



Research Article




Received: December 20, 2024

Accepted: January 3, 2024

Published: January 11, 2025

ISSN 2304-6295

Mechanical safety of buildings and structures during underground construction of linear objects in complex geotechnical conditions

Sorokin, Vladislav Vitalievich¹ 
Konyushkov, Vladimir Viktorovich^{1*}
Sebkhaoui, Ahmed Amine¹ 
Perminov, Nikolai Alexeyevich² 

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation; vladislavs2018@mail.ru (S.V.V.); konyushkov_vv@spbstu.ru (K.V.V.); sebhau.a@edu.spbstu.ru (S.A.A.)

² Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, St. Petersburg, Russian Federation; perminov-n@mail.ru (P.N.A.)

Correspondence: * email vladislavs2018@mail.ru; contact phone [+79819460938](tel:+79819460938)

Keywords:

Buildings and structures; Underground construction; Safety; Dense buildings; Shield tunneling; Stress-strain behavior; Tunnels; Finite element method

Abstract:

The object of the research is an existing brick building under which a sloped metro tunnel is being constructed. **Method.** The influence of tunnel boring machine (TBM) excavation on the stress-strain state of the building's structural elements was investigated using numerical finite element modeling. The construction site is composed of weak, water-saturated soils. The problem was solved in a three-dimensional formulation. **Results.** The values of additional foundation settlements and stresses in the building structures were determined. The obtained settlement values were compared with field data from geodetic monitoring. Zones of maximum tensile stresses in the masonry were identified. Based on the building's technical survey data, the most vulnerable defective floor structure was selected. Based on the probabilistic method for assessing the structural safety of buildings, the limit values of forces for the most defective structure were determined, which are used to assign the type of technical condition of the building under consideration.

1 Introduction

Активное освоение подземного пространства на территориях с плотной застройкой в большинстве случаев является причиной аварий. В мегаполисах стремительно строятся объекты для прокладки коммуникаций, а также линии метрополитена [1]. Наибольшую опасность для зданий и сооружений при подземных выработках вблизи них представляют величины максимальных дополнительных осадок и относительных неравномерностей осадок их оснований. При оценке воздействия при новом строительстве и реконструкции на объекты сложившейся застройки [2, 3] контролируются следующие параметры: напряженно-деформированное состояние грунтов оснований и строительных конструкций; технологии и условия производства работ; гидрологический режим на площадке строительства и др.

Объектом исследования является эксплуатируемое здание. Предметом исследования является конструкционная безопасность эксплуатируемого здания.

Цель работы заключается в оценке влияния строительства тоннеля метро на механическую безопасность эксплуатируемого здания.

Sorokin, V.; Konyushkov, V.; Sebkhaoui, A.; Perminov, N.

Mechanical safety of buildings and structures during underground construction of linear objects in complex geotechnical conditions;

2025; *Construction of Unique Buildings and Structures*; **115** Article No 11503. doi: 10.4123/CUBS.115.3



Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: проанализировать влияние расположения выработки по отношению к зданию на НДС его основных несущих конструкций; определить дополнительные деформации основания здания при проходке тоннеля и усилия в несущих конструкциях в ходе совместного расчета системы «основание-фундамент-сооружение»; сопоставить результаты численного моделирования дополнительных осадок с данными геодезического мониторинга.

Для корректной оценки напряженно-деформированного состояния зданий и сооружений при подземном строительстве вблизи них необходимо проводить совместные расчеты зданий с грунтовым массивом [4]. Большинство зданий существующей застройки имеют бескаркасную [5] и каркасную [6] конструктивные схемы, реже встречаются комбинированные или иные. Важно отметить, что при численном моделировании зданий целесообразно использовать нелинейные схемы работы грунтов и материалов конструкций зданий [7]. Применение нелинейных моделей наиболее точно отражает действительную работу грунтов и конструкций [8, 9].

Зависимость расположения выработок по отношению к зданиям на их напряженно-деформированное состояние рассматривалось в работах [10,11]. Поведение каменной кладки эксплуатируемых зданий при строительстве подземных сооружений оценивалось в исследованиях [12–16]. При моделировании конструкций зданий важно учитывать условия их сопряжения [17–19] для оценки соответствия результатов численного моделирования натурным данным [20].

К факторам, влияющим на вероятность возникновения аварий, прежде всего, относятся инженерно-геологические [22, 23] и гидрогеологические условия площадки строительства [21, 24], технология ведения работ [25], уровень сложности объекта. Таким образом, обеспечение безопасности зданий и сооружений, попадающих в зону влияния подземного строительства, является первостепенной задачей инженеров. Исследования в области оценки безопасности конструкций описаны в работах [26 – 31].

Научная новизна данной работы заключается в определении силовых факторов, возникающих в конкретных, наиболее подверженных риску конструкциях, в результате технологических осадок основания. При этом используются нелинейные схемы работы материалов грунта и кирпичной кладки. Результаты исследования демонстрируют сходимость численного решения с натурными данными мониторинга. Предполагается, что результаты исследования будут ориентиром для инженеров, занимающихся геотехническими расчетами при оценке влияния проведения земляных работ в стесненных городских условиях.

2 Materials and Methods

В работе рассматривается эксплуатируемое административное здание, под которым ведется строительство наклонного хода метрополитена. Здание построено по бескаркасной схеме и имеет четыре этажа. Ленточный фундамент выполнен из бутового камня. Несущие стены выполнены из керамического полнотелого кирпича. Перекрытия толщиной $h = 0.2$ м выполнены из монолитного железобетона. По результатам технического обследования класс прочности бетона плит перекрытий соответствует В20, рабочая арматура – d16 класс А400, шаг 200 мм. План типового этажа, разрез и фасад представлены на рис. 1.

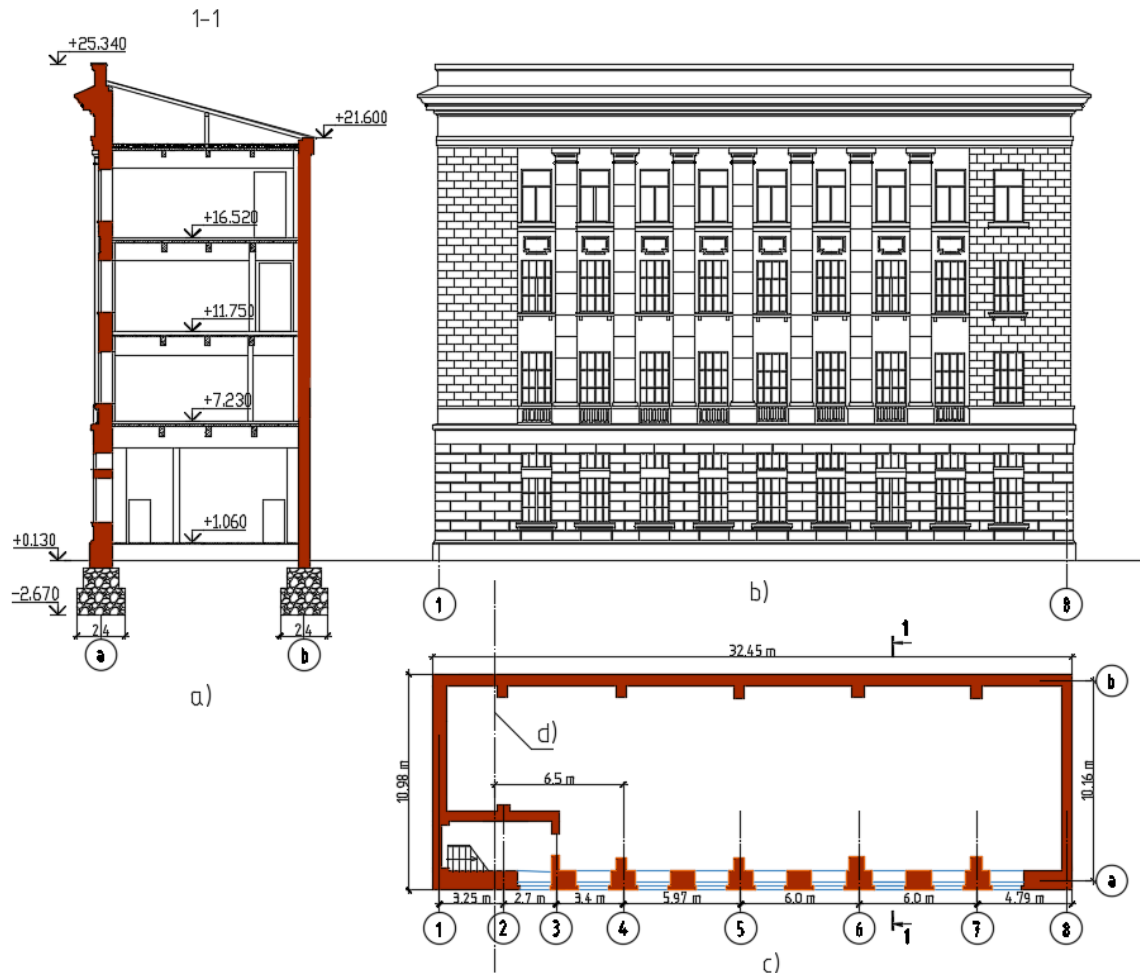


Fig. 1 - Administration building: cross plan 1-1 (a); face of the building (b); building plan (c); inclined tunnel centerline (d)

Проходка эскалаторного тоннеля под углом 30 градусов осуществляется тоннелепроходческим механизированным комплексом из стартового котлована диаметром 23 м. Ограждение котлована выполнено из железобетонных стен и поперечных диафрагм для рельсовых путей мостового крана. Обделка тоннеля выполняется из сборных железобетонных блоков шириной 1.0 м толщиной 0.4 м. Наружный диаметр наклонного хода – 10.5 м. В месте пересечения оси тоннеля со зданием глубина заложения шельги свода составляет 26 м.

Инженерно-геологические условия площадки строительства до глубины порядка 30 метров сложены водонасыщенными четвертичными отложениями. Физико-механические характеристики грунтов представлены в табл. 1.

Table 1. Physical and mechanical properties of soils

№ ИГЭ	Наименование грунта	Мощность слоя Н, м	Удельный вес грунта γ , кН/м ³	Модуль деформации грунта Е, МПа	Угол внутреннего трения φ , град.	Удельное сцепление c , кПа	Число текучести I _L . д.е.
1	Пески с мусором	2.9	21	14	29	2	–
2	Пески пылеватые	1.8	20.4	23	32	5	–
3	Пески с супесью	1.2	19.8	15	28	3	–
4	Суглинки легкие текучие	3.0	19.6	6	9	11	1.06
5	Суглинки текучие	3.1	18.3	5	6	8	1.18
6	Суглинки текучепластичные	1.4	19.2	7	11	12	0.86
7	Супеси пластичные	2.0	21.6	10	15	12	0.50

Sorokin, V.; Konyushkov, V.; Sebkhauoi, A.; Perminov, N.

Mechanical safety of buildings and structures during underground construction of linear objects in complex geotechnical conditions;

2025; *Construction of Unique Buildings and Structures*; **115** Article No 11503. doi: 10.4123/CUBS.115.3

8.1	Суглинки тугопластичные	5.4	20.7	13	16	18	0.39
8.2	Суглинки полутвердые	1.9	20.8	16	18	26	0.15
9	Супеси твердые	2.3	21.6	23	23	35	-0.17
10	Супеси твердые с гравием	1.1	20.8	22	27	50	-0.17
11	Глины твердые	13.5	21.6	35	21	80	-0.62

Для выявления механизма деформаций и повреждений эксплуатируемого здания построена объемная конечно-элементная модель. Для исключения краевых эффектов размеры расчетной области приняты равными 127 м вдоль здания, 70 м вдоль направления проходки тоннеля и 83 по глубине. Конструкции здания и тоннеля, а также инженерно-геологическое напластование моделировались трехмерными конечными элементами.

Работа грунта на контакте с конструкциями моделируется с помощью понижающих интерфейсных коэффициентов R_{int} . Эти коэффициенты отражают снижение величин прочностных характеристик грунтов вследствие технологических воздействий. Значения данных коэффициентов зависят от грунта, материала ограждающей конструкции, метода ее возведения и т.д. и определяются по справочным данным. Для бетонных и железобетонных конструкций $R_{int}=0.67$. Общий вид конечно-элементной модели грунтового массива, здания и тоннеля представлен на рис. 2.

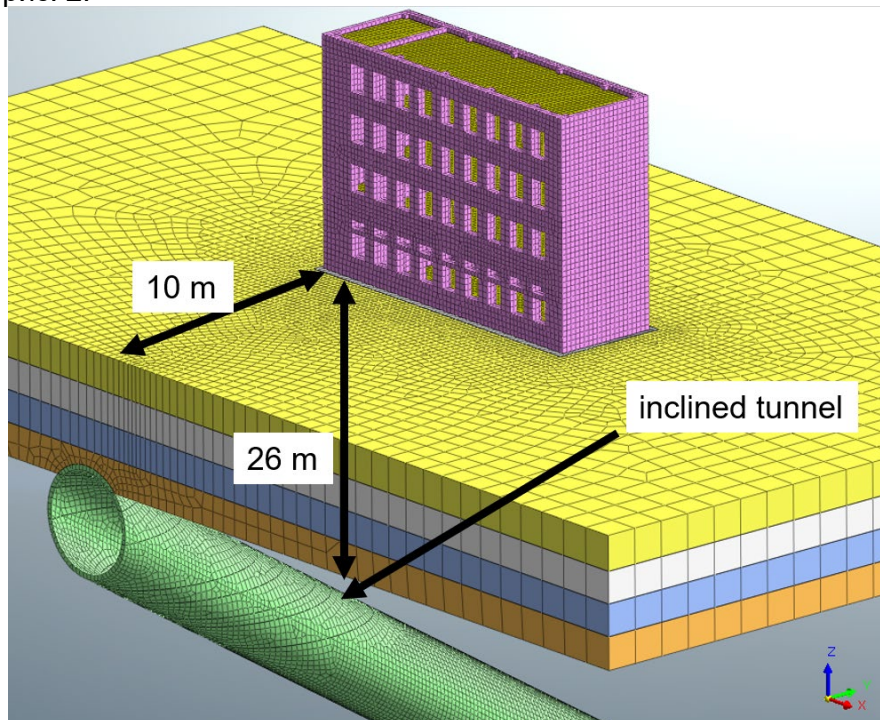


Fig. 2 - General view of the numerical finite element model

Расчет дополнительных осадок проводился по следующим этапам:

- 1) вычисление природных напряжений массива грунта;
- 2) обнуление перемещений, активация окружающей застройки;
- 3) поэтапная проходка наклонного хода.

Российскими нормами безопасность существующей застройки гарантируется ограничением максимальных дополнительных осадок (1) и их относительных разностей (крен) (2) предельными значениями:

$$\sum_{i=0}^n S_{ad}^i \leq S_{ad,u}, \quad (1)$$

где S_{ad}^i – величина добавочных деформаций окружающих конструкций из-за влияния i -й группы факторов на основание; S_{ad}^0 – деформации от предшествующих воздействий при нестабилизированном состоянии основания;

Sorokin, V.; Konyushkov, V.; Sebkhauoi, A.; Perminov, N.

Mechanical safety of buildings and structures during underground construction of linear objects in complex geotechnical conditions;

2025; *Construction of Unique Buildings and Structures*; **115** Article No 11503. doi: 10.4123/CUBS.115.3

$$\Delta S_{ad}^i / L \leq (\Delta S / L)_u, \quad (2)$$

где ΔS_{ad}^i – величина относительных разностей добавочных деформаций окружающих конструкций из-за влияния i -й группы факторов на основание; L – минимальное расстояние между фундаментами соседнего здания.

При этом предельные значения необходимо вычислять для конкретного здания или сооружения при фактическом НДС их конструкций при совместном расчете с основанием. Полученные значения гарантируют сохранность конструкций существующих строений при развитии добавочных деформаций. Наряду с перечисленными основными критериями для оценки геотехнической ситуации применяются косвенные: контроль уровня подземных вод, уровня колебаний грунта.

3 Results and Discussion

По результатам технического обследования основных несущих конструкций здания наиболее дефектной оказалась конструкция плиты перекрытия в уровне четвертого этажа. Причинами возникновения данных дефектов послужили систематические протечки кровли, а также пробивки отверстий в плите перекрытия без проведения защитных мероприятий против коррозии рабочей арматуры. Несущие кирпичные стены и фундамент по результатам обследования находились в удовлетворительном состоянии. Таким образом, при оценке воздействия строительства наклонного хода метрополитена основное внимание уделяется наиболее уязвимой конструкции, то есть плите перекрытия четвертого этажа.

Пролет рассматриваемой плиты перекрытия составляет 6.0 м. Расчетная нагрузка на 1 погонный метр перекрытия на стадии эксплуатации составила 10 кН/м. Плита шарнирно опирается по обеим сторонам. Следовательно, изгибающий момент в середине пролета $M_0 = (10 \times 6^2) / 8 = 45$ кНм.

Сравнивая результаты численного расчета на рис. 3 с данными геодезического мониторинга на рис. 4, можно сделать вывод о приемлемой сходимости результатов. Погрешность составила 10%.

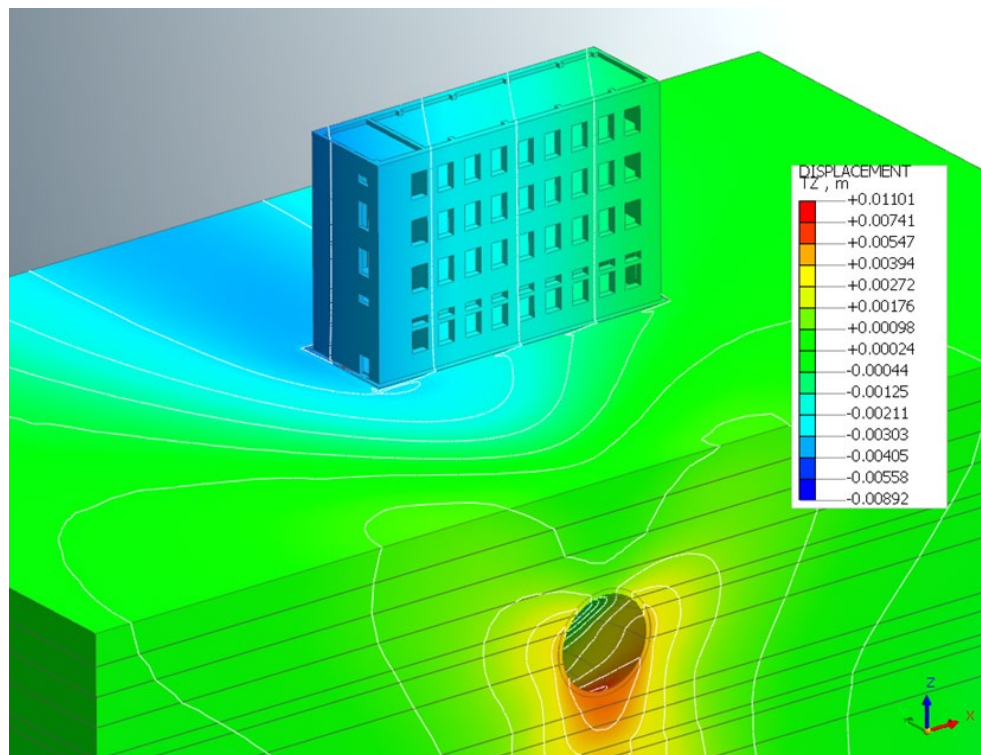


Fig. 3 - Results of numerical modeling. Settlements of the foundation

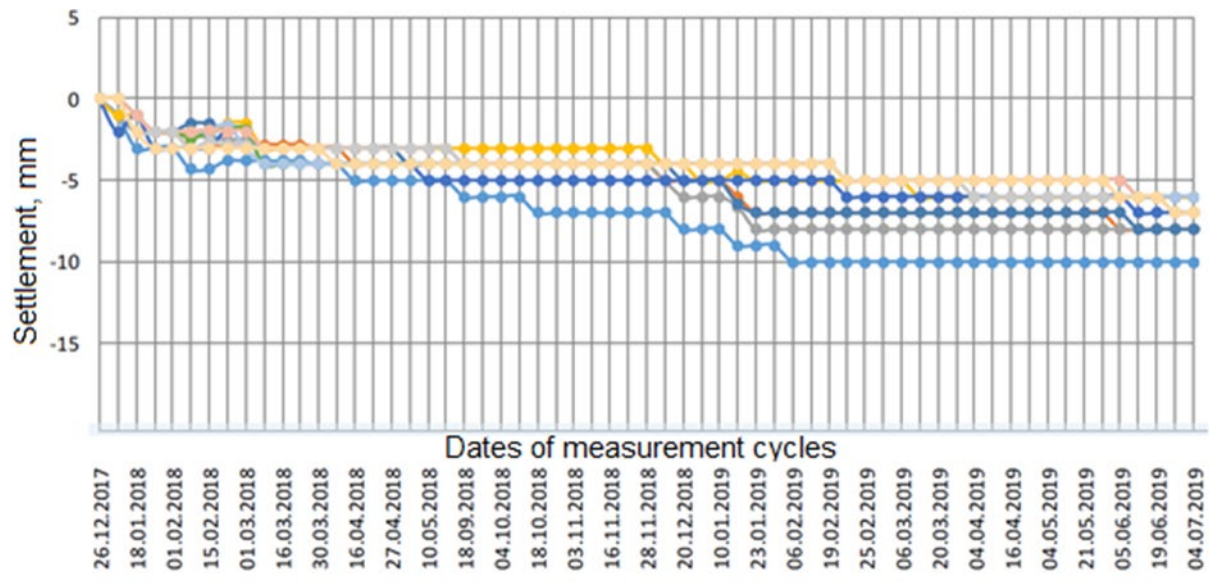


Fig. 4 - Results of geotechnical monitoring. Development of surface grades sedimentation in time

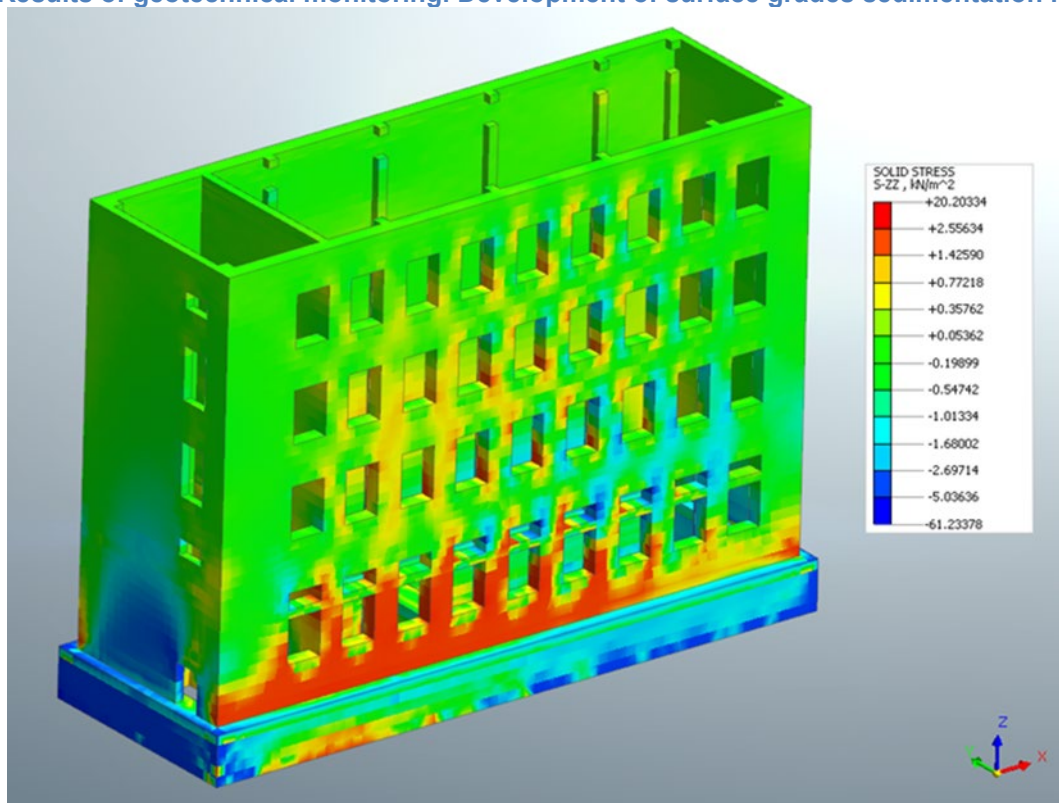


Fig. 5 - Additional stresses in brickwork based on numerical calculation results. Areas of potential cracking are highlighted in red color

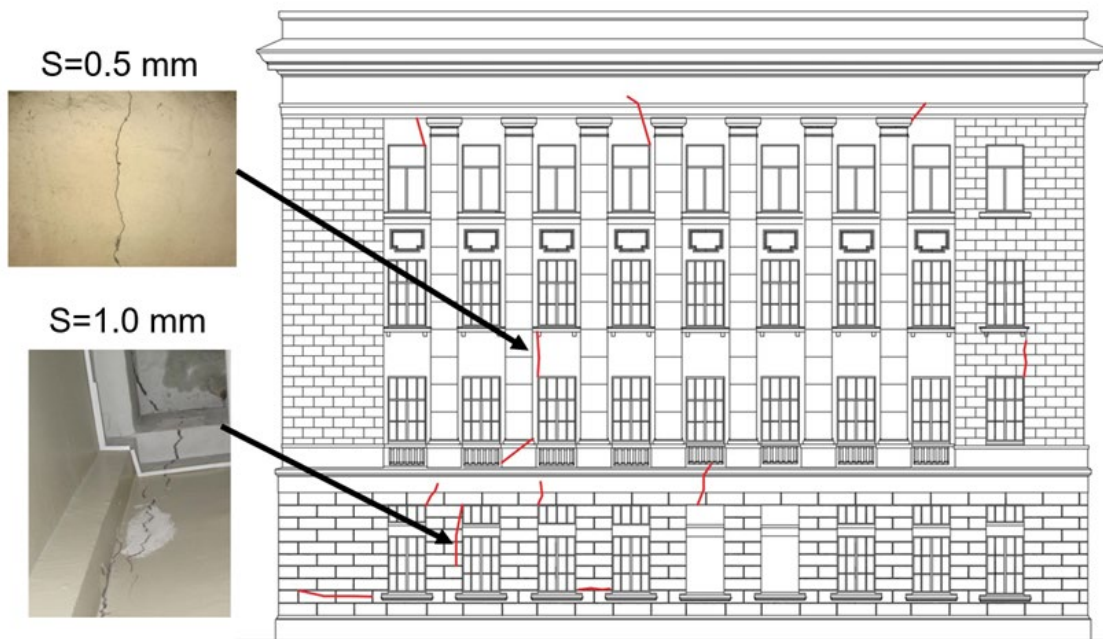


Fig. 6 - Defect map based on the results of the technical inspection. Cracks on the facade

По результатам численного моделирования выявлены зоны с дополнительными растягивающими напряжениями в кирпичной кладке (рис. 5), в которых образуются трещины. Данные результаты согласуются с результатами технического обследования здания (рис. 6).

На рис. 7 изображены изополя дополнительных напряжений в плитах перекрытий. Максимальное значение в плите перекрытия 4 этажа составило 400 кПа. Момент сопротивления сечения плиты $W=0.0067 \text{ м}^3$. Таким образом, приращение изгибающего момента $\Delta M=400 \times 0.0067=2.68 \text{ кНм}$. Итоговое значение изгибающего момента $M_{\text{и}}$ в наиболее дефектной плите составляет 47.68 кНм. Предельное значение изгибающего момента M_{ult} для рассматриваемой плиты равно 75.6 кНм.

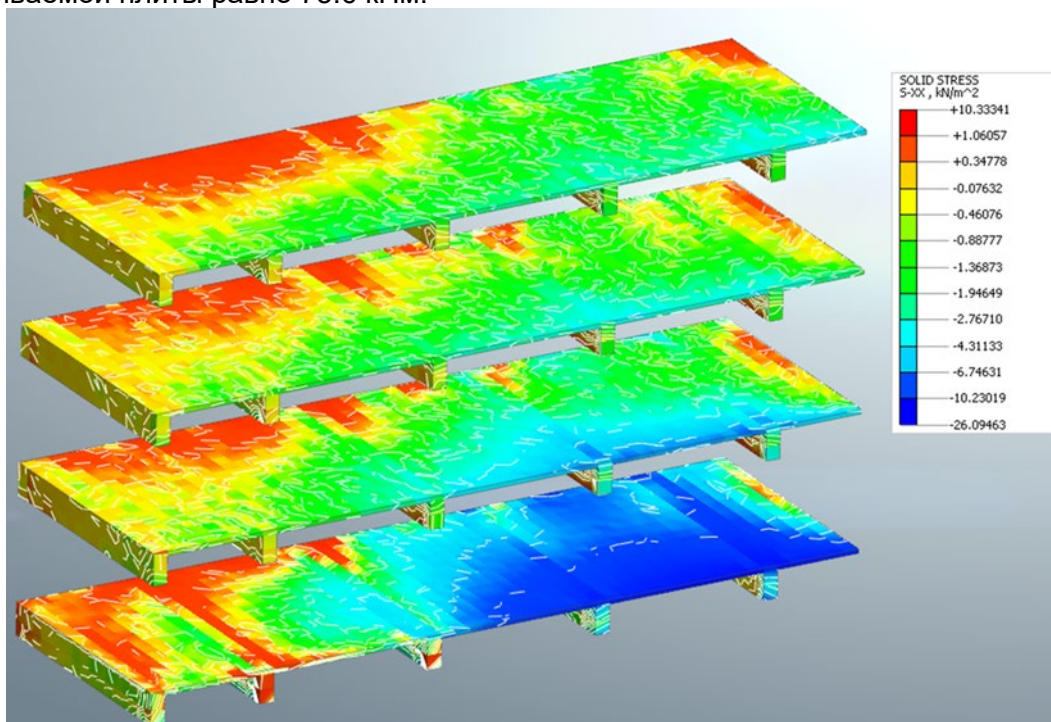


Fig. 7 - Additional stresses in floor slabs based on numerical calculation results

На основании зависимости, связывающей величину конструктивного износа со средним значением риска аварии здания, при определенных пороговых значениях риска [32] можно представить модель деградации через силовой фактор – изгибающий момент (рис. 8).

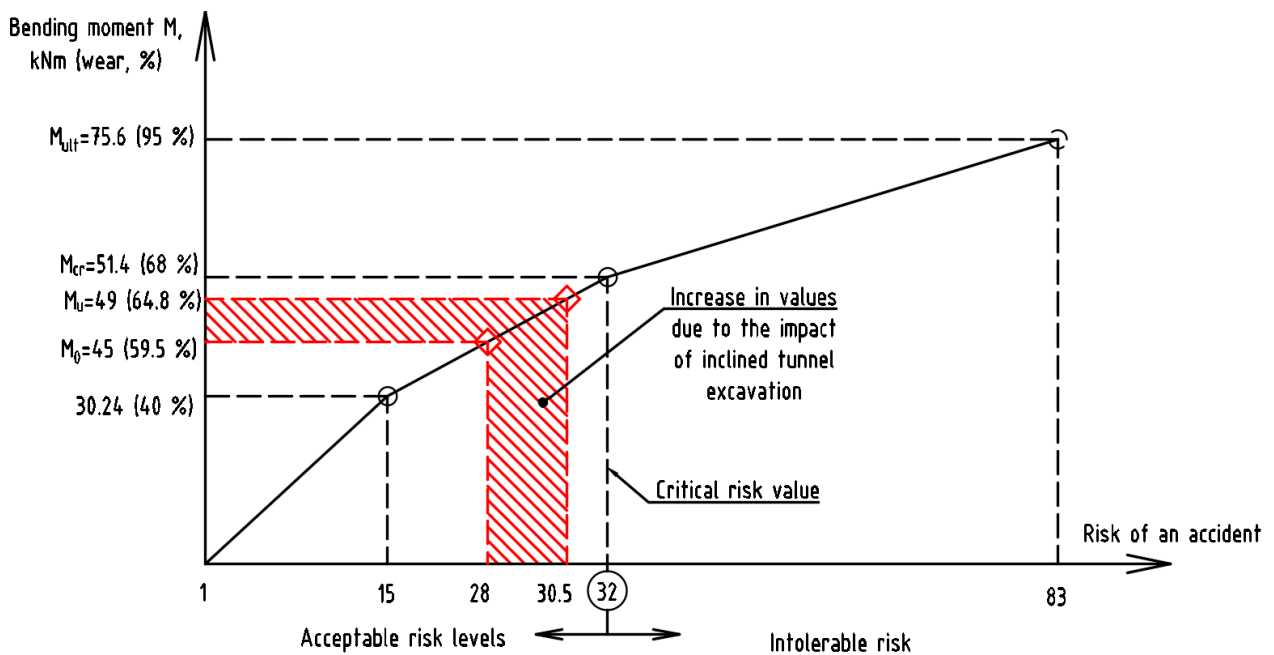


Fig. 8 - Interpreted slab structure degradation model

Таким образом, в результате проходки тоннеля внутренние усилия в наиболее дефектной конструкции (плите перекрытия 4 этажа) увеличились практически на 5%, что не приводит к переходу здания в качественно иное техническое состояние – из ограниченно работоспособного в недопустимое. В качестве меры по снижению риска аварии необходимо провести текущий ремонт.

По сравнению с железобетонными кирпичные здания более чувствительны к неравномерным деформациям основания ввиду их меньшей прочности и жесткости. Характер разрушений во многом зависит от расположения выработки по отношению к рассматриваемому зданию. В результате неравномерной осадки при проходке наклонного хода метрополитена под частью здания наблюдается характерный вид деформации – раскрытие «веером вверх». при этом возникают трещины по наиболее слабым сечениям – оконным и дверным проемам. Возможными вариантами снижения влияния на деформации здания могут быть корректировка траектории оси тоннеля по отношению к зданию или превентивные компенсационные меры (усиление грунтов основания).

4 Conclusions

Значительное количество разрушений существующих зданий происходит при ведении строительства и реконструкции рядом с ними. В условиях плотной городской застройки дополнительным деформациям оснований зданий предъявляются строгие требования. Необходимо обеспечить безопасное ведение работ, исключить риски возникновения аварийных ситуаций.

На общую величину дополнительной осадки влияют процессы уплотнения грунтов, изменения гидрогеологических условий на территории строительства и различные техногенные воздействия при строительстве и реконструкции. Наибольшую опасность для конструкций окружающей застройки представляют применяемые технологии производства работ. Поэтому при проектировании необходимо принимать наиболее безопасные технологии. При необходимости нужно разрабатывать защитные мероприятия.

1. Для корректной оценки НДС конструкций зданий и грунтов применены нелинейные модели работы материалов. Максимальные осадки грунта коррелируют с натурными значениями геодезического мониторинга.

Sorokin, V.; Konyushkov, V.; Sebkhauoi, A.; Perminov, N.

Mechanical safety of buildings and structures during underground construction of linear objects in complex geotechnical conditions;

2025; *Construction of Unique Buildings and Structures*; **115** Article No 11503. doi: 10.4123/CUBS.115.3



2. Величины дополнительных внутренних усилий оказались в пределах допустимых значений риска возникновения аварии, определенных по вероятностной методике [32].

3. Техническое состояние здания признано ограниченно работоспособным, в качестве меры снижения риска возникновения аварии предложено проведение ремонтных работ.

References

- 1 Burd, H., Yiu, W.N. and Martin, C.M. (2021) Influence of Masonry Building Characteristics on Tunnel-Induced Building Damage. Lecture Notes in Civil Engineering. https://doi.org/10.1007/978-3-030-64518-2_19.
- 2 Garcia, A.J., González-Rodrigo, B., Martínez, S., Martínez, R. and Marchamalo, M. (2021) Building Health Monitoring in the Old Town of Madrid: Applicability of SAR Imagery to the Monitoring of Underground Works through Classification Indexes. *International Journal of Digital Earth*, **14**. <https://doi.org/10.1080/17538947.2020.1815878>.
- 3 Li, Z., Han, M., Liu, L., Li, Y. and Yan, S. (2020) Corner and Partition Wall Effects on the Settlement of a Historical Building near a Supported Subway Excavation in Soft Soil. *Computers and Geotechnics*, **128**. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2020.103805>.
- 4 Hong, X., Zhang, D., Zhou, M., Fang, Q., Hou, Y., Fang, H. and Sun, Z. (2022) Approximate Analytical Solution of Tunneling-Induced Responses of a Soil–Foundation System Using Contact Mechanics. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, **46**. <https://doi.org/10.1002/nag.3457>.
- 5 Gulen, D.B., Acikgoz, S. and Burd, H.J. (2022) A Macro-Element Model for the Assessment of Tunnelling-Induced Damage to Masonry Buildings. Geotechnical Engineering for the Preservation of Monuments and Historic Sites III - Proceedings of the 3rd International Issmge TC301 Symposium, 2022, CRC Press/Balkema, 1026–1038. <https://doi.org/10.1201/9781003308867-80>.
- 6 Shrestha, J.K., Bhandari, S., Pradhan, S. and Gautam, D. (2020) Simplified Frame Model for Capacity Assessment of Masonry Buildings. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Elsevier Ltd, **131**. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106056>.
- 7 El Kahi, E., Hung, V., Bohal, Y., Mehdizadeh, R., Khouri, M., Deck, O. and Rahme, P. (2020) Influence of Equivalent Stiffness on the Behavior of Buildings Subjected to Soil Settlements. Proceedings of the 29th European Safety and Reliability Conference, ESREL 2019. https://doi.org/10.3850/978-981-11-2724-3_0720-cd.
- 8 Acikgoz, S., Franza, A., DeJong, M.J. and Mair, R. (2021) Cracked Equivalent Beam Models for Assessing Tunneling-Induced Damage in Masonry Buildings. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **147**. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0002443](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0002443).
- 9 Gulen, D.B., Acikgoz, S. and Burd, H.J. (2021) Equivalent Frame Model for the Assessment of Tunnel-Induced Damage to Masonry Buildings. Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground - Proceedings of the 10th International Symposium on Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, IS-CAMBRIDGE 2022. <https://doi.org/10.1201/9780429321559-71>.
- 10 Bilotta, E., Paolillo, A., Russo, G. and Aversa, S. (2017) Displacements Induced by Tunnelling under a Historical Building. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **61**. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2016.10.007>.
- 11 Ayasrah, M., Qiu, H. and Zhang, X. (2021) Influence of Cairo Metro Tunnel Excavation on Pile Deep Foundation of the Adjacent Underground Structures: Numerical Study. *Symmetry*, **13**. <https://doi.org/10.3390/sym13030426>.
- 12 Cai, L., Shi, K., Jiang, F., Chen, G., Xiao, Z., Zheng, C., Zhang, S. and Wu, Y. (2024) Research on the Deformation Laws of Buildings Adjacent to Shield Tunnels in Clay Strata. *Scientific Reports*, **14**. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-50855-1>.
- 13 Li, D., Liao, F., Wang, L., Lin, J. and Wang, J. (2024) Multi-Stage and Multi-Parameter Influence Analysis of Deep Foundation Pit Excavation on Surrounding Environment. *Buildings*, **14**. <https://doi.org/10.3390/buildings14010297>.
- 14 Miao, Y., Liu, B., Liu, C., Shu, Z. and Wu, H. (2020) Experimental Study on Stability Analysis of a Structure during Excavation beneath This Structure. *Advances in Civil Engineering*, **2020**. <https://doi.org/10.1155/2020/9268927>.



- 15 Piciullo, L., Ritter, S., Lysdahl, A.O.K., Langford, J. and Nadim, F. (2021) Assessment of Building Damage Due to Excavation-Induced Displacements: The GIBV Method. *Tunnelling and Underground Space Technology*, **108**. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103673>.
- 16 Chen, R.P., Zeng, W., Wu, H.N., Wu, W. Bin and Liu, Q.J. (2020) Case Study of Tunneling-Induced Settlement and Damage of Masonry Buildings. *Yantu Gongcheng Xuebao/Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, **42**. <https://doi.org/10.11779/CJGE202012017>.
- 17 Amorosi, A., Boldini, D., de Felice, G., Lasciarrea, W.G. and Malena, M. (2019) Three-Dimensional Numerical Modelling of Historical Masonry Structures Affected by Tunneling-Induced Settlements. RILEM Bookseries. https://doi.org/10.1007/978-3-319-99441-3_102.
- 18 Soomro, M.A., Mangnejo, D.A., Saand, A. and Mangi, N. (2022) 3D Numerical Analysis of a Masonry Façade Subjected to Excavation- Induced Ground Deformation. *International Journal of Geotechnical Engineering*, Taylor and Francis Ltd., **16**, 865–877. <https://doi.org/10.1080/19386362.2021.1937853>.
- 19 Giardina, G., van de Graaf, A. V., Hendriks, M.A.N., Rots, J.G. and Marini, A. (2013) Numerical Analysis of a Masonry Façade Subject to Tunneling-Induced Settlements. *Engineering Structures*, **54**. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.03.055>.
- 20 Zhang, X., Qu, H., Xu, Y., Zhang, L. and Zhang, Z. (2024) Investigating the Damage to Masonry Buildings during Shield Tunneling: A Case Study in Hohhot Metro. *Engineering Failure Analysis*, **160**. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.108147>.
- 21 Leung, C.F., Yu, J., Chow, Y.K., Ng, Y.S., Tan, H.T. and Hua, C.J. (2016) Tunneling beneath Existing Buildings Supported on Shallow Foundations. <https://doi.org/10.1061/9780784480038.031>.
- 22 Zhang, D. (2023) Influence of Shield Tunnel Oblique Penetration Construction on Existing Large-Span Masonry Structures. *Mathematical Problems in Engineering*, **2023**. <https://doi.org/10.1155/2023/7779168>.
- 23 Tian, Z., Yu, C., Zhang, B., Zhao, Q. and Wang, Z. (2023) Analysis of Surface and Building Deformation by Shield Tunneling through Geology. *Applied Sciences (Switzerland)*, **13**. <https://doi.org/10.3390/app132011155>.
- 24 Naggar, E. (2020) Effect of Tunneling on Shallow Foundations. GECE. https://www.researchgate.net/publication/344235032_Effect_of_Tunneling_on_Shallow_Foundations.
- 25 Wang, W., Yao, J., Yue, J. and Lan, W. (2023) Key Techniques and Application of Underground Space Development underneath Heritage Buildings in Soft Soil. *Jianzhu Jiegou Xuebao/Journal of Building Structures*, **44**. <https://doi.org/10.14006/j.jzjgxb.2022.0663>.
- 26 Zhang, Y. and Commend, S. (2021) Calculs Probabilistes Des Déplacements Dus à La Réalisation de Tunnels à l'aide d'un Modèle Aux Éléments Finis. *Revue Française de Géotechnique*. <https://doi.org/10.1051/geotech/2021018>.
- 27 Liu, W., Wu, X., Zhang, L. and Wang, Y. (2018) Probabilistic Analysis of Tunneling-Induced Building Safety Assessment Using a Hybrid FE-Copula Model. *Structure and Infrastructure Engineering*, **14**. <https://doi.org/10.1080/15732479.2017.1386691>.
- 28 Lin, P., Wu, M. and Zhang, L. (2023) Probabilistic Safety Risk Assessment in Large-Diameter Tunnel Construction Using an Interactive and Explainable Tree-Based Pipeline Optimization Method. *Applied Soft Computing*, **143**. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.110376>.
- 29 Wang, H.L., Liu, Y., Jiang, Y. and Wang, Z.T. (2022) A Novel Approach for Risk Assessment of Building Damage via Metro Tunnel Construction. *Advances in Civil Engineering*, **2022**. <https://doi.org/10.1155/2022/8448223>.
- 30 Zhao, W., Han, L., Guan, Y.P. and Li, S.G. (2013) Risk Analysis of Existing Buildings during Excavation of Metro Station Using Shallow Tunneling Method. *Dongbei Daxue Xuebao/Journal of Northeastern University*, **34**. <https://xuebao.neu.edu.cn/natural/EN/Y2013/V34/I1/140>.
- 31 Feng, C., Zhang, D., Wang, H. and Zhang, X. (2021) Deformation Response and Safety Evaluation of Buildings Affected by Subway-Station Construction. *Advances in Civil Engineering*, **2021**. <https://doi.org/10.1155/2021/1694563>.
- 32 Cheboksary D. V. (2010) Assessment and ensuring the level of structural safety of operated buildings and structures. [Electronic resource] // *Science and Security*, **2010**. <https://pamaq.ru/src/prensa/013.pdf>.

Sorokin, V.; Konyushkov, V.; Sebkhauoi, A.; Perminov, N.

Mechanical safety of buildings and structures during underground construction of linear objects in complex geotechnical conditions;

2025; *Construction of Unique Buildings and Structures*; **115** Article No 11503. doi: 10.4123/CUBS.115.3