СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Месчян С.Р. Начальная и длительная прочность глинистых грунтов. – М.: Недра, 1978. – 207 с.
2. Bishop A.W., Green G. The influence of end restrain on the compression strength of a cohesionless soil // Géotechnique. – 1965. – V. 15. – № 3. – P. 243–266.
3. Dounias G.T., Potts D.M. Numerical analyses of drained direct and simple shear tests // Journal of Geotechnical engineering, ASCE. – 1993. – V. 119. – № 12. – P. 1870–1891.
4. Frydman S., Talesnick M. Development of strain during monotonic shear of soft clay // Journal of Geotechnical engineering, ASCE. – 1992. – V. 118. – № 5. – P. 704–725.
5. Lade P. Torsion shear apparatus for soil testing // Laboratory shear strength of soil, ASTM, STP 740. – 1981. – P. 145–163.
6. DIN 18137-3. September 2002. Bestimmung der Scherfestigkeit. – 2002. – S. 33.

Поступила 25.06.2007 г.

УДК 624.131

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСЕДАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ПРОХОДКЕ ТУННЕЛЯ ЩИТОВЫМ СПОСОБОМ

Л.А. Строкова

Технический университет, г. Мюнхен, Германия
E-mail: geyer3@mail.ru

Изложены результаты моделирования оседания поверхности в результате проведения горных работ щитовым способом для строительства линии метрополитена U-8-Nord г. Мюнхена. Для верификации расчетной модели служили замеры оседания поверхности по окончании горных работ. Выбрана модель грунта, наиболее достоверно описывающая оседание земной поверхности при проходке. Определены факторы, контролирующие величину осадки поверхности. Деформации грунта, связанные с осушением массива при выполнении горных работ не учитывались.

Одним из характерных видов деформации грунтов при проходке горных выработок является оседание дневной поверхности (рис. 1). С целью минимизации повреждений существующих зданий и фундаментов на поверхности земли, необходимо прогнозировать эти эффекты и принять соответствующие меры. Р. Пек в 1969 г. предложил для математического описания оседания поверхности [1] использовать формулу Гаусса для нормального распределения

$$S_{v(x)} = S_{v,\max} e^{-\frac{x^2}{2i_x^2}},$$

где $S_{v,\max}$ – максимальная осадка поверхности над осью туннеля, i_x – расстояние до точки перегиба кривой оседания поверхности, соответствующее стандартному отклонению в уравнении Гаусса.

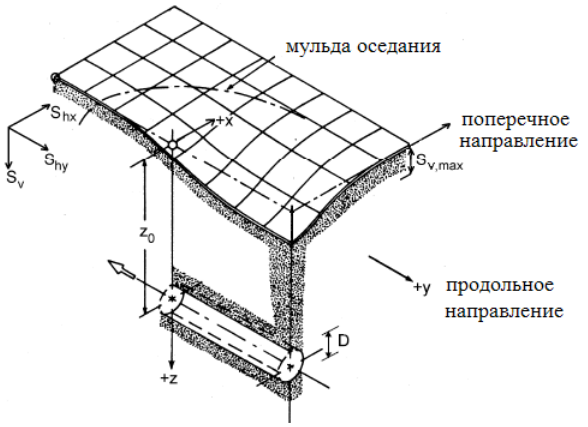

Рис. 1. *Геометрия оседания поверхности, вызванной проходкой туннеля [2]*

Типичная поверхность оседания в поперечном направлении показана на рис. 2. Область выше кривой оседания задается уравнением

$$V_s = \int_{-\infty}^{\infty} S_v \cdot dx = \sqrt{2\pi} \cdot i \cdot S_{v\max},$$

где V_s – объем осевшего грунта над туннелем, в результате проведения горных работ, теоретически равен величине сжатия сечения туннеля V_t (рис. 2) на единицу длины проходки.

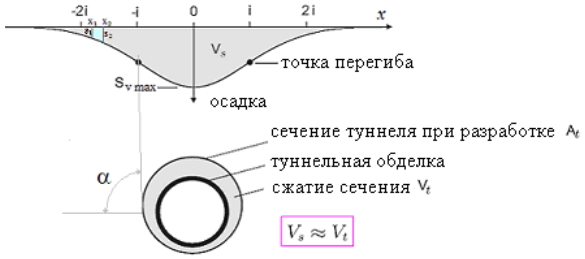

Рис. 2. *Основные характеристики, используемые в расчете [4]*

Для оценки оседания поверхности использовался метод конечных элементов, реализованный в программе PLAXIS которая позволяет моделировать процессы экскавации грунта, возведения обделки туннеля [3]. Расчеты выполнялись для строящейся линии метрополитена U-8-Nord г. Мюнхена. Для верификации модели служили данные натурных наблюдений оседания поверхности на уже законченном участке метро, выполненные сотрудниками технического университета под руководством И. Филлибека. Максимальная величина оседания

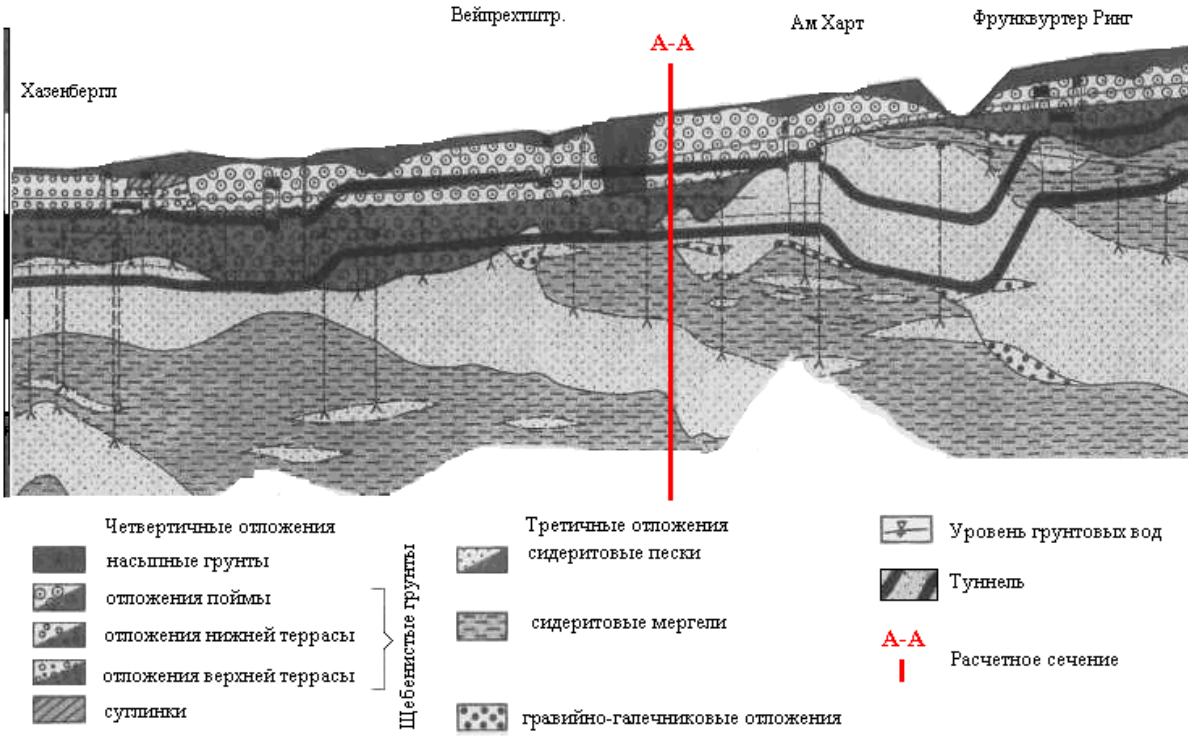

Рис. 3. *Схематический разрез северной части г. Мюнхена*

поверхности составила 7 мм. Оседания зафиксированы на расстоянии до 10 м от оси туннеля.

Геологический разрез г. Мюнхена представлен четвертичными гравийно-щебенистыми грунтами, подстилаемыми третичными песчаными и глинистыми грунтами. Продольный разрез по оси туннеля представлен на рис. 3.

Таблица. *Основные характеристики грунтов*

Название	Обозначение в «PLAXIS»	Гравий	Песок	Глина	Ед. изм.
Модель поведения	HS: «Hardening soil»	Упруго-пластический материал с упрочнением			–
Тип поведения	Drained	Дренированный			–
Удельный вес грунта	γ_{unsat}	23	21	21	кН/м^3
Удельный вес водонасыщенного грунта	γ_{sat}	24	22	21	кН/м^3
Модуль Юнга при первичном нагружении	$E_{50}=E_{oed}$	120	95	60	МН/м^2
Модуль Юнга при разгружении – повторном нагружении	E_{ur}	240	190	120	М/м^2
Показатель степени	m	0,5	0,4	0,4	–
Коэффициент Пуассона	ν	0,3	0,3	0,3	–
Сцепление	c_{ref}	1	1.0	25	кН/м^2
Угол трения	φ	37,5	35	25	град.
Угол дилатансии	Ψ	0	0	0	град.
Давление	p_{ref}	100	100	100	–
Коэффициент бокового давления грунта при нормальной консолидации	$K_0^{NC}=1-\sin\varphi$	0,391	0,426	0,577	–

Расчетное сечение, по которому мною проводилось моделирование, представлено тремя различными по литологии слоями. Верхний слой мощностью 10 м состоит из гравия. Под слоем гравия залегает слой песка мощностью 4 м. Ниже песчаного слоя залегает слой глины мощностью 8,0 м. Показатели физико-механических свойств грунтов приведены в таблице. Модули упругости и прочностные показатели грунтов определялись по данным трехосных и компрессионных испытаний. Модуль сдвига и деформация сдвига назначены по литературным данным. Уровень грунтовых вод расположен на 8 м ниже поверхности земли. Распределение порового давления гидростатическое.

Проходка туннеля осуществлялась щитовым способом в слоях гравия и песка. Туннель имеет диаметр 7,0 м и расположен на глубине 13 м. Основные свойства туннельной обделки следующие: нормальная жесткость $6{,}0\cdot10^6$ кН/м, изгибная жесткость $2{,}0\cdot10^4$ кНм^2/м, эквивалентная толщина 0,2 м, вес 8,4 кН/м/м, коэффициент Пуассона 0,33. Геометрическая модель для выбранного расчетного сечения представлена на рис. 4.

В качестве основного типа конечных элементов использовался 15-узловый элемент. В области оседания поверхности сетка конечных элементов (рис. 5) более мелкая.

Моделирование процессов экскавации грунта и возведения обделки выполнялось по двум методикам [3]: β-метод (с β: 0,4; 0,5; 0,6 и 0,7 %) и <*volume loss*> (с величиной сжатия сечения туннеля V_l: 0,2; 0,4 и 0,6 %). После выполнения расчетов в программе PLAXIS, данные по вертикальным перемещениям на верхней границе расчетной модели переносились в Excel, где проводился расчет площади элементарных трапеций поверхности оседания,

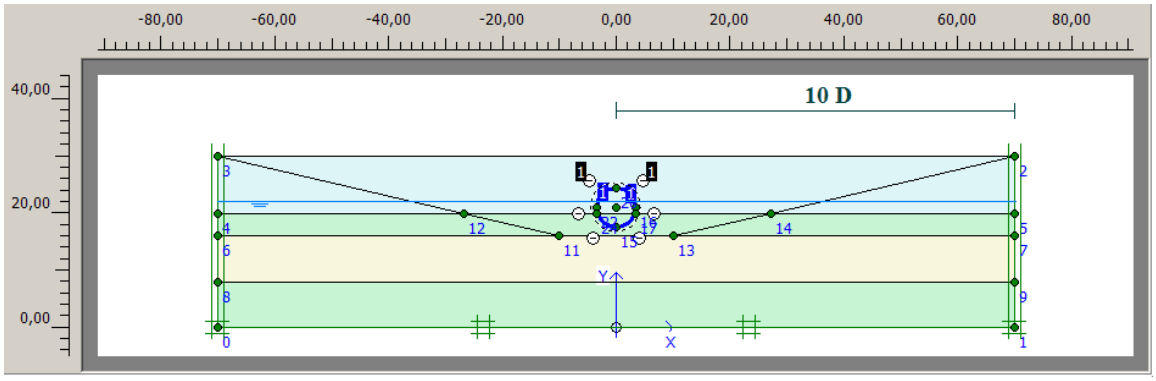

Рис. 4. *Геометрическая модель участка*

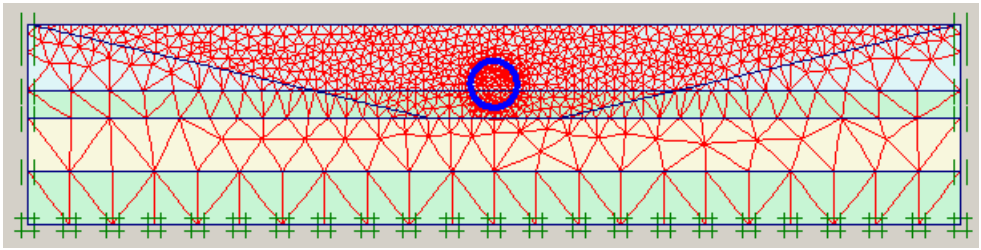

Рис. 5. *Сетка конечных элементов*

определялась суммарная площадь выше кривой поверхности оседания A_s и, наконец, определялся объем потери грунта по формуле $V_S = \frac{4A_s}{\pi D^2}$ для сопоставления данных объема осевшего грунта V_s и величины сжатия сечения туннеля V_t. Результаты моделирования оседания поверхности при экскавации грунта представлены на рис. 6. Наиболее близко к действительной кривой оседания по максимальной величине осадки отвечает расчет экскавации при сжатии сечения туннеля 0,2 %.

Для определения факторов, определяющих величину оседания поверхности при проходке туннеля, были выбраны следующие параметры: тип грунта, отношение мощности пород над туннелем H и его диаметра D, величина бокового давления в условиях нормальной консолидации K_0^{NC} и в переуплотненном состоянии K_0^{OC}, тип расчетной модели грунта на основе теории пластически упрочняющейся среды.

Для оценки влияния типа пород на величину осадки проводилось моделирование двух видов: имитировалась проходка туннеля только в гравийных грунтах и только в глинистых, причем для каждого вида, были выполнены расчеты с различным отношением H/D, равным 1, 2 и 3. Как видно из рис. 7, основной вклад в величину осадки вносит отношение H/D. При увеличении глубины залегания туннеля резко увеличивается величина сжатия сечения туннеля, что находит отражение в объеме осевшего грунта, сам вид грунта имеет меньшее влияние.

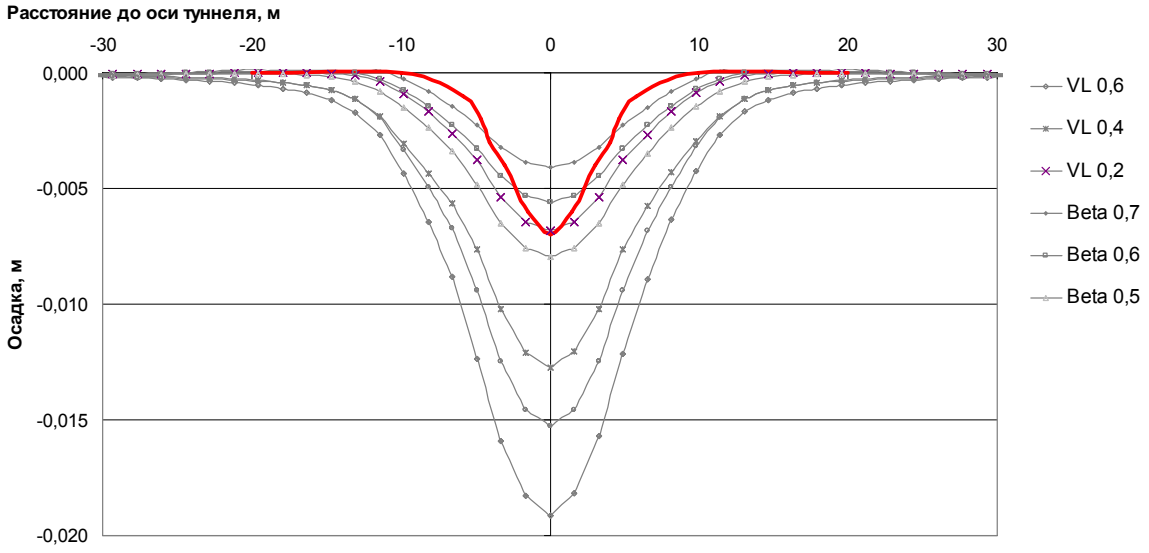

Рис. 6. *Кривые оседания поверхности по данным натурных наблюдений и расчетов в PLAXIS*

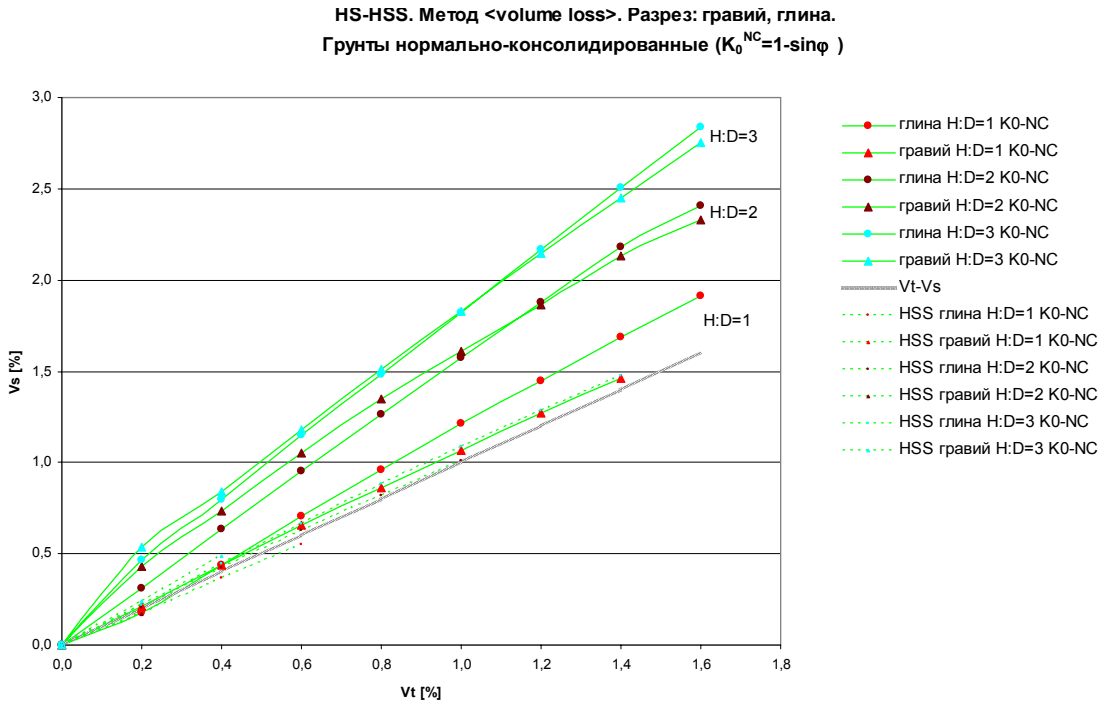

Рис. 7. *Сравнение объемов осевшего грунта над туннелем V_s и величиной сжатия сечения туннеля V_t при экскавации для нормально-консолидированных грунтов*

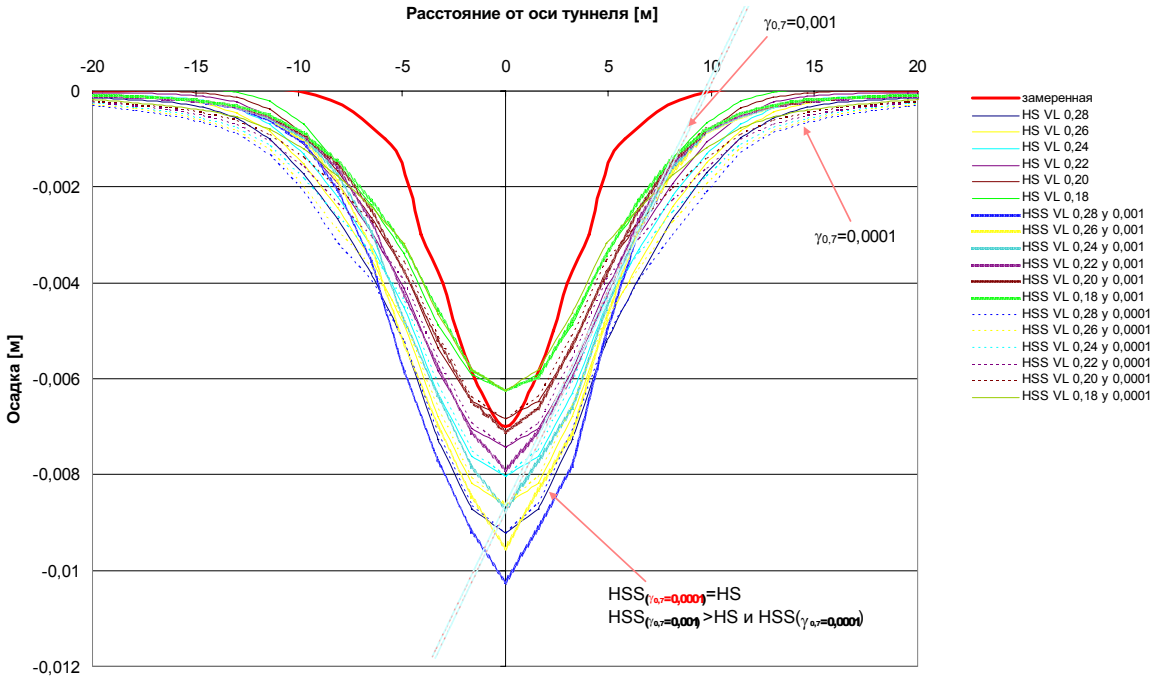

Рис. 8. *Кривые оседания поверхности: по данным натурных наблюдений и расчетные с использованием моделей HS и HSS при варьировании деформации сдвига γ и величиной сжатия сечения туннеля VL*

Для выбора расчетной модели грунта, наиболее достоверно описывающей оседание земной поверхности при проходке туннеля, были выполнены расчеты с двумя моделями грунта: а) HS (*hardening soil*) – упруго-пластическая модель с изотропным упрочнением, б) HSS (*hardening soil with small – strain stiffness*) – упруго-пластическая модель с изотропным упрочнением с учетом жесткости малых деформаций. Обе модели учитывают несовпадение модуля упругости ветвей разгружения и повторного нагружения, наблюдаемое при лабораторных испытаниях [3]. Для второй модели параметры грунта модуль сдвига G_0 и деформация сдвига γ, назначались по литературным источникам [4, 5], поскольку

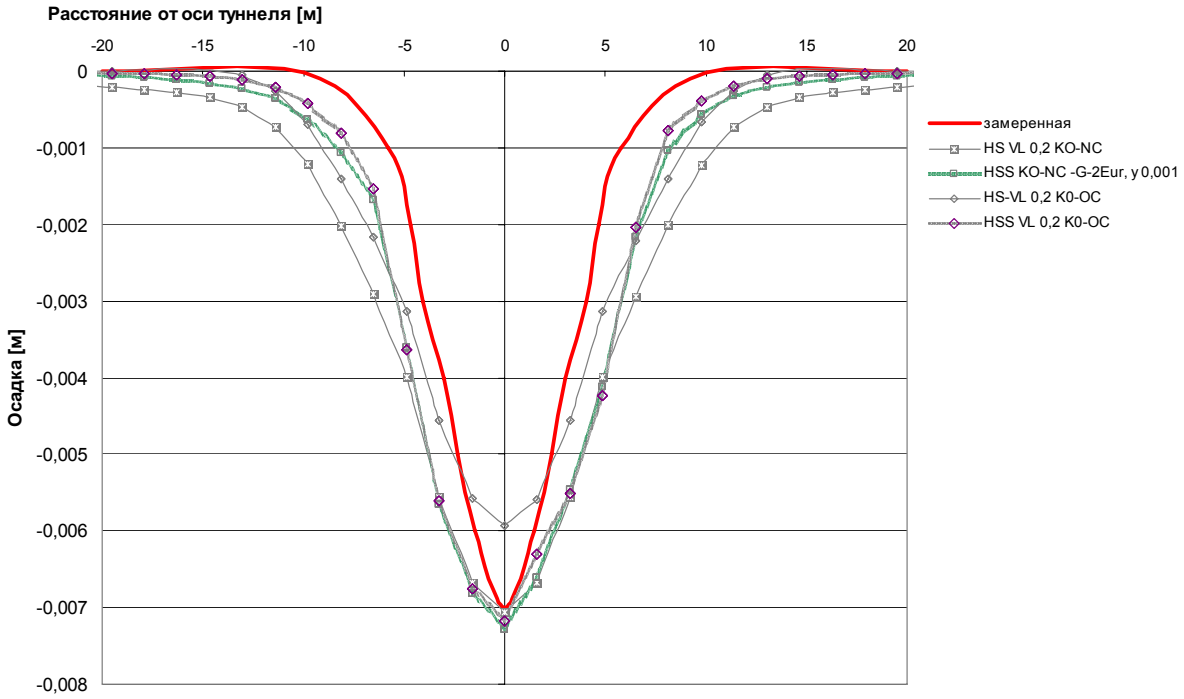

Рис. 9. *Моделирование оседания поверхности при разных коэффициентах бокового давления грунта K_0*

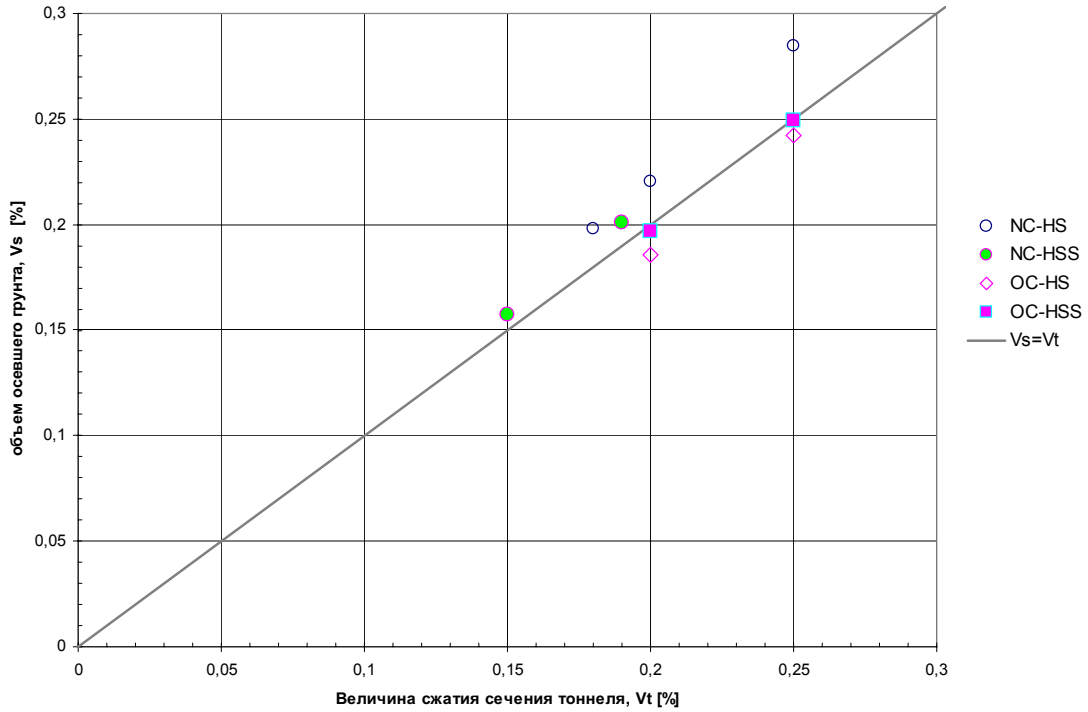

Рис. 10. *Сравнение объемов осевшего грунта над туннелем и величиной сжатия сечения туннеля V_t при экскавации для нормально-консолидированного (NC) и переуплотненного состояния (OC) массива. Модели поведения материала под нагрузкой: HS и HSS*

их определение требует сложного дорогостоящего оборудования, не входящего в стандартные определения показателей механических свойств грунтов. Для корректировки назначенных параметров, проведены расчеты с варьированием модуля сдвига G_0: $1{,}5 \cdot E_{ur}$; $2 \cdot E_{ur}$; $3 \cdot E_{ur}$ и деформации сдвига $\gamma_{0,7}$: 0,01; 0,001; 0,0001. Результаты моделирования представлены на рис. 8. Наилучшее совпадение расчетных кривых оседания с данными натурных наблюдений наблюдается для расчетов с моделью HSS при значениях $\gamma_{0,7}$= 0,001 и при $G_0=2 \cdot E_{ur}$, которые рекомендуется использовать при дальнейших расчетах.

Для оценки влияния степени переуплотнения грунтов в недавнем геологическом прошлом при наступлении оледенений были выполнены расчеты с коэффициентом бокового давления K_0^{OC} для переуплотненного состояния массива. По данным лабораторных исследований, специально выполненных инженером Г. Пельцом, в расчетах были приняты следующие значения K_0 для: гравия 0,361; песка 0,6; глины 0,8. Результаты моделирования оседания поверхности с учетом K_0 отражены на рис. 9. Наилучший результат показали расчеты с учетом переуплотненного состояния массива K_0^{OC} (модель HSS).

Адекватность модели реальному объекту контролировалась совпадением расчетных мульд оседания и мульды оседания, полученной по натурным наблюдениям. Основным параметром сравнения являлся параметр V_s – объем осевшего грунта над туннелем, получаемый в зависимости, от задаваемой в расчете, величины сжатия сечения туннеля V_t при экскавации, рис. 10. Близость точек V_s к теоретической линии $V_s \approx V_t$ подтверждала, что модель определена правильно.

Таким образом, результаты моделирования показали, что основными факторами, определяющими величину осадки, являются: глубина залегания туннеля, тип грунта, коэффициент бокового давления грунта. Выполненные исследования позволяют выполнять прогноз оседания поверхности в ходе дальнейшего строительства метрополитена с учетом установленных в этом исследовании положений.

1. Недопустимо изначально считать, что грунты находятся в условиях нормальной консолидации, без проверки этого положения специальными лабораторными исследованиями.
2. Различие между способом определения величины осевшего грунта по β-методу или <*volume loss*> незначительное, хотя первый способ более трудоемок.
3. Обе расчетные модели грунта на основе теории пластически упрочняющейся среды хорошо зарекомендовали себя, хотя предпочтение следует отдавать модели HSS. В расчетах параметры модуля сдвига и деформации сдвига, до проведения их экспериментального определения, можно ориентировочно принимать равными $\gamma_{0,7}$=0,001 и при $G_0=2\cdot E_{ur}$.

В настоящее время незначительное оседание поверхности, вызванное проходкой туннеля, не представляет угрозы для существующих зданий. Продолжение мониторинга за оседанием поверхности, вероятно, потребует дополнительного учета реологических параметров грунтового массива.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Peck R.B. Deep excavations and tunneling in soft ground // Proc. of the 7th Intern. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering. State of the art volume. Sociedad Mexicnan de Mecanica de Suelos, A. C., 1969. – P. 225–290.
2. Franzius J.N. Behaviour of buildings due to tunnel induced subsidence: Ph.D. thesis. – Imperial College, University of London, 2003. – 360 p.
3. Plaxis V8 (Finite element code for soil and rock analyses). http://www.plaxis.nl
4. Moller S.C. Tunnel induced settlements and forces in linings // Mitteilungen des Instituts fur Geotechnik Universitat Stuttgart. – 2006. – № 54. – 174 p.
5. Benz T. Small-Strain Stiffness of Soils and its Numerical Consequences // Mitteilungen des Instituts fur Geotechnik Universitat Stuttgart. – 2007. – № 55. – 209 p.

Поступила 09.10.2007 г.