

Интернет-журнал «Транспортные сооружения» <https://t-s.today>

Russian journal of transport engineering

2019, №3, Том 6 / 2019, No 3, Vol 6 <https://t-s.today/issue-3-2019.html>

URL статьи: <https://t-s.today/PDF/35SATS319.pdf>

DOI: 10.15862/35SATS319 (<http://dx.doi.org/10.15862/35SATS319>)

**Ссылка для цитирования этой статьи:**

Харченко И.Я., Пестрякова Е.А., Пискунов А.А., Харченко А.И., Бетербиев А.С.-Э., Сонин А.Н. Особенности проектирования, строительства и эксплуатации тоннелей метрополитена и притоннельных сооружений в условиях плотной городской застройки // Интернет-журнал «Транспортные сооружения», 2019 №3, <https://t-s.today/PDF/35SATS319.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/35SATS319

**For citation:**

Kharchenko I.Ya., Pestryakova E.A., Piskunov A.A., Kharchenko A.I., Beterbiev A.S.-E., Sonin A.N. (2019). Features of design, construction and operation of underground tunnels and tunnel structures in dense urban areas. *Russian journal of transport engineering*, [online] 3(6). Available at: <https://t-s.today/PDF/35SATS319.pdf> (in Russian). DOI: 10.15862/35SATS319

**УДК 624.19**

**ГРНТИ 67.11**

**Харченко Игорь Яковлевич**

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»  
Москва, Россия

Начальник отдела Научно-исследовательского института экспертизы и инжиниринга  
Доктор технических наук, профессор

**Пестрякова Екатерина Алексеевна**

ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)», Москва, Россия  
Старший преподаватель кафедры «Мосты и тоннели»  
E-mail: [Kate.pestriakova@gmail.com](mailto:Kate.pestriakova@gmail.com)

**Пискунов Александр Алексеевич**

ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)», Москва, Россия  
Зав. кафедры «Мосты и тоннели»  
Доктор технических наук, профессор

**Харченко Алексей Игоревич**

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»  
Москва, Россия

Заведующий сектором внедрения Научно-исследовательского института экспертизы и инжиниринга  
Кандидат технических наук, доцент

**Бетербиев Адам Саид-Эмиевич**

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»  
Москва, Россия

Магистрант кафедры «Механики грунтов и геотехники»  
Доктор технических наук, профессор

**Сонин Александр Николаевич**

ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта (МИИТ)», Москва, Россия  
Доцент кафедры «Мосты и тоннели»  
Кандидат технических наук, доцент

## Особенности проектирования, строительства и эксплуатации тоннелей метрополитена и притоннельных сооружений в условиях плотной городской застройки

**Аннотация.** Развитие современного города и увеличение его транспортной инфраструктуры, в частности объектов метрополитена, оказывает значительное влияние на окружающую городскую среду и требует разработки и реализации комплекса специальных защитных мероприятий. Причём, если строительство станционных комплексов метрополитена выполняется, как правило, на относительно свободных территориях с минимальным влиянием на окружающую застройку, то при строительстве перегонных тоннелей и притоннельных сооружений, в зону их влияния попадают инженерные коммуникации, здания и сооружения, находящиеся на земной поверхности, в том числе транспортные сооружения, памятники архитектуры и объекты культурного наследия.

Эффективность проектных решений по защите объектов, находящихся в зоне влияния строительства подземных сооружений, в значительной степени определяется степенью достоверности оценки геотехнических условий и результатов обследования технического состояния строительных конструкций зданий.

Анализ причин формирования и развития нештатных ситуаций и инцидентов, возникающих при строительстве и эксплуатации подземных сооружений показывает, что преимущественно они являются следствием использования недостоверных исходных инженерно-геологических и гидрогеологических условий, значительно изменяющихся в связи с интенсивной городской застройкой. Проявляющийся при этом барражный эффект, изменение уровней и направлений грунтовых вод, которые не учитываются на стадии проектирования, могут сопровождаться значительными ухудшениями свойств грунтов и общего напряжённо-деформированного состояния в основании существующих зданий и сооружений.

Это предполагает необходимость тщательного изучения свойств грунтов на значительную глубину, разработку прогнозов возможных изменений состояния окружающего грунтового массива и гидрогеологических условий, выполнение комплексного обследования оснований близко расположенных зданий и сооружений, а также существенно большего объема инженерно-геологических изысканий по сравнению с требованиями действующих нормативных документов.

**Ключевые слова:** метрополитен; напряженно-деформированное состояние грунтового массива; осадочные деформации; метод компенсационного нагнетания

## Введение

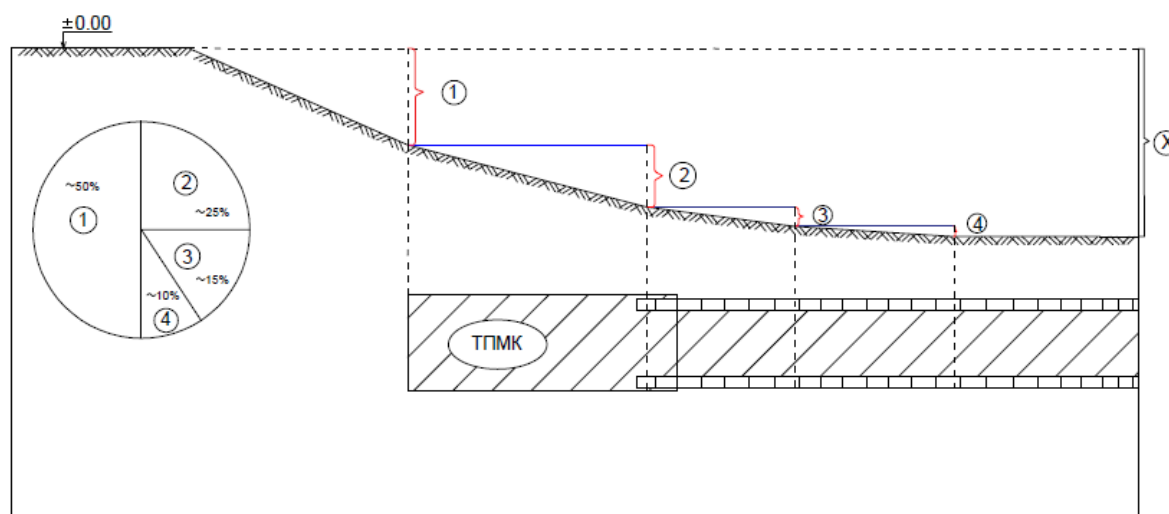
На основании анализа результатов изысканий необходимо выполнить математическое моделирование изменения напряженно-деформированного состояния грунтового массива, вмещающего в себя подземное сооружение и основания существующих зданий, попадающих в зону влияния нового строительства.

При возведении и эксплуатации подземных сооружений важное значение приобретает их защита от грунтовых вод так как водопонижение и дренирование грунтов сопровождается развитием дополнительных осадочных деформаций, требующих реализации сложных и дорогостоящих защитных мероприятий, а также обеспечение мониторинга, как в процессе строительства, так и на стадии эксплуатации с целью обеспечения контроля состояния планово-высотных отметок дневной поверхности, фундаментов зданий и сооружений, перемещений основных строительных конструкций для реализации мероприятий по обеспечению их эксплуатационной надёжности.

К настоящему времени научными, проектными и строительными организациями накоплен значительный опыт реализации технически сложных проектов подземного строительства. С этой целью созданы эффективные проектные, конструктивные и технологические решения строительства подземных объектов, в том числе для защиты окружающей застройки, разработаны методы расчета и численного моделирования поведения возводимого подземного объекта и находящихся в зоне его влияния существующих наземных и подземных сооружений, методы и средства мониторинга [1; 2; 6; 11; 15].

### 1. Анализ причин развития осадочных деформаций при строительстве и эксплуатации тоннельных сооружений

Осадочные деформации при строительстве тоннельных сооружений с применением ТПМК [6; 7; 10] условно складываются из 4 видов осадок: тип 1 – осадка в зоне роторного механизма ТПМК (около 50 %), тип 2 – осадка в зоне перемещения технологического оборудования комплекса (около 25 %), тип 3 – осадка в зоне хвостовой части ТПМК (около 15%) и тип 4 – осадка в зоне устройства тоннельной обделки (около 10 %) (рис. 1).



1 – осадка в зоне ротора; 2 – осадка в зоне расположения технологического оборудования; 3 – осадка в зоне хвостовой части ТПМК; 4 – осадка в зоне установки обделки тоннеля

**Рисунок 1.** Схема развития осадочных деформаций при строительстве тоннелей механизированным способом с применением ТПМК (разработано автором)

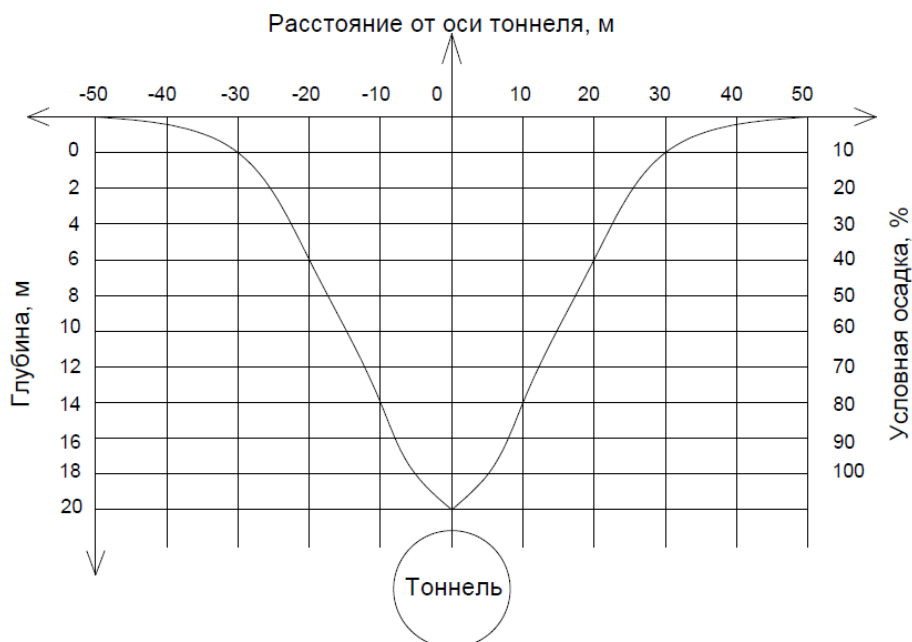
Причиной работе ТПМК развитие осадочных деформаций 1-го типа является изменение природного напряженно-деформируемого состояния грунта при его разработке роторным механизмом. С целью сохранения его естественного состояния предусматриваются различные варианты защиты в виде гидравлического, грунтового или пневматического пригруза в зоне забоя. Тип и технологические параметры пригруза определяются в соответствии с расчётным обоснованием с учётом конкретных геотехнических условий по трассе проходки ТПМК и отражаются в технологическом регламенте, разрабатываемом специализированной организацией.

Осадочные деформации 2-го типа определяются степенью соответствия фактического режима ТПМК требованиям технологического регламента, применяемых типов и расходов кондиционеров грунта с учётом его свойств, исключением осадочных деформаций ТПМК при проходке, например, в условиях неустойчивых водонасыщенных грунтов пльвинного типа, вероятностью тиксотропного разжижения грунта при вибрационном воздействии ТПМК на вмещающий массив. С целью снижения уровня сцепления рабочей поверхности ТПМК с грунтовым массивом, диаметр роторного механизма превышает диаметр кожуха ТПМК на 20–30 мм. При работе ТПМК с гидравлическим или пневматическим пригрузом, образовавшийся зазор заполняется соответствующей суспензией или воздухом, что снижает величину возможных осадочных деформаций. Кроме того, при проходке ТПМК в условиях неустойчивых водонасыщенных грунтов, с целью исключения просадок, оператор ТПМК предусматривает перемещение под небольшим наклоном к дневной поверхности грунта.

Осадочные деформации 3-го типа являются следствием зазора, формирующегося между разрабатываемой горной породой и тубинговой обделкой сооружаемого тоннеля. Величина этого зазора находится в диапазоне 70–150 мм, который должен заполняться тампонажным раствором со специально подобранными свойствами с учётом реальных геотехнических условий и технологических характеристик ТПМК. В случае некачественного заполнения заобделочного пространства, объём осадочных деформаций может достигать 2–4 % объёма разрабатываемого грунта. При этом, тампонажная смесь должна обеспечивать равномерное и непрерывное заполнение заобделочного пространства по мере продвижения ТПМК при давлении нагнетания, уравнивающего гидростатическое давление и активное давление грунта. Как показывает анализ результатов работы ТПМК в различных условиях, фактический расход тампонажного раствора может превышать расчётные параметры на 20–35 %.

Осадочные деформации 4-го типа проявляются вследствие релаксации напряжений в структуре грунта после проходки ТПМК. Их величина в значительной мере зависит от степени связанности грунта и его фильтрационных свойств. Эти деформации могут быть следствием перераспределения порового давления в грунте с изменением степени водонасыщенности капиллярно-пористой структуры. Этот эффект может быть усилен водопроявлениями в тело тоннеля при некачественном оформлении стыковых соединений тоннельной обделки. При этом, осадочные деформации могут развиваться в течение достаточно длительного интервала времени, включая эксплуатационный период.

Расчёт мульды осадочных деформаций, при строительстве тоннельных сооружений, выполняется в соответствии с результатами инженерно-геологических изысканий с учётом глубины заложения тоннельных сооружений, их диаметра, конструктивных особенностей тоннельной обделки, технологических параметров проходки (рис. 2). Расчётное обоснование величины осадок выполняется численными методами с применением конечных элементов.



**Рисунок 2.** Мульты осадочной деформации в зависимости от глубины заложения тоннеля в условиях изотропного грунтового массива (разработано автором)

При эксплуатации подземных сооружений, основной причиной проявляющихся осадочных деформаций являются, как правило, активные водопроявления, которые сопровождаются не только коррозией ограждающих конструкций, снижающей их несущую способность, но и суффозионным разуплотнением грунта в заобделочном пространстве. Следствием суффозионных процессов могут быть значительные по величине сверхнормативные деформации надземных сооружений. В этой связи необходимо предпринимать комплексные меры по устранению возникших водопроявлений и протечек в строящихся и действующих тоннельных и притоннельных сооружениях. Как показал анализ, при строительстве подземных сооружений из сборного и монолитного железобетона, основной объём водопроявлений приходится на рабочие и деформационные швы, а также трещины в теле бетона. При этом, фильтрация воды через тело бетона практически отсутствует, за редким исключением участков, где некачественно уплотнен бетон. При этом, процесс суффозионного разуплотнения сопровождается не только существенным ухудшением физико-механических характеристик грунта, изменяющих всю конструктивную схему работы сооружения, но и образованием локальных пустот и каверн, являющихся концентраторами напряжений и, как следствие, источником создания и развития аварийных ситуаций в подземных сооружениях.

## 2. Технологические основы применения метода компенсационного нагнетания

Одним из наиболее эффективных методов, обеспечивающих надёжную защиту объектов от осадочных деформаций, является метод компенсационного нагнетания, который достаточно широко используется в зарубежной практике геотехнического строительства и находит весьма ограниченное применение в России [4; 5; 16; 17].

Сущность классического метода компенсационного нагнетания заключается в компенсации дефицита грунта в основании существующих зданий и сооружений, сформировавшегося в результате земляных работ, суффозионных процессов и т. п., путём нагнетания специальных инъекционных смесей в соответствии с проектным расчетом и технологическим регламентом. Инъекционные растворы на минеральной основе должны иметь заданную вязкость, пенетрационную способность, высокую седиментационную устойчивость

и управляемую кинетику затвердевания. Это позволяет сформировать расчётное напряженно-деформируемое состояние массива грунта, обеспечивающее управляемый подъём наземного сооружения, по принципу использования эффекта гидродомкрата, размещённого под всей площадью объекта. Выполнение компенсационного нагнетания возможно практически в любых нескальных грунтах.

При этом, технологию компенсационного нагнетания следует рассматривать в качестве безальтернативного метода не только для выравнивания зданий и сооружений в случае проявившихся деформаций, но и в качестве наиболее эффективной превентивной меры защиты зданий, находящихся в зоне влияния строящихся подземных сооружений. Эффективность технологии компенсационного нагнетания обусловлена тем, что если при традиционных методах защиты, они должны быть реализованы в полном объёме до начала строительства подземных сооружений исходя из наиболее пессимистичного варианта сочетания всех возможных геотехнических рисков, то при применении технологии компенсационного нагнетания, до начала строительства подземных сооружений выполняются только подготовительные работы, а на стадии строительства, компенсационное нагнетание реализуется только в том объёме, которые соответствуют фактической величине проявляющихся деформаций.

В зависимости от реальных геотехнических условий, с целью исключения эффекта неуправляемого гидроразрыва в процессе инъекционного нагнетания, необходимо применять специальные смеси на минеральной основе с регулируемой вязкостью и кинетикой затвердевания. Так, например, в несвязных грунтах с высокой степенью проницаемости применяют низконапорное фильтрационное нагнетание, когда в грунт нагнетается высокоподвижная смесь, которая после заполнения открытых пор и капилляров в структуре грунта интенсивно загустевает, формируя так называемый вмещающий массив грунта, исключая развитие неуправляемого гидроразрыва на стадии подъёма. При этом возможно многократное повторное выполнение инъекций с технологическими перерывами между ними, необходимыми для затвердевания раствора после инъектирования во вмещающий массив на предыдущей стадии.

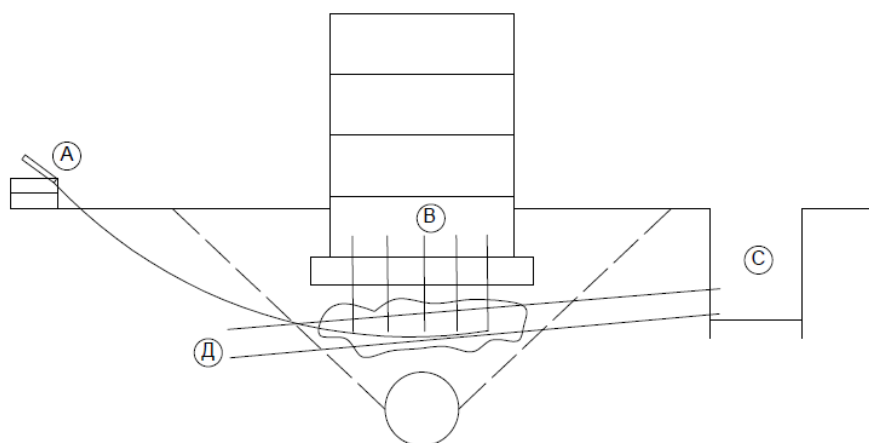
Важным преимуществом классической технологии компенсационного нагнетания, по сравнению с другими методами защиты зданий и сооружений, является возможность прогнозирования с высокой степенью достоверности процессов развития вероятных деформаций и технологических параметров нагнетания как аналитическими, так и численными методами расчетов практически для всех видов грунтов. Эффективность этой технологии многократно подтверждалась зарубежной и отечественной практикой [2; 7; 8; 16; 17].

Технология компенсационного нагнетания реализуется для решения 2-х видов геотехнических задач для:

- защиты существующих зданий и сооружений от возможного развития сверхнормативных деформаций под влиянием строящихся подземных объектов различного назначения;
- устранения проявившихся сверхнормативных деформаций, подъёма, выравнивания и возврата зданий и сооружений в проектное положение.

Выполнению буринъекционных работ по технологии компенсационного нагнетания предшествует комплекс подготовительных мероприятий, предусматривающий тщательное обследование состояния основных несущих конструкций зданий и сооружений, нуждающихся в защите развития возможных деформаций или подъёме, выполнение инженерно-геологических и геофизических исследований оснований фундамента с определением фактических физико-механических характеристик грунта. На этой основе выполняется

разработка математической модели, адекватно описывающей формирование и развитие НДС грунтового массива на всех этапах буроинъекционных работ при компенсационном нагнетании, расчётное обоснование основных технологических параметров (количество инъекционной смеси, давление и интенсивность нагнетания, распределение инъекционной смеси по площади и высоте грунтового основания), а также прогноз развития перемещений основных строительных конструкций в процессе буроинъекционных работ. При этом, с учётом взаимного размещения надземных и подземных сооружений, а также фактических геотехнических условий, буроинъекционные скважины могут устраиваться с дневной поверхности с применением технологии горизонтально-направленного или наклонного бурения (в), из подвала (б), из специально устраиваемых технологических шахт или котлованов (а), из сервисных тоннелей. Схемы устройства буроинъекционных скважин для компенсационного нагнетания представлены см. рис. 3.



*А – с дневной поверхности; В – из подвала или цокольного этажа; С из шахты; Д – из сервисного тоннеля*

**Рисунок 3.** *Схема устройства буроинъекционных скважин при компенсационном нагнетании массива (разработано автором)*

Анализ опыта применения метода компенсационного нагнетания показал, что с целью надёжного управления процессом выравнивания или подъёма сооружений на проектную отметку, необходимо реализовать 7 технологических переделов:

1-й **подготовительный**, включающий обследование зданий, инженерно-геологические и лабораторно-экспериментальные исследования, математическое моделирование, проектирование, полевые испытания с целью оптимизации основных технологических параметров с учётом реальных геотехнических условий.

2-й – *выполнение буроинъекционных работ* с обустройством скважин и формированием системы управления подъёмом или защиты зданий от сверхнормативных деформаций.

3-й – *«пассивная» фаза*, выполняется с целью подготовки вмещающего массива с изотропными свойствами, для исключения неуправляемого гидроразрыва в период «активной» фаза компенсационного нагнетания.

4-й – *«условно активная» фаза*, соответствует нулевой фазе подъёма. На этом этапе обеспечивается формирование предварительно напряжённого состояния в грунтовом массиве для обеспечения первой реакции сооружения.

5-й – *«активная» фаза*, обеспечивает выравнивание или подъём сооружения на проектную отметку, либо сохранение сооружения в проектном положении.

6-й – фаза *«компенсация»* – следствие развития релаксационных процессов после завершения активной фазы нагнетания.

7-й – фаза «ликвидация», – реализуется после полной компенсации возможных осадочных деформаций и проектной планово-высотной стабилизации сооружения.

В отдельных случаях, при прогнозируемых динамических или вибрационных воздействиях в период эксплуатации сооружений, и связанной с этим вероятности проявления осадочных деформаций, является целесообразным не ликвидация, а временная консервация с заполнение тела скважин специальными закладочными смесями типа «ЗИС» со слабой гидравлической активностью. Извлечение затвердевшей смеси «ЗИС» из тела скважин осуществляется путём разбуривания с последующей промывкой.

Управление процессом компенсационного нагнетания выполняется в соответствии с программой, обеспечивающей согласованную работу насосного оборудования в соответствии с результатами непрерывного планово-высотного мониторинга конструкций сооружения. Это позволяет быстро реагировать на любые изменения состояния наблюдаемого здания и в соответствии с этим корректировать технологические параметры нагнетания.

Наиболее эффективными методами мониторинга за сооружением являются использование систем автоматизированных высокоточных электронных тахеометров и датчиков гидростатического нивелирования. Для системы с использованием тахеометра контролируемые параметрами являются горизонтальные и вертикальные перемещения конструкций сооружений. Система датчиков гидростатического нивелирования позволяет отслеживать изменение высотного положения сооружения с повышенной точностью, по сравнению с тахеометром. Обе системы позволяют получать данные контролируемых параметров с заданной периодичностью, в зависимости от количества мишеней и датчиков время между циклами может составлять от 10 минут.

Для наблюдения за развитием трещин или раскрытием стыков на них устанавливаются маяки или автоматизированные датчики с возможностью передавать данные в режиме реального времени, такое решение может быть применено в случае наличия опасных трещин.

Критерии оценки и их предельные значения (относительная разность осадок, максимальная осадка, крен, прогиб, раскрытие трещин или стыков) задаются в соответствии с категорией технического состояния сооружений и диктуются требованиями нормативной документации.

На протяжении всех инъекционных работ ведется регистрация данных относительно каждой манжеты, а именно: дата инъекции, ее порядковый номер, объем, давление и расход. По результатам суммирования данных строятся изополя и трехмерная диаграмма отображающие объемы инъекирования за выбранный промежуток времени.

По результатам получаемых данных может быть оценен коэффициент эффективности компенсационного нагнетания, который на различных этапах компенсационного нагнетания может изменяться в диапазоне 5...70 %:

$$\xi = \frac{V_{\text{подъема}}}{V_{\text{нагнетания}}} \cdot 100\%$$

где:

$V_{\text{подъема}}$  – объём осадочных деформаций, (м<sup>3</sup>);

$V_{\text{нагнетания}}$  – объём инъекционного раствора, (м<sup>3</sup>).



Анализ результатов практического опыта показывает, что значение коэффициента эффективности компенсационного нагнетания может изменяться в зависимости от фактических геотехнических условий, степени адекватности математической модели, положенной в основу расчётного обоснования основных технологических параметров компенсационного нагнетания, уровня технической, технологической и квалификационной обеспеченности исполнителей.

#### 4. Управление характеристиками инъекционных растворов первичного нагнетания.

В связи с тем, что управление процессом компенсационного нагнетания возможно только в условиях, исключая эффект гидроразрыва в процессе нагнетания, важным технологическим переделом является предварительная подготовка вмещающего массива грунта, т. е. консолидация структуры несвязанного водонасыщенного грунта с применением специальных инъекционных смесей. При этом, инъектирование выполняется в режиме пропитки и характеризуется коэффициентом эффективности пенетрации (КЭП), который определяется величиной интенсивности нагнетания (л/мин.), при соответствующем давлении (бар). С целью исследования влияния основных технологических параметров на величину коэффициента эффективности компенсационного нагнетания был выполнен комплекс лабораторных исследований с применением математического метода планирования эксперимента. В качестве факторов влияния были приняты давление нагнетания (Р, бар), интенсивность нагнетания инъекционной смеси (V, л/мин.) и модуль крупности кварцевого песка (Мк). Уровни и интервалы варьирования, а также матрица планирования представлены в таблице 1. Исследования выполнялись на водонасыщенной модели грунта диаметром 100 мм и длиной 300 мм. Инъектирование выполнялось с использованием производственного насосного оборудования «DP 36-2-B» фирмы «Оберманн». Инъекционная смесь приготавливалась с В/Т = 3,0 в скоростном производственном смесителе в течение 5 мин.

Таблица 1

#### 3-х факторная матрица планирования. Экспериментальные и расчетные данные

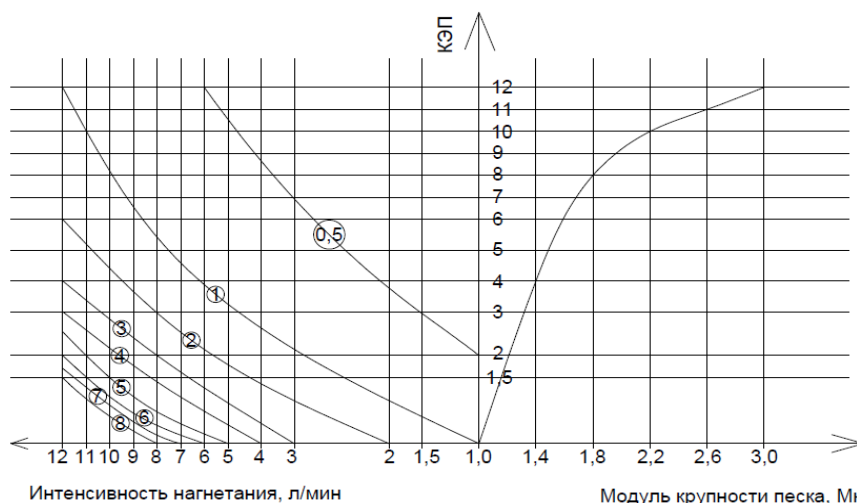
Условия планирования эксперимента					
Факторы		Уровни варьирования			Интервал
Натуральный вид	Кодовый вид	-1	0	1	
Р бар	X1	1,0	3,0	5,0	2,0
л/мин.	X2	1,0	5,0	9,0	4,0
Мк	X3	1,0	2,0	3,0	1,0

Разработано автором

В результате вероятностно-статистической обработки экспериментальных данных была получена трехфакторная математическая модель зависимости КЭП от давления нагнетания, расхода пропиточного состава и модуля крупности песка, необходимые для оптимизации технологии нагнетания КН-1 с учетом конкретных геотехнических условий.

$$Y = 3,4 + 0,6X_1 + 0,9X_2 + 0,9X_3 + 0,9X_1^2 + 0,0X_2^2 + 0,2X_3^2 + 0,5X_1X_2 + 0,5X_1X_3 + (-0,1)X_2X_3.$$

На практике более удобно использовать указанную графическую зависимость, которая позволяет по заданной величине КЭП определить параметры пропитки: давление (изолинии, бар), интенсивность нагнетания (л/мин.), в зависимости от вида грунта (модуль крупности песка, Мк). Например, для крупных песков с модулем крупности МК = 2,6, величина КЭП = 7,8 при давлении нагнетания около 4 бар интенсивности нагнетания 6 л/мин.



**Рисунок 4.** Номограмма для проектирования основных параметров нагнетания для различных песчаных грунтов (разработано автором)

На основе анализа результатов выполненных исследований можно сделать вывод о том, что прочностные и деформационные характеристики исходных образцов грунта существенно повышаются при пропитке специальной инъекционной смеси на основе «КН-1». Сравнительный анализ результатов исследования приведен в таблице 2.

**Таблица 2**

**Сравнительный анализ результатов исследования**

Образец	Параметр	Исходный материал	Материал, пропитанный раствором	Увеличение параметра, %	
Песок средней крупности	E, МПа	200	39,26	51,11	30,18
		400	46,59	55,97	20,13
		600	68,54	78,54	14,59
	$\varphi$ , °	31,91	43,96	36,42	
	$E_{k(0,1-0,2)}$ , МПа	9,07	25,84	184,9	
Песок мелкий	E, МПа	200	35,19	41,85	18,93
		400	44,97	59,04	19,05
		600	63,2	73,92	16,96
	$\varphi$ , °	30,49	36,65	20,52	
	$E_{k(0,1-0,2)}$ , МПа	13,22	18,7	41,45	

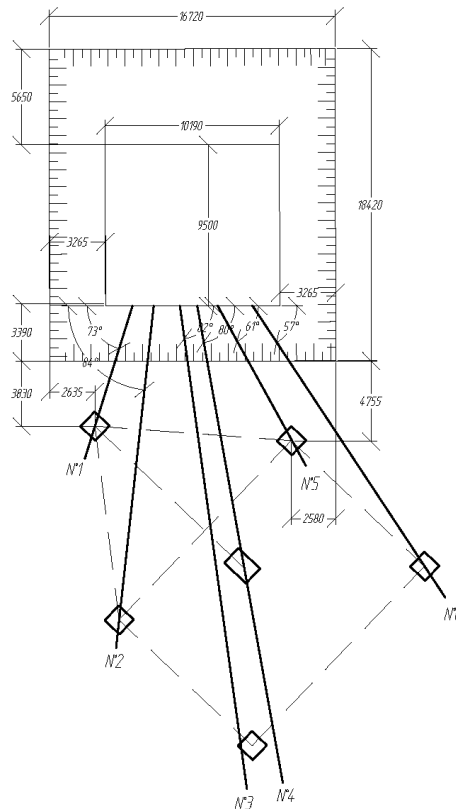
Разработано автором

Как видно из результатов исследования свойств грунта, приведённых в таблице 3 после его обработки инъекционной смесью «КН-1» модуль деформаций песков средней крупности увеличился на 14...30 %, а мелких песков на 16...19 %. При этом, компрессионный модуль деформаций увеличился соответственно на 184,9 % для среднего песка и на 41,5 % для мелкого песка, а угол внутреннего трения увеличился на 36 % и 20,5 % соответственно. Таким образом, предварительная обработка вмещающего массива грунта существенно снижает риск развития неуправляемого гидроразрыва, что является главной предпосылкой для повышения коэффициента эффективности компенсационного нагнетания.

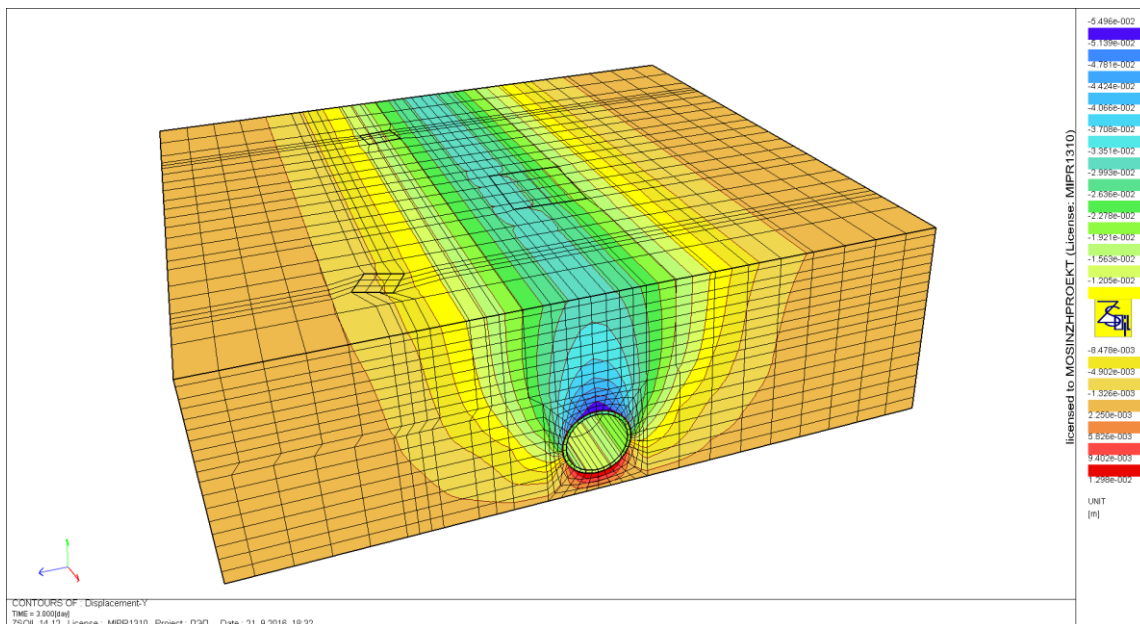
**5. Применение технологии компенсационного нагнетания для защиты сооружений от сверхнормативных деформаций**

При строительстве Кожуховской линии Московского метрополитена на участке ст. "Авиамоторная" – ст. "Некрасовка" в полном объёме были реализованы мероприятия по

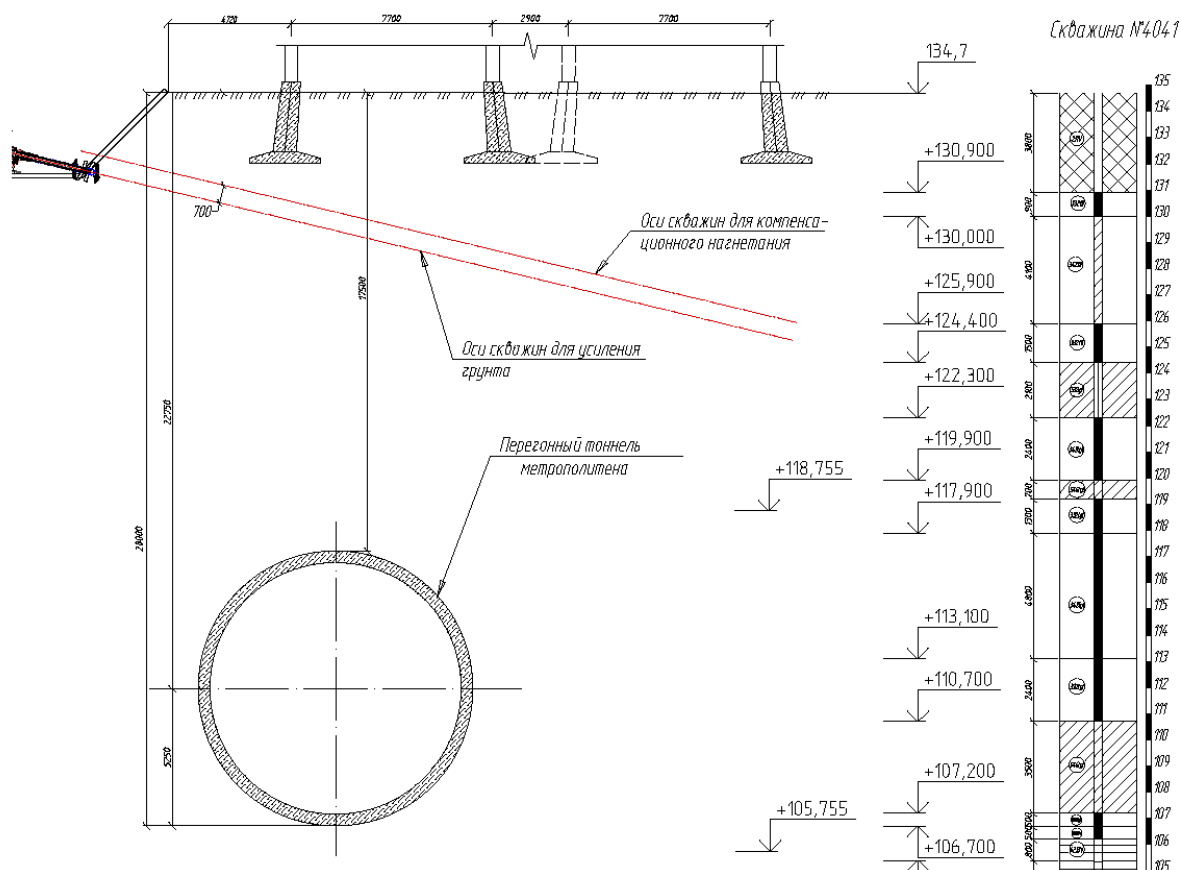
сохранности ЛЭП 500 кВ по технологии компенсационного нагнетания. ЛЭП является частью высоковольтной системы «Каскадная-Чагино». Портальные опоры ЛЭП представляют собой металлическую решетчатую конструкцию из стального прокатного профиля (см. рис. 5). Защищаемая ЛЭП имеет железобетонные фундаментные подножки сечением 720x720 мм. с глубиной заложения 2,7 м (ЛЭП2), 3,2 м (для ЛЭП1, ЛЭП 3). Ввиду высокой степени ответственности сооружения, значения нижних отметок фундамента определены геофизическим методом, дополненным устройством шурфов.



**Рисунок 5.** *Схема размещения буро-инъекционных скважин (разработано автором)*



**Рисунок 6.** *Расчётная схема распределения вертикальных перемещений опор ЛЭП при строительстве тоннеля (разработано автором)*



**Рисунок 7.** Схема размещения буро-инъекционных скважин в основании опор ЛЭП (разработано автором)

Компенсационное нагнетание осуществлялось по верхним инжекторам в процессе проходки тоннелей по технологическом регламенту и согласно данным проводимого геотехнического мониторинга. После проведения компенсационных мероприятий высотное положение конструкций осталось прежним.

Общая продолжительность работ составила 45 рабочих суток при работе в две смены. После завершения работ все проектные задачи были выполнены. Горизонтальное бурение скважин: 188 п.м. с устройством стальных манжетных инжекторов (172 п.м.) в обойменном растворе «Солидур». Предварительная обработка грунта и последующее компенсационное нагнетание (в 6 заходов) во вмещающем массиве выполнялась на длине 57 п.м. Общий объём инъекционной смеси «КН-1» при подготовке вмещающего массива грунта составил 22 куб. м, при интенсивности нагнетания 3...5 л/мин. и давлении не превышающем 5 бар. На этапе активного компенсационного нагнетания общим объём смеси «КН-2» составил 14 куб. м, при интенсивности нагнетания до 8 л/мин. и давлении нагнетания до 28 бар. Выполнены мероприятия позволили полностью исключить развитие осадочных деформаций при проходке ТПМК непосредственно под опорами ЛЭП.

### Выводы

Установлено, что строительство тоннельных сооружений в условиях плотной городской застройки может сопровождаться значительными осадочными деформациями, усиливающимися при их эксплуатации вследствие суффозионного разуплотнения грунтов при водопроявлениях в тело тоннеля. Одним из эффективных средств защиты сооружений от сверхнормативных деформаций является технология компенсационного нагнетания. При этом,

наиболее важным технологическим переделом, обеспечивающим надёжное управление процессом компенсационного нагнетания, является подготовка вмещающего массива грунта, путём связывания его структуры специальными инъекционными смесями, исключающими развитие неуправляемого процесса гидроразрыва в период «активной» фазы при подъёме сооружения на проектную отметку, либо сохранении его в проектном положении.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Moseley M.P. Soil fracturing / M.P. Moseley, K. Kirsch, E. Falk // Ground Improvement (Second Edition). – 2004. – P. 227.
2. Pleithner M. and Bernatzik W. / A new method of compensating settlement of buildings by injections of cement grout. – 1953.
3. Bezuijen A. Compensation grouting in sand, fractures and compaction / A. Bezuijen, F. van Tol. // Proceedings of the 14th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. – Rotterdam, 2007. – pp. 1257–1262.
4. Chambosse G. State of the art of Compensation Grouting in Germany / G. Chambosse, R. Otterbein. // XVth International conference on soil mechanics and geotechnical engineering. Istanbul 08.2002.
5. Gafar K., Soga K., Bezuijen A., Sanders M.P.M. and Tol A.F. van, (2008). “Fracturing of sand in compensation grouting”. Proc. 6st Int. Symposium on Geotech. Aspects of Underground Construction in Soft Ground, Shanghai. 281–286.
6. Рашендорфер, Ю. Компенсационное нагнетание как способ обеспечения устойчивости зданий и сооружений при проходке тоннелей / Ю. Рашендорфер, В.Н. Жуков, К. Майер // Метро и тоннели, № 4. – М., 2008. – С. 26–28.
7. Смирнова Г.О. Компенсационное нагнетание при проходке Лефортовского тоннеля под Алексеевским училищем / Г.О. Смирнова, В.Г. Голубев // Специальные способы работ и материалы, используемые при сооружении городских транспортных тоннелей: сб. науч. тр. – М.: ЦНИИС, 2003. – С. 120–130.

8. Смолдырев А.Е. Технологическая схема компенсационного нагнетания твердеющих смесей в грунты при строительстве тоннеля в Лефортово / А.Е. Смолдырев // Основания, фундаменты и механика грунтов, № 1. – М., 2000. – С. 21–22.
9. Тер-Мартirosян З.Г. Напряженно-деформированное состояние преобразованного основания / Абдулмалек Ала Саид // Основания, фундаменты и механика грунтов. №2. 2007. 8–11 стр.
10. Чеботаев, В.В. Расчеты деформации земной поверхности и оснований инженерных сооружений при строительстве тоннелей / В.В. Чеботаев, Дисс. к.т.н., Москва, 1970 г.
11. Чунюк Д.Ю. Влияние геотехнического барьера, устроенного методом компенсационного нагнетания, на деформацию существующего здания при строительстве туннеля. Естественные и технические науки / Иртуганова В.Р., Сафронова К.В., №4, 2015 г. стр. 245–248.
12. СТО НОСТРОЙ 2.3.18-2011: Укрепление грунтов инъекционными методами в строительстве, Москва, 2012, 63 с.
13. Руководство по комплексному освоению подземного пространства крупных городов. Москва, 2004, 168 с.
14. Беллендир, Е.Н., А.В. Александров, М.Г. Зерцалов, А.Н. Симутин Защита и выравнивание зданий и сооружений с помощью технологии компенсационного нагнетания. Гидротехническое строительство. – 2016. – №2. – С. 15–19.
15. Зерцалов, М.Г., А.Н. Симутин, А.В. Александров Технология компенсационного нагнетания для защиты зданий и сооружений // Вестник МГСУ. – 2015. – № 6. – С. 32–40.
16. Александров А.В. Разработка и обоснование метода выравнивания гидротехнических сооружений, подвергшихся ненормативным осадкам, Дисс. к.т.н., Москва, 2018 г.
17. Симутин А.Н.: Методики расчёта параметров компенсационного нагнетания для управления деформациями оснований зданий и сооружений. Диссертация к.т.н., Москва, 2015 г.

**Kharchenko Igor Yakovlevich**

National research university Moscow state university of civil engineering, Moscow, Russia

**Pestryakova Ekaterina Alekseevna**

Russian university of transport (МИИТ), Moscow, Russia  
E-mail: Kate.pestriakova@gmail.com

**Piskunov Aleksandr Alekseevich**

Russian university of transport (МИИТ), Moscow, Russia

**Kharchenko Alexey Igorevich**

National research university Moscow state university of civil engineering, Moscow, Russia

**Beterbiev Adam Said-Emievich**

National research university Moscow state university of civil engineering, Moscow, Russia

**Sonin Aleksandr Nikolaevich**

Russian university of transport (МИИТ), Moscow, Russia

## **Features of design, construction and operation of underground tunnels and tunnel structures in dense urban areas**

**Abstract.** The development of a modern city and the increase of its transport infrastructure, in particular metro facilities, has a significant impact on the urban environment and requires the development and implementation of a set of special protective measures. Moreover, if the construction of metro station complexes is carried out, as a rule, in relatively free areas with minimal impact on the surrounding buildings, then during the construction of tunnels and tunnel structures, engineering communications, buildings and structures located on the earth's surface, including transport facilities, architectural monuments and cultural heritage objects fall into the zone of their influence.

The effectiveness of design solutions for the protection of objects that are in the zone of influence of the construction of underground structures is largely determined by the degree of reliability of the assessment of geotechnical conditions and the results of the survey of the technical condition of building structures.

Analysis of the causes of the formation and development of emergency situations and incidents arising in the construction and operation of underground structures shows that they are mainly the result of the use of unreliable initial engineering-geological and hydrogeological conditions, significantly changing due to intensive urban development. The resulting barrage effect, changes in groundwater levels and directions that are not taken into account at the design stage, can be accompanied by significant deterioration of soil properties and the General stress-strain state at the base of existing buildings and structures.

This suggests the need for careful study of the properties of soils at significant depths, the development of forecasts of possible changes of the state of the soil massif and hydrogeological conditions, the implementation of a comprehensive survey of the bases of closely spaced buildings and structures, and significantly larger volume of engineering-geological surveys compared to the current regulations.

**Keywords:** underground; stress-strain state of soil; sedimentary deformation; method of compensation injection

## REFERENCES

1. Moseley M.P., Kirsch K., Falk E. (2004). Soil fracturing. *Ground Improvement (Second Edition)*, p. 227.
2. Pleithner M., Bernatzik W. (1953). A new method of compensating settlement of buildings by injections of cement grout.
3. Bezuijen A., F. van Tol. (2007). *Compensation grouting in sand, fractures and compaction*. Rotterdam, pp. 1257–1262.
4. Chambosse G., Otterbein R. (2002). *State of the art of Compensation Grouting in Germany*. Istanbul.
5. Gafar K., Soga K., Bezuijen A., Sanders M.P.M., Tol A.F. van (2008). *Fracturing of sand in compensation grouting*. Shanghai, pp. 281–286.
6. Rashendorfer Yu., Zhukov V.N., Mayer K. (2008). Compensatory injection as a way to ensure the stability of buildings and structures during tunneling. *Metro and tunnels*, 4, pp. 26–28 (in Russian).
7. Smirnova G.O., Golubev V.G. (2003). Kompensatsionnoe nagnetanie pri prokhodke Lefortovskogo tonnelya pod Alekseevskim uchilishchem. [*Compensatory injection during the driving of the Lefortovo tunnel under the Alekseevsky school.*] Moscow: TsNIIS, pp. 120–130.
8. Smoldyrev A.E. (2000). Technological scheme of compensatory injection of hardening mixtures into the soil during the construction of the tunnel in Lefortovo. *Foundations, foundations and soil mechanics*, 1, pp. 21–22 (in Russian).
9. Ter-Martirosyan Z.G., Abdulmalek Ala Said (2007). The stress-strain state of the transformed base. *Foundations, foundations and soil mechanics*, 2, pp. 8–11 (in Russian).
10. Chebotaev V.V. (1970). Raschety deformatsii zemnoy poverkhnosti i osnovaniy inzhenernykh sooruzheniy pri stroitel'stve tonneley. [*Calculations of the deformation of the earth's surface and the foundations of engineering structures in the construction of tunnels.*] Moscow.
11. Chunyuk D.Yu., Irtuganova V.R., Safronova K.V. (2015). The influence of the geotechnical barrier, arranged by the method of compensatory injection, on the deformation of an existing building during the construction of the tunnel. *Natural and technical sciences*, 4, pp. 245–248.
12. (2012). STO NOSTROY 2.3.18-2011: Ukreplenie gruntov in"ektsionnymi metodami v stroitel'stve. [*STO NOSTROY 2.3.18-2011: Soil strengthening by injection methods in construction.*] Moscow, p. 63.
13. (2004). Rukovodstvo po kompleksnomu osvoeniyu podzemnogo prostranstva krupnykh gorodov. [*Guide to the integrated development of the underground space of large cities.*] Moscow, p. 168.
14. Bellendir E.N., Aleksandrov A.V., Zertsalov M.G., Simutin A.N. (2016). Protection and alignment of buildings and structures with the help of compensation injection technology. *Hydraulic engineering*, 2, pp. 15–19 (in Russian).



15. Zertsalov M.G., Simutin A.N., Aleksandrov A.V. (2015). Compensatory injection technology for the protection of buildings and structures. *Bulletin of Moscow State University of Civil Engineering*, 6, pp. 32–40 (in Russian).
16. Aleksandrov A.V. (2018). Razrabotka i obosnovanie metoda vyravnivaniya gidrotekhnicheskikh sooruzheniy, podvergshikhsya nenormativnym osadkam. [*Development and justification of the method of leveling hydraulic structures subjected to non-standard precipitation.*] Moscow.
17. Simutin A.N. (2015). Metodiki raschyota parametrov kompensatsionnogo nagnetaniya dlya upravleniya deformatsiyami osnovaniy zdaniy i sooruzheniy. [*Methods for calculating compensation injection parameters for controlling deformations of the foundations of buildings and structures.*] Moscow.