

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ



УДК 624.1

Оценка величины деформации поверхности при щитовой проходке тоннелей в грунте

С.В. Бородин, В.А. Дмитриенко

Институт сферы обслуживания и предпринимательства (филиал) ДГТУ, г. Шахты, Российская Федерация

Аннотация

В статье представлены результаты моделирования проходки тоннеля щитовым проходческим комплексом в песчаном массиве грунта с целью оценки смещений поверхности земли над сооружением. Рассматриваются выработки с величинами подвигания забоя: 1 м, 1,5 м и 2 м. Предполагается, что параметрами выбора подходящего варианта будут результаты вычисления напряжённо-деформированного состояния в области забоя, а также значения смещений контура тоннеля и поверхности земли. Расчёты выполнены в программе Plaxis 3D методом конечных элементов. Приведено описание созданной модели грунтового массива с конструкциями тоннеля. На основе полученных результатов построены графики зависимостей деформаций от расстояний по оси, показаны области распространения деформаций и напряжений в поперечных сечениях. В выводах определена оптимальная толщина разрабатываемого слоя грунта.

Ключевые слова: величина проходки, массив грунта, напряжённо-деформированное состояние, метод конечных элементов

Для цитирования. Бородин С.В., Дмитриенко В.А. Оценка величины деформации поверхности при щитовой проходке тоннелей в грунте. *Молодой исследователь Дона*. 2025;10(6):5–9.

Estimation of Surface Deformation during Shield-Driven Soil Tunneling

Stepan V. Borodin, Vladimir A. Dmitrienko

Institute of Service and Entrepreneurship (branch) of DSTU in Shakhty, Shakhty, Russian Federation

Abstract

The article presents the results of modeling shield-driven tunnelling with a shield boring machine in a sandy massif aimed at estimation of the soil surface displacements above the structure. Workings with the face advance rates of 1 m, 1.5 m, and 2 m were studied. It was assumed that an appropriate option would be chosen based on such parameters as: the results of the stress-strain state calculation in the face area, and magnitudes of the tunnel contour and soil surface displacements. The calculations were performed using the finite element method in Plaxis 3D software. A description of the created soil massif model with tunnel structures was provided. Based on the obtained results, the graphs of deformation dependences on the axial distances were plotted, and the areas of deformation and stress distribution in cross sections were identified. In conclusion, the optimal thickness of the working soil layer was determined.

Keywords: face advance rate, soil massif, stress-strain state, finite element method

For Citation. Borodin SV, Dmitrienko VA. Estimation of Surface Deformation during Shield-Driven Soil Tunneling. *Young Researcher of Don*. 2025;10(6):5–9.

Введение. Для большинства крупных городов развитие и совершенствование транспортной системы является одной из ключевых проблем [1–3]. В ближайшем будущем возникнет потребность в строительстве подземных объектов различного назначения. Для этого необходимо исследовать деформационные процессы в зоне горных работ, так как смещения контура выработок могут существенно повлиять на деформацию поверхности земли. Это, в свою очередь, может негативно сказываться на безопасной эксплуатации поверхностных объектов. Следовательно, требуется оценка возможных смещений поверхности земли в зоне горных работ.

Необходимым условием при проектировании подземных сооружений, возводимых щитовым способом, является определение оптимальной толщины слоя экскавации грунта, проходимого за одну заходку [4–6]. Величина заходки тоннелепроходческого комплекса (ТПК) за один цикл зависит от ряда факторов: свойств грунта, глубины заложения кровли тоннеля, характерных особенностей сложения горных пород, типа ТПК и диаметра его рабочего органа. Обычно величина заходки определяется в зависимости от ширины кольца обделки (0,5; 0,75 и 1,0 м). Значение приемлемой величины экскавации в течение одной фазы предполагается определить, анализируя напряжённо-деформируемое состояние грунтового массива [7].

Основная часть. Наиболее рационально оценивать возникающие напряжения и деформации, используя 3D-модель грунта с сооружаемым в нём тоннелем. Программа Plaxis 3D позволяет эффективно проводить такие расчеты, основываясь на методе конечных элементов [8]. Суть этого метода заключается в расчете отдельных элементов массива, разделенных сеткой треугольников. В пределах каждого треугольника деформационное поле считается равномерным и однородным. Деформации вычисляются по абсолютным (относительным) смещениям вершин треугольников [9].

Для оценки смещений грунтового контура в программном комплексе Plaxis 3D была создана модель массива песчаного грунта размерами $80 \times 20 \times 20$ м, в котором располагается тоннель вдоль продольной оси, диаметром 8 м, с глубиной заложения свода кровли в 7 м. Конструкция обделки крепи состоит из отдельных железобетонных блоков толщиной 25 см.

Моделируется вариант строительства тоннеля механизированным комплексом ТПК с гидропригрузом в шлюзовой камере [10]. Выполнить расчёт без гидропригруза невозможно из-за разрушения модели. Начальный момент работы ТПК от левой плоскости модели принят на расстоянии 25 м. Затем, задавая траекторию движения, в программе назначается толщина слоя разрушаемого грунта за один цикл проходки в забойной части тоннеля.

Расчёт напряжённо-деформированного состояния модели программа выполняет автоматически. По завершении выполнения расчётных фаз модели с величиной заходки в 1 м выводится общий объединённый план модели (рис. 1) и деформационная схема модели (рис. 2).

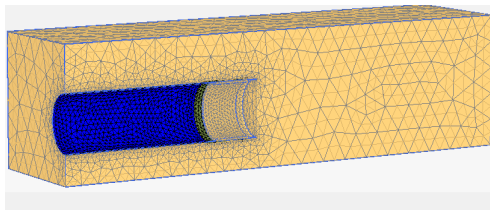


Рис. 1. Объединённый план расчётной модели грунтового массива

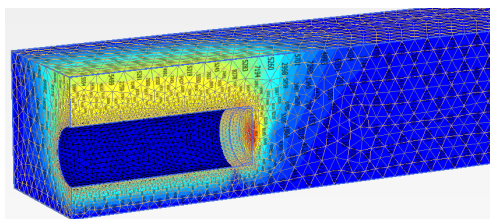


Рис. 2. Распространение деформационных полей вокруг выработки

Анализ схемы деформирования показывает смещения по всей длине выработки и формирование призмы сползания в зоне забоя. Это приводит к росту горного давления и выпору грунта в зоне рабочего органа ТПК. На поверхности модели также возникают провалы грунта (рис. 3), которые могут оказать значительное влияние на состояние объектов на поверхности земли.

Для исследования влияния величины подвигания забоя на формирование зон деформаций и напряжений были составлены модели и выполнены расчёты с величинами заходки в 1,5 и 2 метра, что позволит выбрать наиболее приемлемую толщину экскавации слоя грунта.

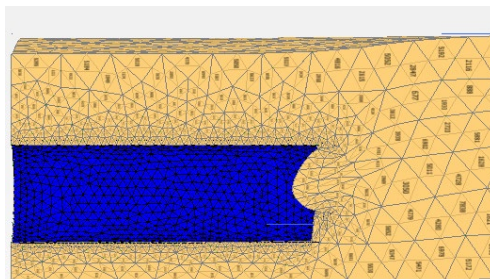


Рис. 3. Выдавливание грунта в забойной части выработки

На рис. 4 изображены зоны перемещений в своде тоннеля при величине заходки в 1,5 и 2 м.

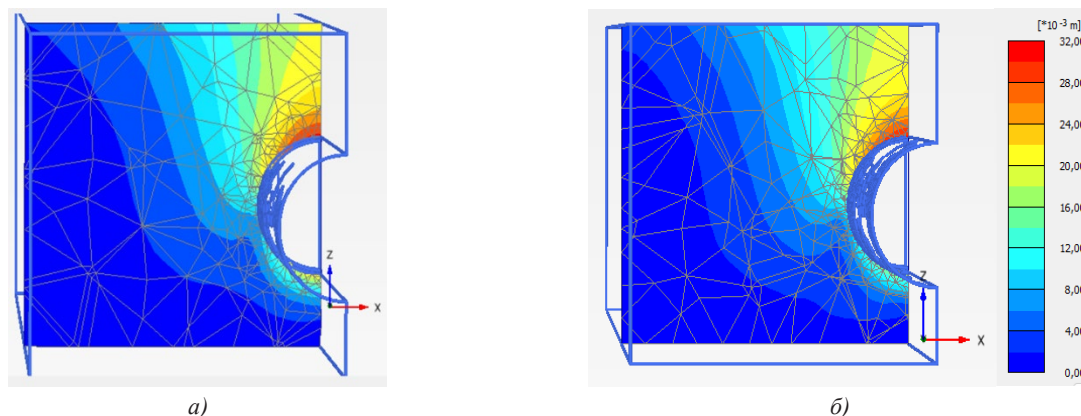


Рис. 4. Зоны деформации в забое тоннеля при подвигании забоя:
а — 1,5 м; б — 2,0 м

Анализ результатов расчета показывает, что зона смещений во всех моделях достигает поверхности земли. В поперечном направлении зона деформаций распространяется почти до края моделей, с максимальными значениями над сводом подземного сооружения, которые составляют 43,6 мм при величине заходки в 1,5 м, а при подвигании 2,0 м — 29,9 мм.

График зависимости деформаций от подвигания проходки представлен на рис. 5. При величине проходки 1,5 м наибольшие смещения свода, достигающие почти 4,4 см, наблюдаются приблизительно посередине между забоем и оболочкой щита тоннельного комплекса. В то же время деформации плоскости забоя из-за формирующейся призмы сползания достигают максимального значения 5,1 см при подвигании забоя 1,5 м.

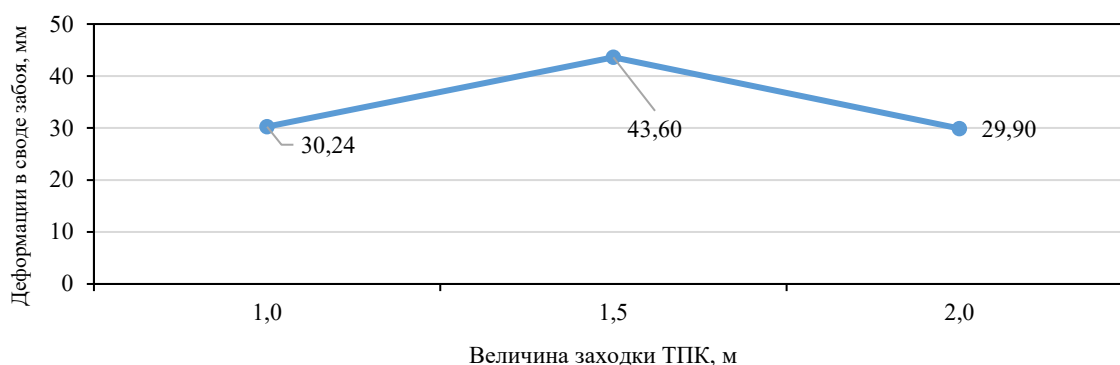


Рис. 5. Зависимость смещений свода грунта в незакреплённой части забоя от величины подвигания забоя

Распределение напряжений в забойной части при 1,5 и 2 м проходки приведены на рис. 6.

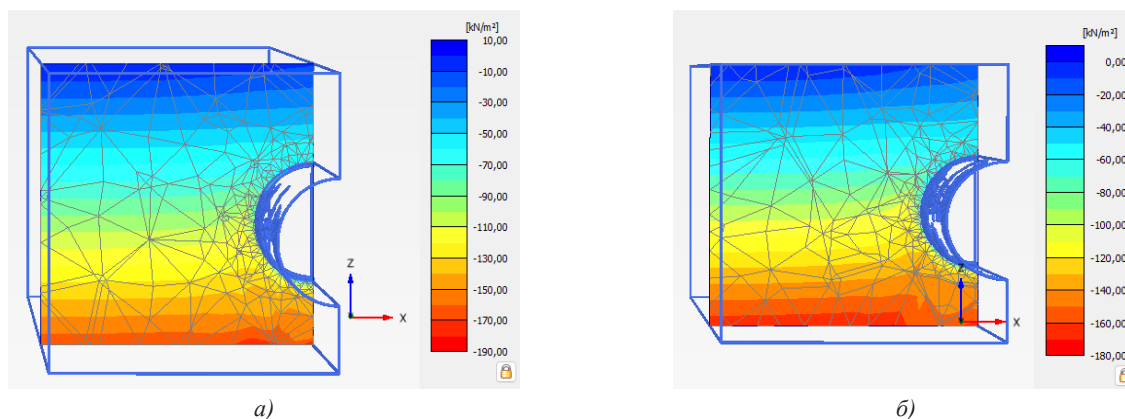


Рис. 6. Зоны напряжений в забое при величине подвигания:
а — 1,5 м; б — 2 м

График зависимости напряжений от величины заходки представлен на рис. 7.

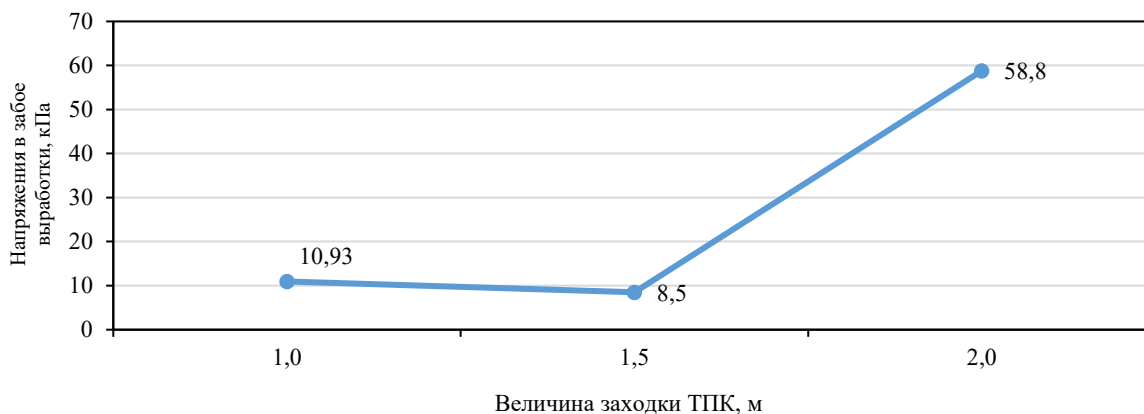


Рис. 7. График максимальных нормальных напряжений в забое по оси Z при различной величине заходки

При проходке в 1,5 м наблюдаются наименьшие напряжения, однако деформации становятся более значительными по сравнению с другими рассматриваемыми величинами проходок. Это связано с частичной разгрузкой контура массива вследствие смещений грунта [11]. Определить осадки грунта в данном случае возможно по разнице перемещений точек отдельных конечных элементов в области щита ТПК. Для этого на контуре массива и оболочки щита были определены точки с близкими координатами по продольной оси сооружения (рис. 8).

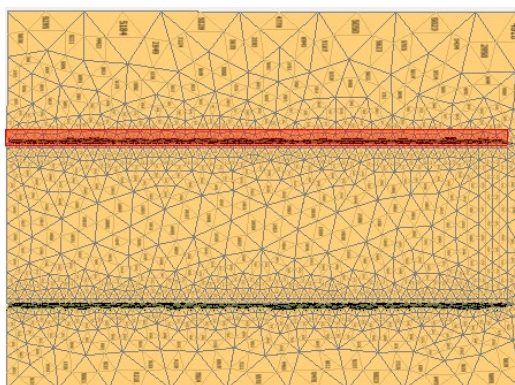


Рис. 8. Выбранная область расчёта

Далее установлены номера выбранных узлов и из таблиц результатов расчётов определены перемещения контура массива и щита. Аналогично определены перемещения поверхности модели.

График распределение перемещений поверхности земли приведён на рис. 9.

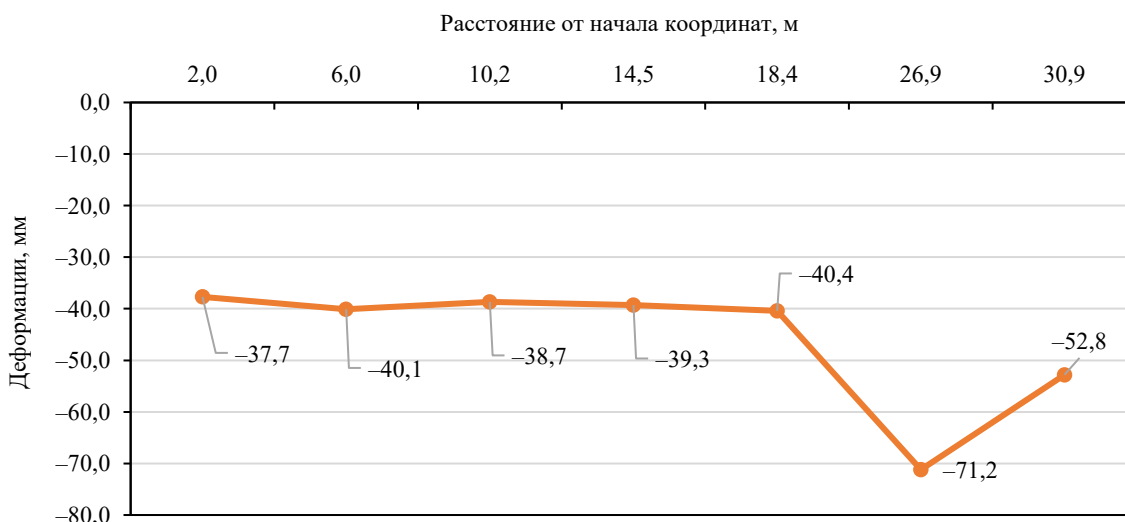


Рис. 9. Распределение перемещений на поверхности массива

Заключение. В результате моделирования установлено, что в песчаном массиве строительство тоннеля без гидропригруза невозможно [12]. Смещения земной поверхности при величине заходки в 1,5 м над оболочкой щита достигают 40 мм, а в незакрепленной части превышают 71 мм. Такие деформации даже по траектории дорог недопустимы, поэтому величина подвигания забоя не должна превышать ширины кольца обделки тоннеля, то есть 0,75 м.

Список литературы

1. Иванова Н.В., Ганжа О.А. Градо-экологический потенциал формирования подземной архитектуры города. *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: строительство и архитектура*. 2017;47(66):472–485.
2. Челюканова Е.Э., Горбунова В.С. Подземное пространство как резерв дополнительной полезной площади. *Перспективы науки и образования*. 2013.(6):189–194.
3. Ушакова А.И. Использование подземного пространства для создания комфортной городской среды. В: *Труды Международной научно-практической конференции «Экология. Производство. Общество. Человек: материалы XXVI»*. Пенза. 2014. С. 167–171.
4. Макишин В.Н., Фаткулин А.А. Условия формирования и перспективы развития подземного пространства городов. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2010;(S4):530–534.
5. Рудяк М.С. Зависимости ценности городских гражданских подземных объектов от влияющих факторов. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2003;(2).
6. Лернер В.Г., Петренко Е.В. Систематизация и совершенствование технологий строительства подземных объектов. *ТИМР*. 1999;(67).
7. Семенова О.С. Теоретические проблемы градостроительного планирования подземной части городов. *Architecture and Modern Information Technologies*. 2015;1(30):6.
8. Агеенко В.А. Обоснование применения программного комплекса Plaxis для технологии микротоннелирования. *ГИАБ*. 2015;389–390.
9. Голованов А.И., Бережной Д.В. Метод конечных элементов в механике деформируемых твердых тел. *ДАС*. 2001;300.
10. Ильичев В.А. Геотехнические проблемы в подземном строительстве города. *Основания, фундаменты и механика грунтов*. 2004;4:2–4.
11. Ильичев В.А., Коновалов П.А., Никифорова Н.С. Исследование влияния строящихся заглубленных сооружений на деформации близрасположенных зданий *ОФМГ*. 2002;4:8–11.
12. Аношенко Д.А. Оценка несущей способности тоннельной обделки с учетом физико-механических свойств грунтов. *Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока*. 2013;(1):106–108.

Об авторах:

Степан Васильевич Бородин, студент кафедры «Строительство и техносферная безопасность» Института сферы обслуживания и предпринимательства (филиал) ДГТУ, г. Шахты, Ростовская обл. (346500, Российская Федерация, Ростовская область, г. Шахты, ул. Шевченко, д. 147), stepanborodin97@gmail.com

Владимир Александрович Дмитриенко, кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительство и техносферная безопасность» Института сферы обслуживания и предпринимательства (филиал) ДГТУ, г. Шахты, Ростовская обл. (346500, Российская Федерация, Ростовская область, г. Шахты, ул. Шевченко, д. 147), vadmitrienko@rambler.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Stepan V. Borodin, Student of the Construction and Technosphere Safety Department, Institute of Service and Entrepreneurship (branch) of DSTU in Shakhty (147, Shevchenko Str., Shakhty, Rostov Region, 346500, Russian Federation), stepanborodin97@gmail.com

Vladimir A. Dmitrienko, Cand.Sci (Engineering), Associate Professor of the Construction and Technosphere Safety Department, Institute of Service and Entrepreneurship (branch) of DSTU in Shakhty (147, Shevchenko Str., Shakhty, Rostov Region, 346500, Russian Federation), vadmitrienko@rambler.ru

Conflict of Interest Statement: the authors declare no conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.