

# Расчет напряженно-деформированного состояния оснований фундаментов в процессе компенсационного нагнетания

УДК 624.15

Лузин И.Н.

Канд. техн. наук, доцент кафедры механики грунтов и геотехники, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (г. Москва); e-mail: LuzinIN@mgsu.ru

Статья получена: 01.03.2020. Рассмотрена: 05.03.2020. Одобрена: 24.03.2020. Опубликовано онлайн: 30.03.2020. ©РИОР

**Аннотация.** В настоящей статье рассматривается вопрос корректного расчета НДС оснований фундаментов в процессе компенсационного нагнетания. Показано, что численный расчет НДС можно выполнять в таком случае двумя методами — заданием гидростатического давления и заданием объемного расширения в кластере грунта. Выбор типа задания процесса нагнетания зависит от необходимых выходных данных расчета. На примере объекта в г. Москве показано применение расчетного комплекса *PLAXIS 3D* для расчета дополнительных осадок зданий при компенсационном нагнетании в процессе проходки тоннеля под ним. Приводится методика определения необходимого объема суспензии при компенсационном нагнетании с использованием численных методов расчета НДС.

**Ключевые слова:** компенсационное нагнетание, численное моделирование, метод конечных элементов, *PLAXIS 2D*, *PLAXIS 3D*, напряженно-деформированное состояние, тоннель, метрополитен, осадка окружающей застройки.

## Введение

Развитие современных городов создает необходимость улучшения транспортной доступ-

ности новых районов. Одним из путей улучшения является строительство новых станций и линий метрополитена. Однако при строительстве новых тоннелей в их зоне влияния зачастую возникают дополнительные осадки зданий. Они обусловлены технологическими особенностями: при проходке диаметр выработки незначительно превышает конечный диаметр тоннеля, что вызывает смещение грунта в районе выработки. Такой процесс иногда называют «перебором грунта» и учитывают в численных расчетах путем изменения диаметра тоннеля тем или иным образом. В некоторых случаях расчетная дополнительная осадка зданий в зоне влияния нового тоннеля превышает предельную дополнительную осадку по СП 22.13330.2016. В таких условиях возникает необходимость проведения дополнительных мероприятий по уменьшению дополнительной осадки окружающей застройки. Одним из таких методов является компенсационное нагнетание.

Компенсационное нагнетание является одним из наиболее эффективных методов защиты зданий и сооружений при строительстве подземных сооружений в их активной зоне [1–4]. Данный метод заключается в инъекции медленно твердеющего раствора на минераль-

## CALCULATION OF THE FOUNDATION SETTLEMENT DURING COMPENSATION GROUTING

Ivan Luzin

Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, Department of Soil Mechanics and Geotechnics, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow; e-mail: LuzinIN@mgsu.ru

**Manuscript received:** 01.03.2020. **Revised:** 05.03.2020. **Accepted:** 24.03.2020. **Published online:** 30.03.2020. ©RIOR

**Abstract.** The article presents the issue of correctly calculating the SSC of the foundation bases in the process of compensation

grouting. It is shown that the numerical calculation should be performed in two versions: hydrostatic pressure and rear volume strain in a cluster of soil. Using the example of an object in Moscow, the use of the *PLAXIS 3D* design complex was shown to calculate additional precipitation of buildings during compensation grouting and the passage of a tunnel under it. A method is given for determining the required volume of suspension during compensation grouting using numerical methods for calculating the SSC. **Keywords:** compensation grouting, numerical modeling, finite element method, *PLAXIS 2D*, *PLAXIS 3D*, strain-stress condition, tunnel, metro, surround buildings settlement.

ной основе в грунты основания здания или сооружения для компенсации или контроля его дополнительных осадок. Компенсационное нагнетание в основании зданий и сооружений производится в несколько этапов [5–7]:

- создание однородной «матрицы» укрепленного грунта путем инъекций в него специального состава;
- предварительное нагнетание суспензии для создания однородного напряженного состояния под всем сооружением, что позволяет в дальнейшем точно компенсировать осадки сооружения по мере необходимости;
- основной этап нагнетания суспензии с началом возведения подземного сооружения;
- нагнетание суспензии после окончания строительства до стабилизации осадок в основании здания или сооружения.

## Результаты исследования

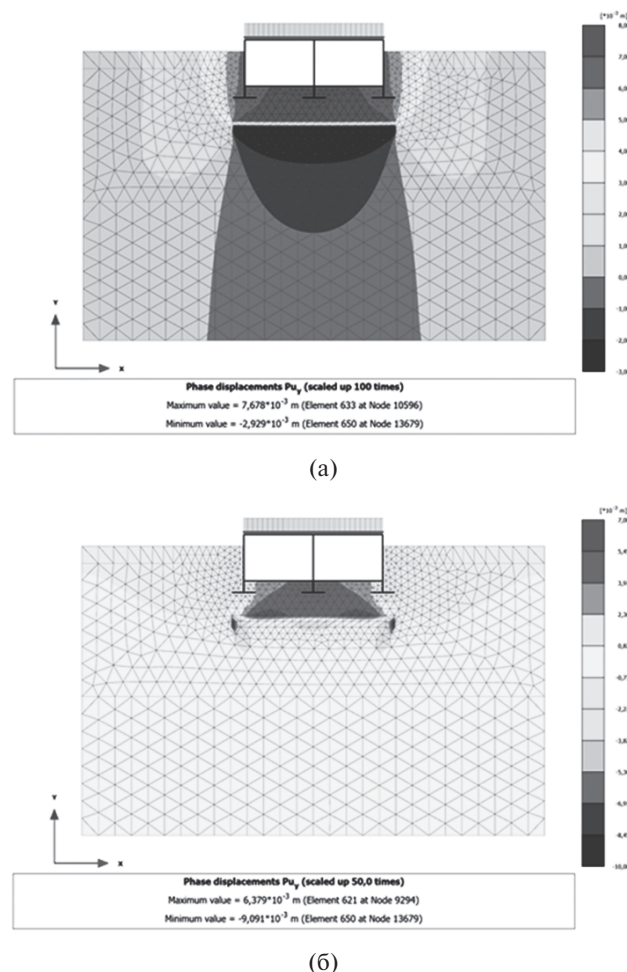
В процессе проходки тоннеля одновременно с компенсационным нагнетанием в грунте формируется сложное напряженно-деформированное состояние. Для расчета НДС в таком случае целесообразно пользоваться численными методами [8], в частности ПК *PLAXIS*, реализующим метод конечных элементов.

При расчете компенсационного нагнетания в ПК *PLAXIS* возникает вопрос корректного задания параметров нагнетания для расчета НДС. Двумя основными методами задания компенсационного нагнетания являются [9–11]:

- задание гидростатического давления, соответствующего давлению суспензии, внутри выделенного кластера;
- задание объемного расширения выделенному кластеру.

Выбор метода задания компенсационного нагнетания в модели должен исходить из необходимых выходных параметров расчета [12–14]. Так, например, при необходимости расчета дополнительной осадки при проходке тоннеля под зданием необходимо задавать компенсационное нагнетание гидростатическим давлением, а при определении необходимого объема суспензии — объемным расширением кластера. На рис. 1 приводится пример расчета дополнительных перемещений фундаментов

здания после окончания нагнетания суспензии. В первом случае (рис. 1, а) кластеру грунта было задано объемное расширение 2%, что соответствует нагнетанию суспензии объемом  $0,14 \text{ м}^3$ . Во втором случае (рис. 1, б) кластеру грунта задавалось гидростатическое давление 4 МПа, что соответствует стандартному давлению при компенсационном нагнетании при проведении компенсационного нагнетания под фундаментами зданий при строительстве подземных сооружений вблизи них. Из анализа рис. 1 видно, что дополнительные осадки в обоих случаях близки по значению.



**Рис. 1.** Пример использования ПК *PLAXIS 2D* для расчета дополнительных перемещений фундаментов при компенсационном нагнетании с заданием объемных деформаций кластера (а) и гидростатического давления внутри кластера (б)

Приведем пример расчета необходимого объема суспензии при проходке тоннеля в г. Москве под существующим зданием.

При проходке тоннеля диаметров 10,3 м под промышленным цехом возникла необходимость снижения расчетной дополнительной осадки. Цех представляет из себя здание с полным железобетонным каркасом. Категория технического состояния здания в целом характеризуется согласно ГОСТ 31937-2011 — как «работоспособное», а согласно Приложения Д СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений» — II «удовлетворительное». Следовательно, предельная дополнительная осадка данного здания составляет 3,0 см, а относительная разность осадок — 0,001. В ходе предварительных расчетов было обнаружено, что расчетная дополнительная осадка здания превышает нормативную, в связи с чем было принято решение о проведении компенсационного нагнетания в основании фундаментов здания. При этом перебор грунта задавался равным 1,8% по всей длине тоннеля. В связи с тем, что описываемое здание находится в плотной городской застройке, отсутствует возможность устройства технического котлована для проведения горизонтального бурения для инъекторов, поэтому для проведения компенсационного нагнетания была выбрана схема, показанная на рис. 2. Такая схема позволяет нагнетать суспензию в основание фундаментов и не требует дополнительных работ по откопке котлована для горизонтального бурения. Однако такая схема несколько снижает эффективность компенсационного нагнетания, в связи с чем требует большего расхода суспензии.

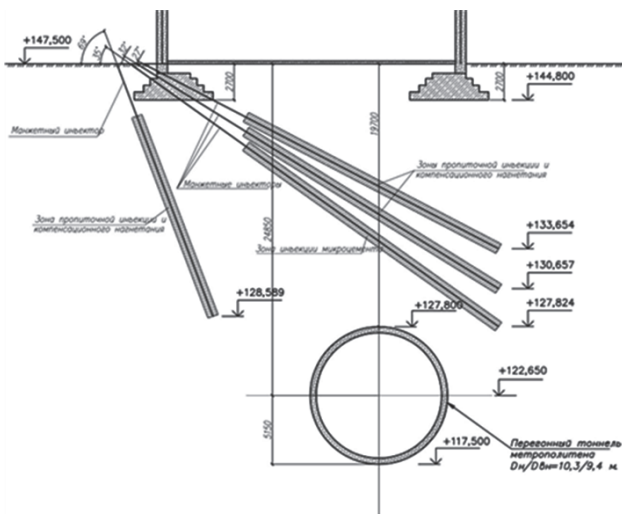


Рис. 2. Принципиальная схема производства работ по компенсационному нагнетанию

При расчете НДС системы «фундамент — компенсационный слой — тоннель» необходимо также учитывать взаимное расположение здания и тоннеля в плане, а также изменение глубины тоннеля относительно фундаментов здания. В том случае, если взаимное расположение тоннеля и здания как в плане, так и на разрезе можно принять параллельным, то для корректного расчета НДС системы можно считать достаточным двухмерный расчет сечения. Однако в данном случае следует производить расчет по нескольким сечениям, чтобы оценить влияние изменения геологических условий на расчетную осадку здания. В том случае, когда взаимное расположение здания и тоннеля отличается от параллельного, следует использовать пространственную постановку задачи.

В рассматриваемом случае была принята пространственная постановка задачи, так как тоннель имеет сложную форму, как в плане, так и на разрезе. На рис. 3 приводится план и разрез тоннеля.

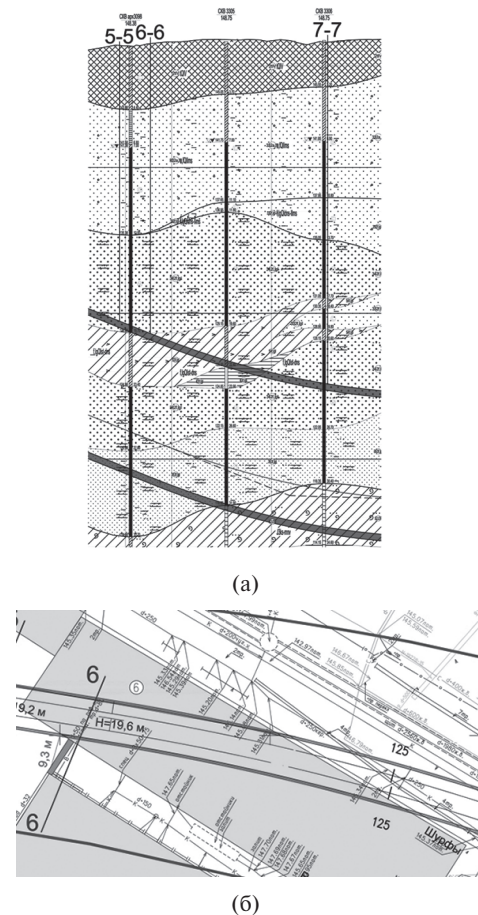


Рис. 3. Положение тоннеля на инженерно-геологическом разрезе (а) и в плане относительно рассматриваемого здания (б)



Основной задачей расчета являлось определение необходимого объема суспензии для компенсации осадок при проходке тоннеля под зданием, поэтому был выбран метод расчета с объемным расширением кластера. При построении конечно-элементной модели учитывалась неоднородность инженерно-геологических условий площадки, пространственная жесткость здания и этапность проходки тоннеля под зданием.

Для учета этапности и более корректного расчета объема суспензии при компенсационном нагнетании тоннель был поделен на 11 захваток. Расчет производился в несколько этапов с поочередным включением очередной захватки тоннеля и компенсационным нагнетанием для выравнивания осадок здания над ним. Необходимый объем нагнетаемой суспензии и, как следствие, необходимая доля объемного расширения определялись методом последовательных итераций. На рис. 4 приводится расчетная схема в пространственной постановке с учетом изменчивости инженерно-геологических условий площадки, изменением направления проходки тоннеля как в плане, так и по высоте, а также с учетом объемов грунта, задействованных при компенсационном нагнетании.

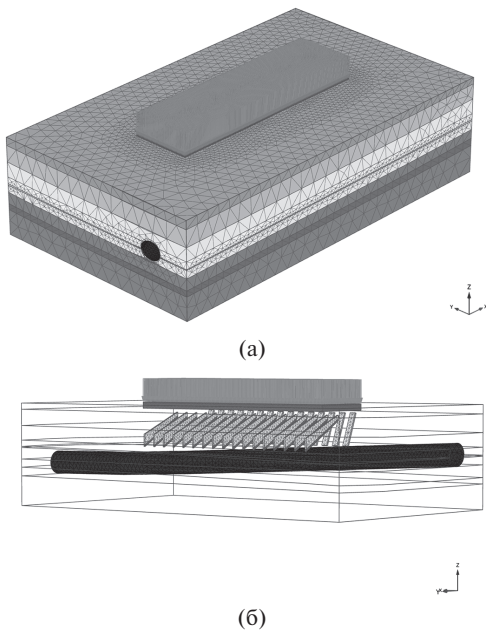


Рис. 4. Расчетная схема тоннеля и окружающей застройки с учетом инженерно-геологических условий (а) и с учетом схемы компенсационного нагнетания (б) (кластеры грунта отключены для наглядности)

Таким образом, в результате расчета были получены дополнительные деформации фундаментов здания при проходке тоннеля с учетом компенсационного нагнетания (рис. 5). Данные деформации не превышают предельно допустимых, поэтому метод компенсационного нагнетания можно считать эффективным с точки зрения предотвращения недопустимых деформаций. Также стоит отметить, что приведенный выше метод расчета дополнительных осадок фундаментов с учетом проходки тоннеля и компенсационного нагнетания позволил построить карту необходимого объема суспензии на каждом инжекторе (рис. 6). Из анализа рис. 6 видно, что на инжекторы, расположенные под большим углом к горизонту в основном не подается суспензия и не производится компенсационное нагнетание. Это связано с особенностями монтажа инжекторов и, как было упомянуто выше, их пониженной эффективностью.

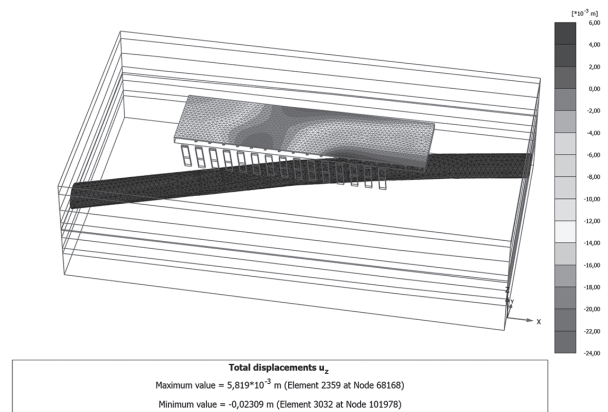


Рис. 5. Изополю дополнительных вертикальных перемещений здания после окончания проходки тоннеля и компенсационного нагнетания, мм

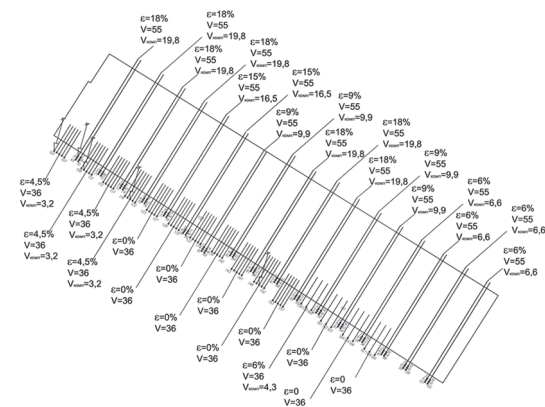


Рис. 6. Необходимый объем суспензии на каждом инжекторе

## Выводы

1. При строительстве подземных сооружений и тоннелей в плотной городской застройке следует проводить предварительные расчеты осадок окружающей застройки. При превышении расчетных осадок предельно допустимых значений, следует предусмотреть дополнительные меры защиты зданий и сооружений.
2. Метод компенсационного нагнетания является эффективным методом по предотвращению недопустимых осадок окружающей

застройки. Однако при численных расчетах требуется корректное задание всех параметров компенсационного нагнетания для удовлетворительной точности расчета.

3. Численные методы, в том числе метод конечных элементов, позволяют определить дополнительные деформации зданий и сооружений при проходке тоннелей под их фундаментами, а также при проведении компенсационного нагнетания. Важным преимуществом данных методов является возможность определения объема суспензии, необходимой для компенсационного нагнетания.

## Литература

1. Валет Ж.-Л. Компенсационное нагнетание: технология в реальном времени [Текст] / Ж.-Л. Валет // Метро и тоннели. — 2002. — № 4. — С. 16–19.
2. Зерцалов М.Г. Технология компенсационного нагнетания для защиты зданий и сооружений [Текст] / М.Г. Зерцалов, А.Н. Симутин, А.В. Александров // Вестник МГСУ. — 2015. — № 6. — С. 32–40.
3. Schweiger H.F., Falk E. Reduction of settlements by compensation grouting — Numerical studies and experience from Lisbon underground // Tunnels and Metropolises. Balkema, Rotterdam, 1998. Pp. 1047–1052.
4. Knitsch H. Visualization of relevant data for compensation grouting // Tunnel. 2008. No. 3. Pp. 38–45.
5. Маковский Л.В. Определение параметров компенсационного нагнетания при строительстве тоннелей в сложных градостроительных условиях [Текст] / Л.В. Маковский, В.В. Кравченко // Проектирование автомобильных дорог: сб. науч. тр. — М.: Изд-во МАДИ (ГТУ), 2009. — С. 119–124.
6. Маковский Л.В. Ограничение осадок поверхности земли путем компенсационного нагнетания при строительстве тоннелей закрытым способом [Текст] / Л.В. Маковский, С.В. Чеботарев // Транспорт: наука, техника, управление. — 2000. — № 2. — С. 44–47.
7. Bezuijen A., Tol F. van. Compensation grouting in sand, fractures and compaction // Proceedings of the 14th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Rotterdam, 2007. Pp. 1257–1262.
8. Burland J.B., Standing J.R., Jardine F.M. Building response to tunneling. Case studies from construction of the jubilee line extension. London, 2001. Pp. 134–145.
9. Pleithner M., Bernatzik W. A new method of compensating settlement of buildings by injections of cement grout. 1953.
10. Telford T. Sprayed concrete linings (NATM) for tunnels in soft ground. London, 2004. Pp. 10–12.
11. Vanuvamalai A., Jaya K.P. Design analysis of an underground tunnel in Tamilnadu // Archives of civil engineering. 2018. Vol. 64. Pp. 21–39.
12. Yao Y., Lu N., Yang Y., Cao Y., Yu H. Study of long-termed displacements of a tunnel boring machine during its stoppage // Tunnelling and underground space technology. 2019. Vol. 84. Pp. 432–439.
13. Chen K., Peng F. An improved method to calculate the vertical earth pressure for deep shield tunnel in Shanghai soil layers // Tunnelling and underground space technology. 2018. Vol. 75. Pp. 43–66.
14. Mitew-Czajewska M. A study of displacements of structures in the vicinity of deep excavation // Archives of civil engineering. 2019. Vol. 19. Pp. 547–556.

## References

1. Valet Zh.-L. Kompensatsionnoe nagnetanie: tekhnologiya v real'nom vremeni [Compensation grouting: the real-time technology]. Metro i tonneli [Metro and tunnels]. 2002, I. 4, pp. 16–19.
2. Zertsalov M.G., Simutin A.N., Aleksandrov A.V. Tekhnologiya kompensatsionnogo nagnetaniya dlya zashchity zdaniy i sooruzheniy [Compensation grouting technology for the buildings and constructions protection] Vestnik MGSU [Bulletin of MSUCE]. 2015, I. 6, pp. 32–40.
3. Schweiger H.F., Falk E. Reduction of settlements by compensation grouting — Numerical studies and experience from Lisbon underground // Tunnels and Metropolises. Balkema, Rotterdam, 1998. Pp. 1047–1052.
4. Knitsch H. Visualization of relevant data for compensation grouting // Tunnel. 2008. No. 3. Pp. 38–45.
5. Makovskiy L.V., Kravchenko V.V. Opredelenie parametrov kompensatsionnogo nagnetaniya pri stroitel'stve tonneley v slozhnykh gradostroitel'nykh usloviyakh [Determination of the compensation grouting parameters during construction in difficult city conditions]. Proektirovanie avtomobil'nykh dorog [Car roads design]. Moscow: MADI (GTU) Publ., 2009, pp. 119–124.
6. Makovskiy L.V., Chebotarev S.V. Ogranichenie osadok poverkhnosti zemli putem kompensatsionnogo nagnetaniya pri stroitel'stve tonneley zakryтым sposobom [Limitation of the ground surface settlement with compensation grouting during tunnel construction by closed method]. Transport: nauka, tekhnika, upravlenie [Transport: science, equipment, control]. 2000, I. 2, pp. 44–47.
7. Bezuijen A., Tol F. van. Compensation grouting in sand, fractures and compaction // Proceedings of the 14th European

- Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Rotterdam, 2007. Pp. 1257–1262.
8. Burland J.B., Standing J.R., Jardine F.M. Building response to tunneling. Case studies from construction of the jubilee line extension. London, 2001. Pp. 134–145.
  9. Pleithner M., Bernatzik W. A new method of compensating settlement of buildings by injections of cement grout. 1953.
  10. Telford T. Sprayed concrete linings (NATM) for tunnels in soft ground. London, 2004. Pp. 10–12.
  11. Vanuvamalai A., Jaya K.P. Design analysis of an underground tunnel in Tamilnadu // Archives of civil engineering. 2018. Vol. 64. Pp. 21–39.
  12. Yao Y., Lu N., Yang Y., Cao Y., Yu H. Study of long-termed displacements of a tunnel boring machine during its stoppage // Tunnelling and underground space technology. 2019. Vol. 84. Pp. 432–439.
  13. Chen K., Peng F. An improved method to calculate the vertical earth pressure for deep shield tunnel in Shanghai soil layers // Tunnelling and underground space technology. 2018. Vol. 75. Pp. 43–66.
  14. Mitew-Czajewska M. A study of displacements of structures in the vicinity of deep excavation // Archives of civil engineering. 2019. Vol. 19. Pp. 547–556.