой стороны проявляет себя в агрессивном воздействии на породный массив, который на первых стадиях работ при замораживании испытывает

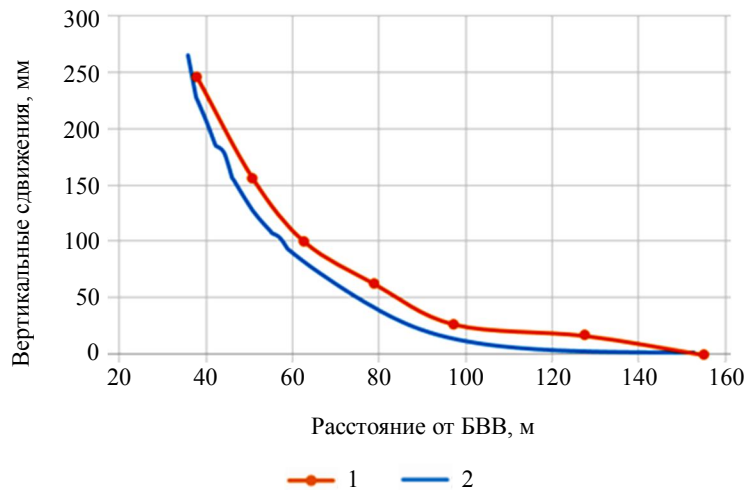


Рис.7. Сравнение полумульды натурных данных (1) и моделирования (2) на момент переключения холодильной установки



большие и опасные деформации пучения, кратно превышающие нормативный уровень опасных деформаций, а на последних – значительные оседания. Оседания на поверхности достигают 450 мм.

Задача оценки деформационного состояния породного массива и поверхности при использовании такой технологии относится к наиболее сложным геомеханическим задачам, одновременно развивающиеся во времени процессы разной физической природы определяются несколькими десятками параметров. Проблеме оценки влияния этих процессов на поверхность посвящено большое количество работ, однако наименее изученными являются первые стадии строительства эскалаторных тоннелей с нарастающим ледопородным ограждением, для которых до сих пор нет достоверных методов оценки.

Оценка основных параметров процесса сдвижения произведена на основе специально организованных и стандартных данных, методов натуральных измерений, которые показали на первых стадиях работ развитие весьма высоких поднятий (пучений) поверхности до 200–250 мм и предельных деформаций. Больше 60 % величины этих поднятий получено на пассивной стадии замораживания во время проходки выработки, что весьма необычно.

Для решения задачи прогнозной оценки сдвижений и деформаций с учетом основных выделенных факторов предложен упрощенный подход, основанный на использовании численного моделирования методом конечных элементов с послышной оценкой параметров ледопородного ограждения по двум базовым параметрам: толщине ограждения (оцененной по теоретической зависимости) и объемной деформации (оцененной по уровню природной влажности пород) с ее вводом в модель в режиме заданных деформаций. Для оценки указанных параметров возможно применение данных прямых натуральных методов оценки работы замораживания (по термометрии и датчикам деформаций в массиве).

Результаты конечно-элементного моделирования деформаций для эскалаторных тоннелей в стадиях активной и пассивной фазы замораживания, сооружаемых в горно-геологических условиях Санкт-Петербурга, показали хорошую сходимость с данными натуральных наблюдений. Отклонения по сдвижениям составили около 10–20 %, что дало основания рекомендовать такой упрощенный подход в прогнозной оценке опасных для земной поверхности и обделки тоннеля деформаций растяжения, как на стадиях проектирования, так и на стадиях строительства с учетом фактических данных по параметрам замораживания. Моделирование позволило выявить причины парадоксального развития деформаций пучения по стадиям замораживания и проанализировать механизмы развития деформаций в породном массиве.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Анализ вариативных способов заморозки грунта / Н.А.Забенкова, Н.С.Галкин, К.Л.Стоякова, Е.М.Бесфамильная // Техника. Технологии. Инженерия. 2018. Т. 1 (7). С. 32–35.
2. *Беляков Н.А.* Разработка метода прогноза напряженно-деформированного состояния обделок транспортных тоннелей в нарушенном массиве: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб: Санкт-Петербургский государственный горный университет, 2012. 24 с.
3. *Волохов Е.М.* Проблемы нормативного и методического обеспечения оценки вредного влияния подземного строительства и мониторинга деформаций для условий Санкт-Петербурга / Е.М.Волохов, С.Н.Зеленцов, В.П.Хуцкий // Записки Горного института. 2012. Т. 199. С. 260–262.
4. *Волохов Е.М.* Проблема оценки вредного влияния горных работ при строительстве эскалаторных тоннелей способом замораживания / Е.М.Волохов, Д.З.Мукминова // Маркшейдерский вестник. 2019. Т. 2 (129). С. 47–55.
5. Влияние температуры ледопородного ограждения при расчете крепи шахтных стволов / Д.А.Иголка, Е.Ю.Иголка, Е.М.Лукша, А.А.Кологривко // Горная механика и машиностроение. 2014. № 3. С. 36–41.
6. Зависимость теплофизических и прочностных характеристик мерзлых грунтов от температуры / А.Г.Бровка, Г.П.Бровка, И.В.Дедюля, К.А.Агутин // Природопользование. 2017. Т. 31. С. 45–49.
7. Замораживание горных пород при строительстве шахт. URL: <http://www.geologam.ru/industry/shaft/zamorazhivanie-gornyh-porod> (дата обращения 10.07.2020).
8. *Карасев М.А.* Обоснование геомеханической модели среды для прогноза деформаций грунтового массива в окрестности глубокого коглована / М.А.Карасев, Д.А.Потемкин // Записки Горного института. 2013. Т. 204. С. 263–268.
9. *Киреева В.И.* Оценка сдвижений и деформаций горных пород при сооружении перегонных тоннелей большого диаметра тоннелепроходческими механизированными комплексами в сложных горно-геологических условиях: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб: Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», 2016. 20 с.



10. *Котов П.И.* Компрессионное деформирование прибрежно-морских мерзлых грунтов при оттаивании (Европейский Север России, Западная Сибирь): Автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. М.: Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, 2014. 23 с.
11. *Мишедченко О.А.* История развития способа искусственного замораживания пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2010. № 2. С. 226-231.
12. Механика подземных сооружений. Пространственные модели и мониторинг / А.Г.Протосеня, Д.А.Потемкин, Ю.Н.Огородников и др. СПб: Санкт-Петербургский горный университет, 2011. 355 с.
13. Методы сооружения эскалаторных тоннелей. URL: <https://metrostroy-spb.ru/technology/metro/614/> (дата обращения 15.12.2019).
14. *Мосолов Д.А.* Эффективные конструктивные параметры облегченных чугунных обделок тоннелей метрополитенов. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: Научно-исследовательский институт транспортного строительства, 2007. 28 с.
15. *Мукминова Д.З.* Оценка сдвижений и деформаций пород с использованием методов математического моделирования при строительстве эскалаторных тоннелей способом замораживания: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб: Санкт-Петербургский горный университет, 2021. 20 с.
16. *Новоженин С.Ю.* Опыт моделирования эскалаторного тоннеля станции «Горный институт» Санкт-Петербургского метрополитена / С.Ю.Новоженин, К.А.Богданова // Маркшейдерский вестник. 2020. Т. 3 (136). С. 40-44.
17. Организация строительства и основные средства механизации работ. URL: [http://www.metro.ru/library/stroitelstvo\\_metropolitenov/478/](http://www.metro.ru/library/stroitelstvo_metropolitenov/478/) (дата обращения 05.11.2020)
18. *Панфилов Д.В.* Методика прогнозирования деформаций земной поверхности при сооружении транспортных тоннелей на основе пространственного моделирования: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: Научно-исследовательский институт транспортного строительства, 2005. 20 с.
19. Патент № 2738633 РФ. Способ мониторинга развития пучений, вызванных строительством наклонных подземных выработок, пройденных с замораживанием грунтов / Д.З.Мукминова. Опубл. 15.12.2020. Бюл. № 35.
20. *Потемкин Д.А.* Влияние изменений в конструктивных элементах защитных сооружений на поведение грунтового массива вблизи глубоких котлованов // Записки Горного института. 2013. Т. 204. С. 240-247.
21. *Потемкин Д.А.* Обоснование толщины ледопородного ограждения в слоистом массиве с учетом теплофизических свойств пород и технологических параметров замораживания: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб: Санкт-Петербургский государственный горный институт, 1999. 20 с.
22. Расчет ожидаемых сдвижений и деформаций от строительства тоннелей метро в четвертичных отложениях г. Хошима / В.Н.Гусев, Е.М.Волохов, Н.С.Бак, С.Ю.Новоженин // Маркшейдерский вестник. 2012. Т. 5 (91). С. 51-53.
23. *Сергеев А.С.* О промерзании глинистого грунта и миграции воды в конструкции дорожной одежды / А.С.Сергеев, Б.С.Юшков // Транспортные сооружения. 2014. Т. 1. № 1 (1). С. 2. DOI: 10.15862/02TS114
24. *Строкова Л.А.* Определение параметров для численного моделирования поведения грунтов // Известия Томского политехнического университета. 2008. Т. 1. С. 68-74.
25. *Хуцкий В.П.* Сдвижение земной поверхности при строительстве пересадочных узлов метрополитена в условиях Санкт-Петербурга: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб: Санкт-Петербургский государственный университет путей сообщения, 2003. 28 с.
26. *Шестернев Д.М.* Пучение пород в условиях деградации криолитозоны / Д.М.Шестернев, Д.Д.Шестернев. Якутск: Изд-во Института мерзлотоведения, 2012. 194 с.
27. *Шуплик М.Н.* Современные способы замораживания грунтов с применением твердых криоагентов / М.Н.Шуплик, В.Н.Борисенко // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2004. № 1. С. 227-232.
28. *Andersland O.B.* Frozen Ground Engineering: 2nd Edition / O.B.Andersland, B.Ladanyi. NY: John Wiley & Sons, 2003. 384 p.
29. *Haibing Cai.* Model Test of Liquid Nitrogen Freezing-Temperature Field of Improved Plastic Freezing Pipe / Haibing Cai, Pengfei Li, Zhifeng Wu // Journal of Cold Regions Engineering. 2020. Vol. 34. Iss. 1. № 04020001. DOI: 10.1061/(ASCE)CR.1943-5495.0000204
30. Improved analytical prediction of ground frost heave during tunnel construction using artificial ground freezing technique / Haibing Cai, Zheng Liu, Sheng Li, Tenglong Zheng // Tunnelling and Underground Space Technology. 2019. Vol. 92. № 103050. DOI: 10.1016/j.tust.2019.103050
31. *Kazanin O.I.* Reproduction of the longwall panels: Modern requirements for the technology and organization of the development operations at coal mines / O.I.Kazanin, A.A.Sidorenko, A.A.Meshkov // Eurasian Mining. Vol. 2020. Iss. 2. P. 19-23. DOI: 10.17580/em.2020.02.05
32. *Kovshov S.V.* Application of Computer Modeling for the Accident Rate Assessment on Separate Sites of the Mohe–Daqing Oil Pipeline in Permafrost Conditions // Transportation Infrastructure Geotechnology. 2020. Vol. 7. Iss. 4. P. 605-617. DOI: 10.1007/s40515-020-00109-8
33. *Novozhenin S.* New method of surface settlement prediction for Saint-Petersburg metro escalator tunnels excavated by EPM TBM / S.Novozhenin, M.Vystrchil // Procedia Engineering, 2016. Vol. 150. P. 2266-2271. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.283
34. *Protosenya A.G.* Method of predicting earth surface subsidence during the construction of tunnels using TBM with face cantledge on the basis of multivariate modeling / A.G.Protosenya, M.A.Karasev, N.A.Belyakov // International Journal of Civil Engineering and Technology. 2018. Vol. 9. Iss. 11. P. 1620-1629.
35. *Shikhov A.I.* The pattern of changes in the velocity of propagation of ultrasonic waves in frozen soil samples during thawing / A.I.Shikhov, A.I.Potapov // High-Tech and Innovations in Research and Manufacturing (HIRM-2020) 28 February 2020, Siberia, Russia. Journal of Physics: Conference Series, 2020. Vol. 1582. № 012079. DOI: 10.1088/1742-6596/1582/1/012079

**Авторы:** Е.М.Волохов, канд. техн. наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0003-4430-4172> (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), Д.З.Мукминова, канд. техн. наук, научный сотрудник, [diana10.93@mail.ru](mailto:diana10.93@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0002-5595-9150> (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.