

Эффективность компенсационного нагнетания как способа регулирования напряженно-деформированного состояния грунтовых оснований в сложных геотехнических условиях / Я.А. Пронозин, Р.В. Мельников, Н.Ю. Киселев, А.А. Тарасенко, Ю.Д. Гресс // Construction and Geotechnics. – 2023. – Т. 14, № 2. – С. 51–62. DOI: 10.15593/2224-9826/2023.2.04

Prnozina Ya.A., Melnikov R.V., Kiselev N.Yu., Tarasenko A.A., Gress Yu.D. Effectiveness of compensatory injection as a means of regulating the stresses in complex geotechnical conditions. *Construction and Geotechnics*. 2023. Vol. 14. No. 2. Pp. 51-62. DOI: 10.15593/2224-9826/2023.2.04

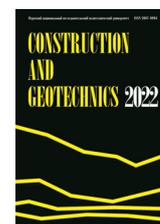


**пермский  
политех**

**CONSTRUCTION AND GEOTECHNICS**

**Т. 14, № 2, 2023**

<http://vestnik.pstu.ru/arhit/about/inf/>



DOI: 10.15593/2224-9826/2023.2.04

УДК 624.154.5

## **ЭФФЕКТИВНОСТЬ КОМПЕНСАЦИОННОГО НАГНЕТАНИЯ КАК СПОСОБА РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ГРУНТОВЫХ ОСНОВАНИЙ В СЛОЖНЫХ ГЕОТЕХНИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ**

**Я.А. Пронозин<sup>1,2</sup>, Р.В. Мельников<sup>1</sup>, Н.Ю. Киселев<sup>1</sup>, А.А. Тарасенко<sup>1</sup>, Ю.Д. Гресс<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

<sup>2</sup>Геофонд+, Тюмень, Россия

### О СТАТЬЕ

Получена: 05 декабря 2022

Одобрена: 22 марта 2023

Принята к публикации:

03 июля 2023

#### Ключевые слова:

инъектирование грунта, манжетная технология, геотехнический барьер, аварийная ситуация, численное моделирование, глубокий котлован, зона влияния нового строительства, городская застройка.

### АННОТАЦИЯ

Разработка глубоких котлованов в условиях плотной городской застройки зачастую приводит к образованию дополнительных осадков зданий, попадающих в зону влияния нового строительства. Наиболее чувствительными к таким осадкам, согласно нормативной литературе, являются здания исторической застройки. В качестве одного из способов регулирования дополнительных осадков зданий в зоне влияния глубоких котлованов является компенсационное нагнетание. Создаваемая в грунтовом основании сетка гидроразрывов создает дополнительное боковое обжатие грунта и изменяет его физико-механические свойства. В статье рассматривается реальный пример аварийной ситуации на одном из объектов в г. Тюмени, где при разработке котлована проектной глубиной 6,3 м под строительство пятиэтажного здания с расширенным двухуровневым подземным пространством были выявлены существенные сверхнормативные осадки прилегающего к котловану исторического здания и повреждение его несущих конструкций, как следствие развития дополнительных осадков.

Целью настоящего исследования является оценка эффективности проведения компенсационного нагнетания по манжетной технологии для снижения сверхнормативных дополнительных осадков зданий в зоне влияния разработки глубоких котлованов.

Авторами был произведен комплексный анализ влияния нового строительства на окружающую застройку посредством численного моделирования. Анализируя результаты численного моделирования, авторы разработали мероприятия по ликвидации аварийной ситуации и стабилизации основания.

По результатам геодезического мониторинга установлено, что при устройстве геотехнического барьера инъектированием грунта по манжетной технологии удалось не только стабилизировать основание, но и привести здание в положение, удовлетворяющее нормативным требованиям.

© ПНИПУ

© **Пронозин Яков Александрович** – доктор технических наук, профессор, e-mail: [geofond.tgasu@gmail.com](mailto:geofond.tgasu@gmail.com).

**Мельников Роман Викторович** – кандидат технических наук, доцент, e-mail: [melnikovrv@tyuiu.ru](mailto:melnikovrv@tyuiu.ru).

**Киселев Никита Юрьевич** – кандидат технических наук, доцент, [Kiselev3452@gmail.com](mailto:Kiselev3452@gmail.com).

**Тарасенко Александр Алексеевич** – доктор технических наук, профессор, [a.a.tarasenko@gmail.com](mailto:a.a.tarasenko@gmail.com).

**Гресс Юрий Дмитриевич** – студент, e-mail: [ruizav99@gmail.com](mailto:ruizav99@gmail.com).

**Yakov A. Pronozin** – Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: [geofond.tgasu@gmail.com](mailto:geofond.tgasu@gmail.com).

**Roman V. Melnikov** – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: [melnikovrv@tyuiu.ru](mailto:melnikovrv@tyuiu.ru).

**Nikita Yu. Kiselev** – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: [Kiselev3452@gmail.com](mailto:Kiselev3452@gmail.com).

**Aleksandr A. Tarasenko** – Doctor of Technical Sciences, Professor, e-mail: [a.a.tarasenko@gmail.com](mailto:a.a.tarasenko@gmail.com).

**Yurii D. Gress** – Master's Student, e-mail: [ruizav99@gmail.com](mailto:ruizav99@gmail.com).



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

## **EFFECTIVENESS OF COMPENSATORY INJECTION AS A MEANS OF REGULATING THE STRESSES IN COMPLEX GEOTECHNICAL CONDITIONS**

**Ya.A. Pronozin<sup>1,2</sup>, R.V. Melnikov<sup>1</sup>, N.Yu. Kiselev<sup>1</sup>, A.A. Tarasenko<sup>1</sup>, Yu.D. Gress<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation

<sup>2</sup> Geofond+, Tyumen, Russian Federation

---

### ARTICLE INFO

Received: 05 December 2022

Approved: 22 March 2023

Accepted for publication:

03 July 2023

### Keywords:

soil injection, cuff technology, geotechnical barrier, emergency situation, numerical modelling, deep excavation, zone of influence of new construction, urban development.

### ABSTRACT

Deep excavations in dense urban areas often result in additional settlement of buildings that fall within the influence area of new construction. The most sensitive to such settlements, according to the normative literature, are historic buildings. One of the ways to regulate additional building settlement in the influence area of deep excavations is compensatory injection. The hydraulic fracture network created in the foundation creates additional lateral compression of the soil and changes its physical and mechanical properties. The article deals with a real example of an emergency situation at one of the objects in Tyumen, where during excavation of a pit with the designed depth of 7 meters for the construction of a five-storey building with an extended two-level underground space significant excessive settlement of the adjacent historic building and damage to its bearing structures were revealed as a consequence of the additional settlement development.

The purpose of the present study is to evaluate the effectiveness of compensatory injection using collar technology to reduce excessive additional settlement of buildings in the zone of influence of deep excavations.

A comprehensive analysis of the impact of new construction on the surrounding environment has been carried out by the authors of the article by means of numerical simulation. Analyzing the results of numerical modelling, the authors of the article developed measures to eliminate the emergency situation and stabilise the foundation.

Based on the results of geodetic monitoring, it was found that the installation of a geotechnical barrier by injecting soil using the collar technique not only stabilised the foundation but also brought the building into position to meet regulatory requirements.

© PNRPU

---

## **Введение**

Одним из наиболее существенных факторов, влияющих на работоспособность и безаварийную эксплуатацию зданий и сооружений, является неравномерность осадок. Данный фактор способен изменить напряженно-деформированное состояние здания и даже создать аварийную ситуацию [1].

При производстве строительных работ, особенно связанных с разработкой глубоких котлованов, в условиях плотной городской застройки необходимо в обязательном порядке производить мониторинг осадок зданий и сооружений, попадающих в зону влияния работ [2, 3]. Согласно СП 22.13330.2016, если такими зданиями являются исторические, то необходимо проводить обследование их технического состояния, которое определит их предельные дополнительные осадки.

В случае если расчетные значения дополнительных осадок для зданий окружающей застройки получаются сверхнормативными, необходимо использовать методы усиления грунтового основания, ограничивающие развитие осадок, или при необходимости его выравнивание или подъем. К ним относятся: компенсационное нагнетание, буроинъекционные сваи, пневматические конструкции, расширяющиеся непосредственно в грунте, обжатие грунта анкерами и канатами, вакуумирование и некоторые другие [4–6].

Одним из эффективных способов, который позволяет достаточно гибко регулировать сверхнормативные осадки фундаментов зданий, является компенсационное нагнетание [7]. Нагнетание инъекции по выбранным горизонтам – манжетная технология – широко используется в практике строительства [8, 9].

Одним из вопросов, не имеющих решения в компенсационном нагнетании по манжетной технологии, является прогнозирование развития гидроразрыва в теле грунта. Поэтому точно предсказать поведение здания при проведении нагнетания сложно, хотя подобные исследования проводятся [10–12]. При производстве работ важно использовать средства мониторинга для постоянного отслеживания влияния нагнетания на здание или сооружение и применять оперативные технологические и проектные решения – наблюдательный метод проектирования [13, 14].

Продемонстрировать эффективность применения компенсационного нагнетания для предотвращения сверхнормативных дополнительных осадок здания окружающей застройки можно на примере строительства здания в г. Тюмени.

### Краткое описание объекта

В историческом центре г. Тюмени, в окружении плотной городской (в том числе исторической) застройки, выполняется строительство пятиэтажного здания с расширенным двухуровневым подземным пространством глубиной 6,3 м. Стесненные условия строительства, большая по площади и достаточно глубокая выемка грунта обязывает применять мероприятие, снижающее воздействие на окружающую застройку, – ограждение котлована. Проектным решением являлось консольное ограждение котлована с размерами в плане 74,0 × 94,2 м, выполненное из ряда буросекущих свай диаметром 0,88, длиной 28,0 м, объединенных обвязочной монолитной балкой 1,0 × 0,6 м. В непосредственной близости располагаются исторические здания, ближайшее – с северной стороны котлована на расстоянии 6,2–6,7 м (рис. 1).



Рис. 1. Схема расположения объекта строительства  
Fig. 1. Diagram of the construction site location

### Инженерно-геологические условия

В геологическом строении участка строительства принимают участие олигоценые образования и озерно-аллювиальные отложения верхнечетвертичного возраста ( $laQ_{III-IV}$ ), представленные песчано-глинистыми грунтами, выдержанными по мощности

и простирацию, и техногенные отложения ( $tQ_{IV}$ ), представленные насыпным грунтом. В таблице выделено шесть инженерно-геологических элементов (ИГЭ) для грунтовых вод на глубине 4,5–5 м.

Расчетные значения прочностных и деформационных характеристик грунтов

Design values for strength and strain characteristics of soils

Номер ИГЭ	Описание	$\rho_i$ , г/см <sup>3</sup>		$c_i$ , кПа		$\varphi_i$ , град		$E$ , МПа
		$\rho_I$	$\rho_{II}$	$c_I$	$c_{II}$	$\varphi_I$	$\varphi_{II}$	
1	Суглинок тугопластичный	1,92	1,93	19	21	18	19	11,7
2	Суглинок мягкопластичный	1,85	1,86	16	17	17	18	8,6
3	Суглинок текучепластичный, с примесью органического вещества	1,86	1,87	13	14	15	16	5,3
4	Супесь пластичная	1,99	1,99	12	13	20	21	12
5	Суглинок полутвердый, с примесью органического вещества	1,84	1,84	33	34	17	17	10,7
6	Суглинок тугопластичный, с примесью органического вещества	1,83	1,84	20	221	19	20	9,7

### Влияние на историческую застройку

Проектная документация для строящегося здания практически не оценивала влияние на окружающую застройку. Предусматривалось, что устройство консольного ограждения котлована является «закрывающим» мероприятием. Именно в таком состоянии проектная документация получила положительное заключение экспертизы, и было получено разрешение на строительство. Несмотря на это, заказчик обратился к авторам данной статьи для проведения геотехнической экспертизы проектных решений устройства котлована. Параллельно с этим подрядчик приступил к реализации объекта строительства, проводя подготовительные работы.

При анализе проектной документации было установлено, что оценка зоны влияния определялась только на момент полного завершения строительства здания, когда свайный фундамент передает всю нагрузку на нижние, более прочные и жесткие, слои грунта. В этом случае граница зоны влияния располагалась не дальше, чем 1,5 м от контура здания. Влияние на окружающую застройку на стадии откопки котлована в проекте не оценивалось.

Учитывая этот факт, необходимо было провести анализ работы проектного решения ограждения котлована для оценки влияния откопки котлована на окружающую застройку, в частности на самое близкое историческое здание. Это здание являлось главным административным зданием заказчика. Дополнительной сложностью было то, что требовалось провести анализ в кратчайшие сроки, так как процесс устройства ограждения котлована уже проводился подрядчиком. Необходимо, чтобы заверченный анализ был готов до начала откопки котлована.

### Численное моделирование и анализ влияния на историческую застройку

Заданные заказчиком временные сроки геотехнического анализа ситуации требовали использования несколько упрощенных процедур, критически не снижающих точности и достоверности расчета. Так, оценка влияния нового строительства на окружающую застройку про-

водилась в программном комплексе Midas FEA NX 2021 в плоской постановке с расчетом по сечению с самым близким расстоянием до исторического здания, равным 6,2 м (рис. 1, 2).

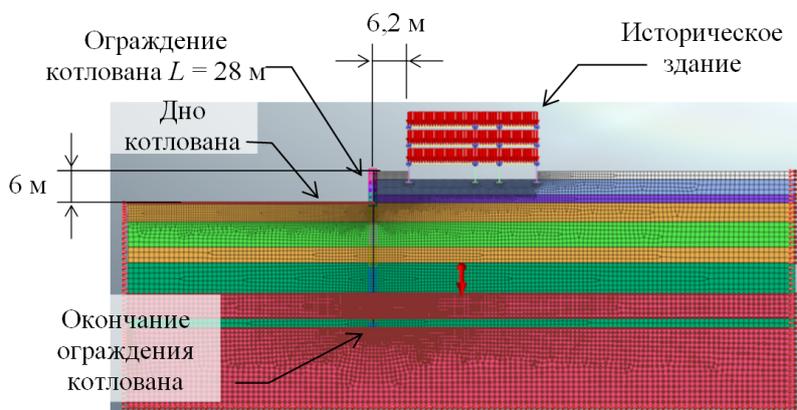


Рис. 2. Модель расчетного сечения  
 Fig. 2. Calculation model of the design cross-section

Для корректного процесса моделирования разгрузки грунтового основания (откопки котлована) и работы грунта за ограждением котлована была применена модифицированная модель Мора – Кулона. Данная модель является усовершенствованной версией модели Мора – Кулона, созданной путем объединения нелинейно-упругой и упругопластической модели. Модифицированная модель Мора – Кулона схожа с моделью упрочняющегося грунта Hardening soil. Она также позволяет моделировать двойное упрочнение, учитывает изменение жесткости грунта от действующего напряжения и траекторию нагружения.

По результатам расчета было установлено, что проектное решение ограждения котлована неспособно предотвратить существенное влияние на историческое здание (рис. 3). Фундаменты здания попадают в зону интенсивных деформаций (более 10 мм). Осадка фундаментов наружной стены здания составляет 26, а горизонтальное смещение 15 мм. Область существенных горизонтальных смещений (более 10 мм) захватывает все здание.

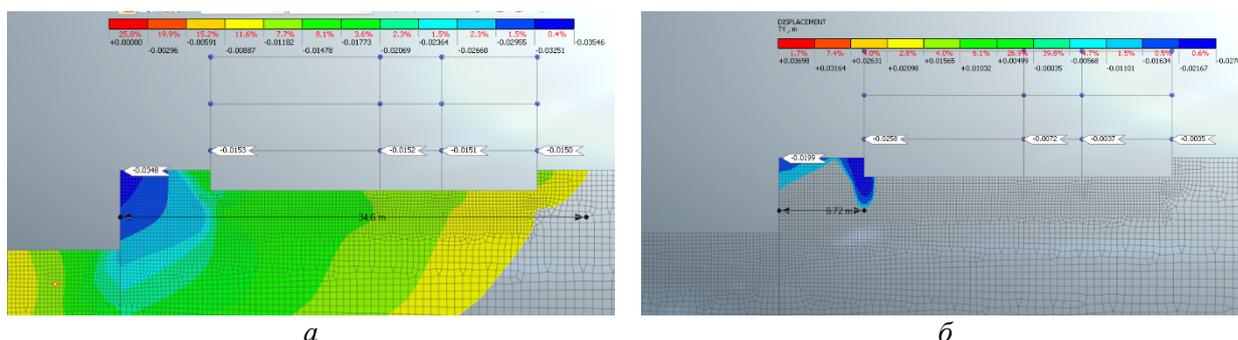


Рис. 3. Зоны интенсивных деформаций (более 10 мм) при откопке котлована до проектной отметки: *a* – горизонтальные, *б* – вертикальные  
 Fig. 3. Areas of intense deformation (greater than 10 mm) when excavating the excavation to the design elevation: *a* – horizontal, *б* – vertical

В результате численного моделирования установлено, что разработка котлована окажет существенное влияние на историческое здание с вероятностью создания аварийной ситуации. Жесткость конструкции ограждения котлована достаточна только для удержа-

ния откоса в равновесии, однако не обеспечивает отсутствие чрезмерных дополнительных осадок исторического здания. Так как результаты расчета являлись существенными, описывающими возможность аварийного развития ситуации, было принято решение ограничиться только данным расчетным сечением и незамедлительно сообщить о результатах расчета заказчику. Авторами рекомендовалось повысить жесткость ограждения котлована и провести работы по усилению грунтового основания и фундаментов исторического здания, существенно снижая тем самым возникающие дополнительные осадки.

## **Аварийная ситуация**

Ознакомившись с рекомендациями и прогнозированием развития аварийной ситуации, заказчик обратился к генеральному проектировщику с просьбой оценить состоятельность результатов расчета и полученных выводов. Начался процесс обсуждения проведенного расчета и его выводов в формате двухсторонних встреч (генеральный проектировщик – авторы статьи). Генеральный проектировщик последовательно и старательно защищал свои проектные решения («прошедшие экспертизу») и пытался представить ничтожными результаты поверочного независимого расчета.

Все это время строительство объекта не прекращалось. Подрядчик не был извещен о наличии иного мнения о безопасности проектного решения ограждения котлована. Оно было выполнено и начинались работы по откопке котлована.

Периодический геодезический мониторинг окружающей застройки, проводимый подрядчиком, отставал от темпов откопки котлована. Не доходя до проектной отметки дна котлована 2 м, т.е. при глубине разработки котлована 4,3 м, стали наблюдаться значительные дополнительные осадки исторического здания. Это привело к тому, что в историческом кирпичном здании со сводчатыми перекрытиями вдоль общего продольного коридора образовалась продольная сквозная трещина по всем перекрытиям здания шириной раскрытия 5–15 мм, после чего было принято решение о местной приостановке проведения работ, их переносе на противоположную сторону котлована.

## **Исправление аварийной ситуации**

Заказчик вновь обратился к авторам данной статьи для разработки мероприятий по ликвидации аварийной ситуации и стабилизации основания. Повторному обращению способствовало, во-первых, то, что расчетное прогнозирование аварийной ситуации действительно произошло, во-вторых, расчетные значения перемещений фундаментов исторического здания на 85 % соответствовали геодезическому мониторингу.

Стабилизации деформаций грунтового основания исторического здания не происходило – осадка составляла до 2 мм в неделю. Необходимо было проводить срочные противоаварийные мероприятия, гарантирующие стабилизацию деформаций и их последующее отсутствие при продолжении откопки котлована. Опираясь на литературные источники из отечественной [2–5] и мировой [17–20] практики применения, описывающие сопоставимый опыт, а также опираясь на собственный производственный опыт, было принято решение об устройстве геотехнического барьера при помощи инъектирования грунта по манжетной технологии. Также возможны варианты устройства усиления грунтового основания посредством буроинъекционных свай [15], пневматических конструкций, обжата грунта анкерами и канатами, вакуумирования [4–6], однако манжетная технология по

сравнению с представленными позволяет активно влиять на деформации грунтового основания, регулируя их во времени, а также является наиболее простой, универсальной для различных типов дисперсных грунтов и одновременно эффективной [16].

Учитывая срочность и безотлагательность противоаварийных мероприятий, заказчик согласился на проведение работ на основе наблюдательного метода проектирования, когда проектом предусматривалось расположение геотехнического барьера и его основные конструктивные параметры (длина и шаг инъекторов, поддерживаемое давление) с возможностью корректировки на основании результатов собственного геотехнического мониторинга.

Предусматривалось устройство одного ряда наклонных инъекторов между ограждением котлована и историческим зданием с шагом 2 м и длиной 6,5 м (рис. 4). Нагнетаемая водоцементная смесь поддерживалась давлением, равным 5 МПа, в три цикла нагнетания.

Создаваемые в грунтовом основании гидроразрывы частично изменяют его физико-механические характеристики и создают дополнительные горизонтальные напряжения (боковое обжатие грунта). Это, в свою очередь, обеспечивает сдерживание и последующее прекращение развития дополнительных осадок исторического здания. Для контроля и регулирования данного процесса проведение работ осуществлялось технологическими циклами с параллельным геодезическим мониторингом.

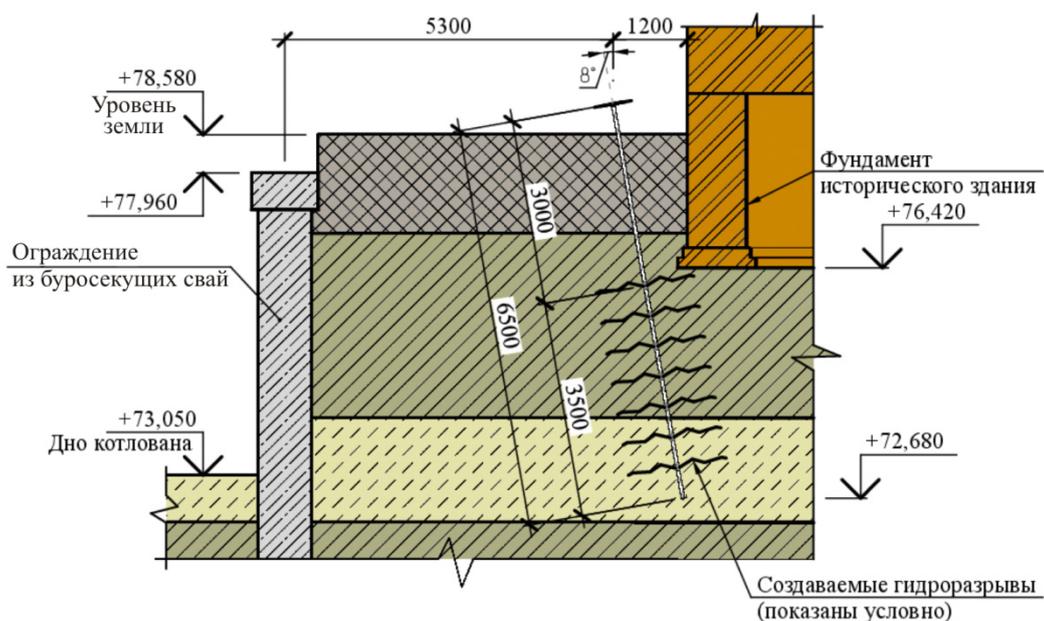


Рис. 4. Расчетная модель расчетного сечения  
Fig. 4. Calculation model of the design cross-section

## Геодезический мониторинг

Геодезический мониторинг за историческим зданием, проводимый при устройстве геотехнического барьера, позволил оценить динамику развития дополнительных осадок и эффективность принятых мероприятий. Сводный график мониторинга с выделенными технологическими этапами и моментами снятия показаний содержит данные, переданные подрядчиком (синий участок, рис. 5), и данные авторов статьи (красный участок, рис. 5).

Как видно из данных мониторинга, дополнительная осадка исторического здания начинала медленно накапливаться при откопке котлована (этап «0», рис. 5), затем процесс

резко ускорился, что привело как к развитию аварийной ситуации для здания, так и остановке откопки котлована на данном участке. Резкий прирост осадок мог быть выявлен гораздо раньше, но этого не произошло из-за редкого периода снятия показаний. Именно на этом этапе авторы данной статьи проводили геотехнический анализ ограждения котлована.

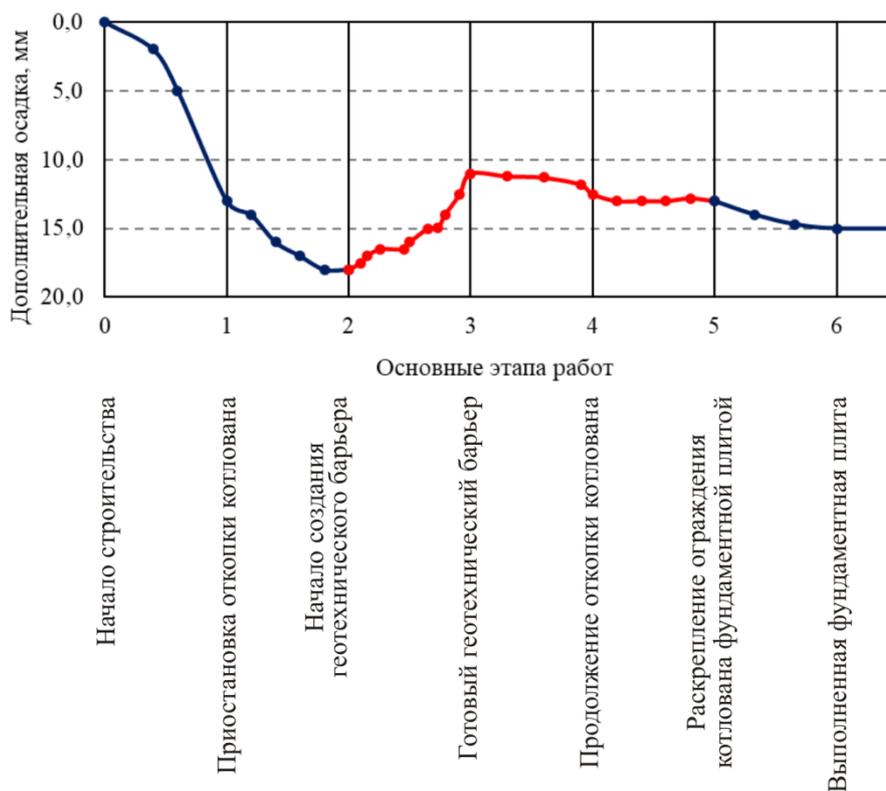


Рис. 5. Сводный график геодезического мониторинга исторического здания  
Fig. 5. Summary diagram of the geodetic monitoring of the historic building

На следующем этапе (этап «1», рис. 5) происходила проработка технических решений, результатом которой оказался проект геотехнического барьера, использующий наблюдательный метод проектирования. Периодичность геодезической съемки увеличилась.

Создание геотехнического барьера (этап «2», рис. 5) проходило при оперативной геодезической съемке. На данном этапе удалось вернуть часть накопленных дополнительных осадок.

В дальнейшем (этап «3», рис. 5) при продолжении работ по разработке грунта котлована еще на 2 м развитие осадок продолжилось, но уже с существенно меньшей скоростью до раскрепления верхней части стены из буросекущих свай с подземной частью сооружения (этап «5» и «6», рис. 5). Эти осадки уже не представляли никакой опасности для сооружения, и можно было приступить к его ремонту.

## Выводы

Оценка зоны влияния нового строительства на окружающую застройку должна определяться не только на стадии полной реализации объекта строительства. Необходимо оценивать все основные этапы возведения здания, особенно этапы, связанные с поддержкой ограждением котлована грунтового массива.

Эффективной противоаварийной мерой стабилизации осадок окружающей застройки может являться создание геотехнического барьера при помощи инъектирования грунта по манжетной технологии.

Создание геотехнического барьера должно рассматриваться только как наблюдательный метод проектирования, а, следовательно, его применение должно осуществляться только специализированными организациями, сочетающими комплекс проектных, производственных и мониторинговых работ.

Эффективность компенсационного нагнетания подтверждена на реальном примере. Ее применение оправдано как способ исправления чрезмерных дополнительных осадок зданий и сооружений. При этом актуальными остаются вопросы прогнозирования изменения напряженно-деформированного состояния грунтового основания в зависимости от количества нагнетаемого раствора, частоты установки инъекторов, состава раствора инъекции и положения в пространстве гидроразрывов. Такие исследования позволят расширить его область применения, убрав ограничения его использования только в рамках наблюдательного метода.

**Финансирование.** Исследование не имело спонсорской поддержки.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Вклад авторов.** Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации.

## Библиографический список

1. Колыбин И.В. Уроки аварийных ситуаций при строительстве котлованов в городских условиях // Развитие городов и геотехническое строительство: междунар. тем. сб. тр. – СПб., 2008. – С. 89–124.
2. Петрухин В.П., Шулятьев О.А., Мозгачева О.А. Опыт проектирования и мониторинга подземной части турецкого торгового центра // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2004. – № 5. – С. 2–8.
3. Петрухин В.П., Поспехов В.С., Шулятьев О.А. Опыт проектирования и мониторинга глубокого котлована // Сб. науч. тр. НИИОСП им. Н. М. Герсеванова. – М.: ЭСТ, 2008. – С. 139–148.
4. Комплексные решения при применении технологии компенсационного нагнетания / А.К. Нефедьева, А.П. Нефедьев, М.И. Баженов, А.В. Александров, В.А. Алексеев // Метро и тоннели. – 2020. – № 3. – С. 32–33.
5. Шулятьев О.А., Мозгачева О.А. Вертикальный геотехнический барьер по методу компенсационного нагнетания // Геотехнические проблемы строительства крупномасштабных и уникальных объектов: междунар. геотехн. конф. – Алматы, 2004. – С. 473–478.
6. Способ изменения напряженно-деформированного состояния грунтов основания / В.П. Петрухин, О.А. Шулятьев, М.Н. Ибрагимов, О.А. Мозгачева // Вестник НИЦ «Строительство». – 2014. – № 10. – С. 99–109.
7. Алексеев В.А., Баженов М.И. Компенсационное нагнетание как основная технология в качестве мероприятий по сохранности зданий и сооружений при расчетном прогнозе сверхнормативных осадок // БСТ: Бюллетень строительной техники. – 2021. – № 7(1043). – С. 50–52.
8. Петрухин В.П., Шулятьев О.А., Мозгачева О.А. Проектирование и устройство вертикального или наклонного геотехнического барьера методом компенсационного нагнетания: Стандарт организации. СТО 36554501-007-2006. – М.: НИЦ «Строительство», 2006. – С. 26.

9. Экспериментальные исследования изменения НДС грунта при устройстве геотехнического барьера / О.А. Шулятьев, М.Н. Ибрагимов, О.А. Мозгачева, Д.К. Минаков // Вестник НИЦ «Строительство». – 2014. – № 10. – С. 88–92.
10. Шулятьев О.А. Изменения напряженно-деформированного состояния массива грунта или его уплотнение при инъекциях // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2016. – № 3. – С. 39–40.
11. Лубягин А.В., Федоров В.К. Модификация грунтовых оснований методом компенсационного нагнетания // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2015. – № 2. – С. 28–31.
12. Простов С.М., Герасимов О.В., Никулин Н.Ю. Результаты исследований свойств глинистых грунтов при локальном гидроразрыве и уплотнении инъекцией цементно-песчаного раствора // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2015. – № 2. – С. 16–21.
13. Обзор возможностей и перспективы применения наблюдательного метода / Д.Е. Разводовский, И.В. Колыбин, И.Г. Анисимов, Н.Н. Фокин // Промышленное и гражданское строительство. – 2016. – № 10. – С. 55–63.
14. Баранов А.К., Анисимов И.Г., Фокин Н.Н. Пример применения наблюдательного метода при проектировании противоаварийных мероприятий // Вестник НИЦ «Строительство». – 2017. – № 2(13). – С. 6–15.
15. Полищук А.И., Семенов И.В. Проектирование усиления фундаментов реконструируемых, восстанавливаемых зданий с использованием свай // Construction and Geotechnics. – 2020. – Т. 11, № 4. – С. 33–45. DOI: 10.15593/2224-9826/2020.4.03
16. Калач Ф.Н. Оценка эффективности использования технологии инъекционного укрепления слабых грунтов в основании фундаментов мелкого заложения саморасширяющимися растворами // Construction and Geotechnics. – 2020. – Т. 11, № 2. – С. 62–77. DOI: 10.15593/2224-9826/2020.2.06
17. Diffusion characteristics and reinforcement effect of cement slurry on porous medium under dynamic water condition considering infiltration / X. Du, C. Liu, C. Wang, H. Fang, B. Xue, X. Gao, Y. Han // Tunnelling and Underground Space Technology. – 2022. – № 130. DOI: 10.1016/j.tust.2022.104766
18. Effect and influencing factors of the grouting on the horizontal deformation control / X. Cheng, J. Gao, J. Pan, R. Bai, G. Zheng // Tumu yu Huanjing Gongcheng Xuebao/Journal of Civil and Environmental Engineering. – 2022. – № 44(5). – P. 136–147. DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.027
19. Ground grouting stratum reinforcement technology for thick loose layer adjacent to existing shaft / X. Liu, R. Xu, Y. Zhao, H. Cheng, S. Peng, J. Zhou // Meitan Kexue Jishu/Coal Science and Technology (Peking). – 2022. – № 50(7). – P. 127–134. DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2020-1081
20. Ni J.-C., Cheng W.-C. Grout efficiency of lifting structure in soft clay // Geotechnical Special Publication. – 2009. – № 194. – P. 1–8. DOI: 10.1061/41046(353)1

## References

1. Kolybin I.V. Uroki avariynykh situatsiy pri stroitel'stve kotlovanov v gorodskikh usloviyakh [Lessons from urban excavation emergencies], *Razvitiye gorodov i geotekhnicheskoye stroitel'stvo: materialy mezhdunarodnogo tematicheskogo sbornika trudov*, Saint Petersburg, 2008, pp. 89-124.
2. Petrukhin, V.P., Shulyat'yev O.A., Mozgacheva O.A. Opyt proyektirovaniya i monitoringa podzemnoy chasti turetskogo torgovogo tsentra [Design and monitoring experience of the underground part of a Turkish shopping mall], *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov*, 2004, no. 5, pp. 2-8.

3. Petrukhin, V. P., Posphekhov V. S., Shulyat'yev O. A. Opyt proyektirovaniya i monitoringa glubokogo kotlovana [Design and monitoring experience of a deep excavation]. Sbornik nauchnykh trudov NIIOSP imeni N. M. Gersevanova. Moscow, EST, 2008, pp. 139-148.

4. Nefed'yeva A. K., Nefed'yev A. P., Bazhenov M. I., Aleksandrov A.V., Alekseyev V.A. Kompleksnyye resheniya pri primenenii tekhnologii kompensatsionnogo nagnetaniya [Integrated solutions in the application of compensatory injection technology], *Metro i tonneli*, 2020, no 3, pp.32-33.

5. Shulyat'yev, O. A., Mozgacheva O. A. Vertikal'nyy geotekhnicheskiy bar'yer po metodu kompensatsionnogo nagnetaniya [Vertical geotechnical barrier using the compensatory injection method], *Geotekhnicheskiye problemy stroitel'stva krupnomasshtabnykh i unikal'nykh ob'yektov: mezhdun. geotekhnicheskoy konferentsii*, Almaty, Kazakhstan, 2004, pp. 473-478.

6. Petrukhin V. P., Shulyat'yev O. A., Ibragimov M. N., Mozgacheva O. A. Sposob izmeneniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya gruntov osnovaniya [Method for changing the stress-strain state of foundation soils], *Vestnik NITS Stroitel'stvo*, 2014, no 10, pp 99-109.

7. Alekseyev V. A., Bazhenov M. I. Kompensatsionnoye nagnetaniye kak osnovnaya tekhnologiya v kachestve meropriyatiy po sokhrannosti zdaniy i sooruzheniy pri raschetnom prognoze sverkhnormativnykh osadok [Compensatory injection as a key technology as a measure for preserving buildings and structures - for predicting excessive settlement], *BST: Byulleten' stroitel'noy tekhniki*, 2021, no 7(1043), pp. 50-52.

8. Petrukhin V. P., Shulyat'yev O. A., Mozgacheva O. A. Proyektirovaniye i ustroystvo vertikal'nogo ili naklonnogo geotekhnicheskogo bar'yera metodom kompensatsionnogo nagnetaniya: Standart organizatsii. STO 36554501-007-2006 [Design and construction of a vertical or sloping geotechnical barrier by means of compensatory injection: organization standard. STO 36554501-007-2006], Moscow, FGUP «NITS «Stroitel'stvo», 2006, p. 26.

9. Shulyat'yev O.A., Ibragimov M.N., Mozgacheva O.A., Minakov D K. Eksperimental'nyye issledovaniya izmeneniya NDS grunta pri ustroystve geotekhnicheskogo bar'yera [Experimental investigation of changes in the ground deflection during the construction of a geotechnical barrier], *Vestnik NITS Stroitel'stvo*, 2014, no 10. pp 88-92.

10. Shulyat'yev, O. A. Izmeneniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya massiva grunta ili yego uplotneniye pri in'yektsiyakh [Changes in the stress-strain state of the soil mass or its compaction during injection], *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov*, 2016, no 3, pp 39-40.

11. Lubyagin A. V., Fedorov V. K. Modifikatsiya gruntovykh osnovaniy metodom kompensatsionnogo nagnetaniya [Modification of soil bases by compensatory injection method], *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov*, 2015, no 2, pp 28-31.

12. Prostov S. M., Gerasimov O. V., Nikulin N. YU. Rezul'taty issledovaniy svoystv glinistykh gruntov pri lokal'nom gidrorazryve i uplotnenii in'yektsiyey tsementno-peschanogo rastvora [Results of investigations of clayey soils properties at local hydraulic fracturing and compaction by injection of cement-sand mortar], *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov*, 2015, no 2, pp 16-21.

13. Razvodovskiy D. Ye., Kolybin I. V., Anisimov I. G., Fokin N. N. Obzor vozmozhnostey i perspektivy primeneniya nablyudatel'nogo metoda [Overview of possibilities and prospects for the application of the observation method], *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*, 2016, no 10, pp. 55-63.

14. Baranov A. K., Anisimov I. G., Fokin N. N. Primer primeneniya nablyudatel'nogo metoda pri proyektirovanii protivovariyynykh meropriyatiy [An example of the application of the

observation method in the design of disaster protection measures], *Vestnik NITS Stroitel'stvo*, 2017, no 2(13), pp. 6-15.

15. Polishchuk A.I., Semyonov I.V. Proyektirovaniye usileniya fundamentov rekonstruyemykh, vosstanavlivayemykh zdaniy s ispol'zovaniyem svay [Design of reinforcement offoundations of reconstructed, restored building using piles] // *Construction and Geotechnics*. - 2020. - T. 11. - №4. - C. 33-45. DOI: 10.15593/2224-9826/2020.4.03

16. Kalach F.N. Otsenka effektivnosti ispol'zovaniya tekhnologii in'yektsionnogo ukrepleniya slabykh gruntov v osnovanii fundamentov melkogo zalozheniya samorasshiryayushchimisya rastvorami [Performance evaluation of using injection reinforcement technology with self-expanding grout of soft soils at the sub-base of shallow foundations] // *Construction and Geotechnics*. - 2020. - T. 11. - №2. - C. 62-77. DOI: 10.15593/2224-9826/2020.2.06

17. Du, X., Liu, C., Wang, C., Fang, H., Xue, B., Gao, X., Han, Y. Diffusion characteristics and reinforcement effect of cement slurry on porous medium under dynamic water condition considering infiltration, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2022, no.130. DOI: 10.1016/j.tust.2022.104766

18. Cheng, X., Gao, J., Pan, J., Bai, R., Zheng, G. Effect and influencing factors of the grouting on the horizontal deformation control, *Tumu yu Huanjing Gongcheng Xuebao/Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2022, no 44(5), pp. 136-147. DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.027

19. Liu, X., Xu, R., Zhao, Y., Cheng, H., Peng, S., Zhou, J. Ground grouting stratum reinforcement technology for thick loose layer adjacent to existing shaft, *Meitan Kexue Jishu/Coal Science and Technology (Peking)*, 2022, no 50(7), pp. 127-134. DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2020-1081

20. Ni, J.-C., Cheng, W.-C. Grout efficiency of lifting structure in soft clay, *Geotechnical Special Publication*, 2009, no 194, pp. 1-8. DOI: 10.1061/41046(353)1