

# ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ ДЕФОРМАЦИЙ ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ ВО ВРЕМЕНИ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ КОММУНИКАЦИОННЫХ ТОННЕЛЕЙ ЩИТОВЫМ СПОСОБОМ

## SPECIFIC FEATURES OF GROUND SURFACE DEFORMATION IN TIME DURING CONSTRUCTION OF COMMUNICATION TUNNELS BY TBM

### ИСАЕВ О.Н.

Ведущий научный сотрудник лаборатории освоения подземного пространства городов Научно-исследовательского, проектно-изыскательского и конструкторско-технологического института оснований и подземных сооружений (НИИОСП) им. Н.М. Герсеванова, к.т.н., г. Москва, [geotechnika2008@gmail.com](mailto:geotechnika2008@gmail.com)

### ШАРАФУТДИНОВ Р.Ф.

Инженер лаборатории освоения подземного пространства городов НИИОСП им. Н.М. Герсеванова, г. Москва, [r.f.sharaf@gmail.com](mailto:r.f.sharaf@gmail.com)

### ISAEV O.N.

A lead staff scientist of the Urban Underground Space Development Laboratory of the Gersevanov Research Institute of Bases and Underground Structures (NIIOSP), Moscow, [geotechnika2008@gmail.com](mailto:geotechnika2008@gmail.com)

### SHARAFUTDINOV R.F.

An engineer of the Urban Underground Space Development Laboratory of the Gersevanov Research Institute of Bases and Underground Structures (NIIOSP), Moscow, [r.f.sharaf@gmail.com](mailto:r.f.sharaf@gmail.com)

#### Ключевые слова:

щитовой тоннель; продолжительность деформаций.

#### Key words:

shield tunnel; deformation duration.

### Аннотация

**В статье приведены результаты экспериментальных исследований влияния различных факторов на общую продолжительность и скорость деформаций поверхности земли при прокладке коммуникационных тоннелей мелкого заложения щитовым способом. Даны рекомендации по прогнозу продолжительности осадок поверхности земли.**

### Введение

При освоении подземного пространства мегаполисов часто возникает необходимость строительства коммуникационных тоннелей, сооружаемых щитовым способом. В условиях плотной городской застройки их использование связано с обеспечением сохранности существующих зданий, сооружений и подземных коммуникаций, расположенных в зоне влияния строительства.

Наибольшее внимание в этой области большинством исследователей уделяется вопросам оценки влияния, выполняемой на стадии проектирования объектов. Если вопросы прогноза размеров зон влияния и величин деформаций грунтового массива и существующих объектов оказались изучены в целом достаточно подробно, то длительность, интенсивность деформаций и их прогноз все еще по-настоящему не стали предметом исследований. Актуальность их изучения обусловлена в первую очередь необходимостью совершенствования действующих нормативно-рекомендательных документов по геотехническому мониторингу окружающей застройки при проходке щитовых тоннелей. От результатов подобных исследований зависят требования норм по срокам и периодичности мониторинга, правильное назначение которых в одних случаях может помочь сэкономить финансовые сред-

### Abstract

**The article presents experimental research results of influence of various factors on the total durations and rates of ground surface deformations in case of shallow communication tunnel construction by TBM. Some recommendations on ground surface subsidence duration forecast are given.**



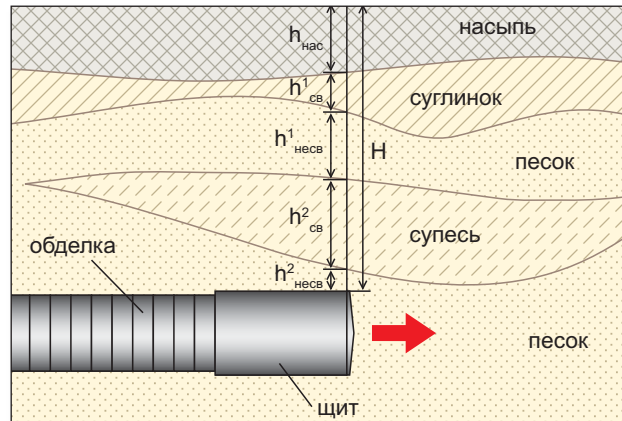
**Рис. 1. Демонтаж щита фирмы Herrenknecht при строительстве кабельного коллектора в городе Реутове**

ства госбюджета или частного инвестора, выделяемые на мониторинг, в других — избежать аварийных ситуаций из-за несвоевременного выявления опасных деформационных процессов.

Сегодня рассматриваемые вопросы регламентируются фактически лишь в двух действующих нормативных документах — в недавно появившемся ГОСТ Р 53778-2010 [6] по обследованию и мониторингу зданий и сооружений и в действующей с 1997 г. инструкции Госгортехнадзора [8] по наблюдению за сдвигами земной поверхности и расположенными на ней объектами при строительстве в Москве подземных сооружений. Оба эти документа обладают общим недостатком: заложенные в них положения в значительной степени «скопированы» (вероятно, без проведения необходимых дополнительных исследований — во всяком случае, авторам статьи, несмотря на тщательные поиски, не удалось найти соответствующие публикации) из практики охраны сооружений, расположенных в зоне влияния подземных горных разработок на угольных месторождениях. Однако автоматически переносить этот опыт нельзя по следующим причинам:

- глубина заложения щитовых коммуникационных тоннелей, как правило, в десятки раз меньше глубины закрытых выработок при разработке полезных ископаемых;
- состав и свойства грунтовых массивов над коммуникационным тоннелем и закрытой выработкой разрабатываемого месторождения различны: в первом случае, как правило, имеют дело с дисперсными грунтами, во втором — со скальными и полускальными;
- технологии закрытой проходки и типы проходческого оборудования при подземном строительстве и разработке месторождений существенно отличаются одна от другой;
- виды и уровень ответственности зданий и сооружений при подземном строительстве в условиях плотной городской застройки, как правило, сильно отличаются от таковых для объектов в зонах влияния разрабатываемых месторождений.

Иллюстрацией отмеченного недостатка является заложенное в инструкцию [8] положение о том, что



**Рис. 2. К определению коэффициента связности  $K_c$**

при скорости вертикальных перемещений 1, 2 и 5 мм/сут периодичность инженерно-геодезических измерений соответственно должна составлять 75, 40 и 15 сут. Такая периодичность мониторинга фактически гарантирует его неспособность своевременно отследить появление опасных тенденций деформационных процессов и предотвратить наступление аварийных ситуаций. Поэтому на практике при строительстве тоннелей мониторинг выполняется намного чаще.

В настоящей работе приведены результаты экспериментальных исследований влияния различных факторов на общую продолжительность и скорость деформаций поверхности земли при прокладке коммуникационных тоннелей мелкого заложения тоннелепроходческими механизированными комплексами (ТПМК) с активным пригрузом.

### **Продолжительность и интенсивность деформаций при закрытой проходке**

В отечественной практике для оценки продолжительности деформаций при проходке закрытых выработок широко используется следующая упрощенная зависимость:

$$T = K_T H / V_t, \quad (1)$$

где  $V_t$  — скорость продвижения забоя выработки, мм/сут;  $H$  — глубина заложения выработки;  $K_T$  — коэффициент, зависящий от механических свойств, литологических и других особенностей массива грунта и определяемый опытным путем.

Зависимость (1) была получена для оценки продолжительности процесса сдвига при добыче полезных ископаемых на основе анализа и обобщения большого числа данных наблюдений. Эту же формулу, фактически без изменений, применяют в нормах [6, 8] для прогноза общей продолжительности деформаций поверхности земли над закрытыми выработками при подземном строительстве. Согласно [8] для Московского региона значения коэффициента  $K_T$  рекомендуются в пределах 1,5÷2,5.

За рубежом, как отмечено, например, в работе [11], вопросы длительности деформаций грунта во времени при тоннелировании являются малоизученными. В публикации [11] также указано, что при проходке тоннелей в глинистых грунтах за счет их реологиче-

ских свойств процесс деформирования грунта может идти годами.

Интенсивность деформаций подрабатываемого грунтового массива может характеризоваться максимальной  $V_{S,max}$  и средней  $V_S$  скоростью деформаций. Последняя определяется по формуле:

$$V_S = S_{max} / T, \quad (2)$$

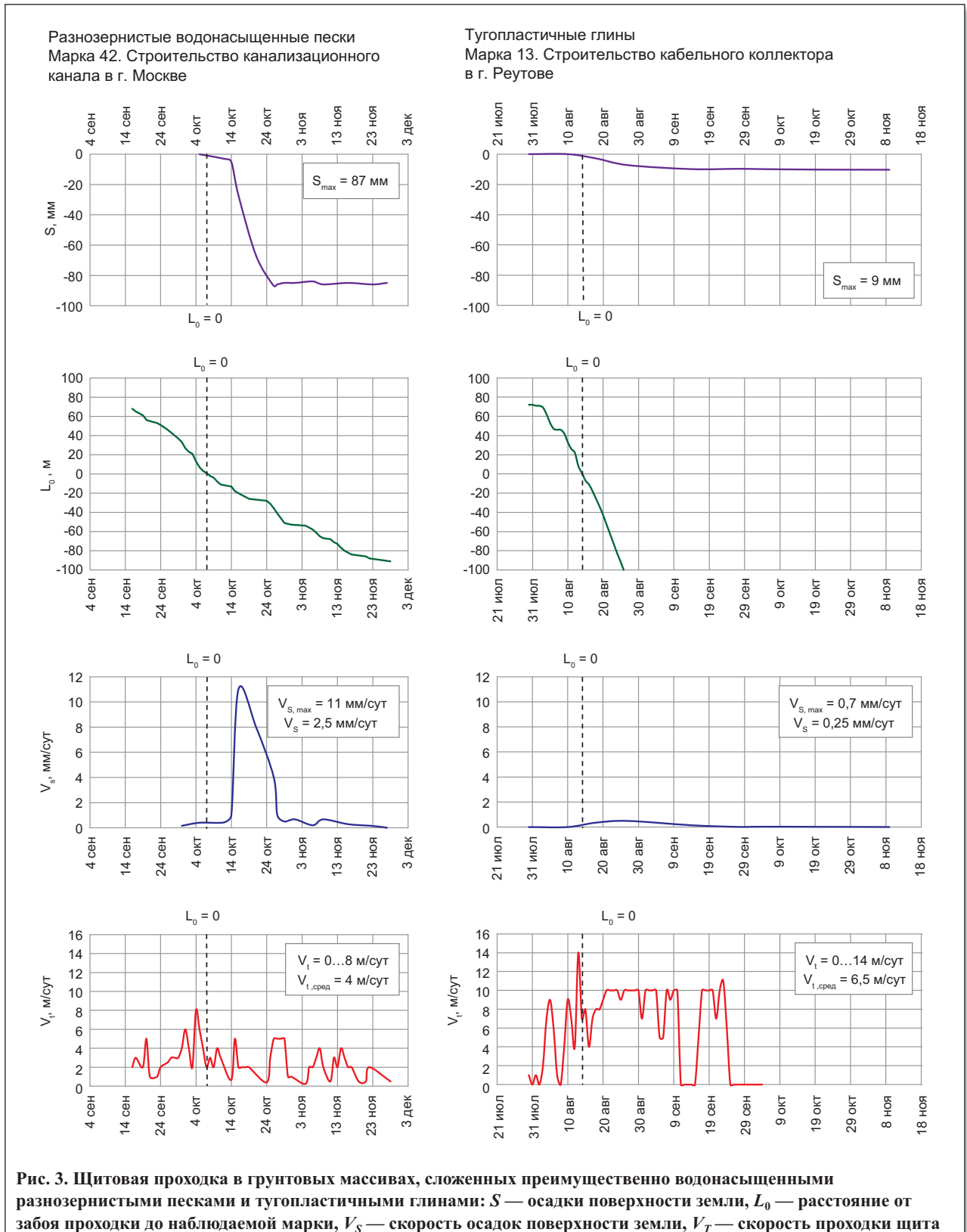
где  $S_{max}$  — максимальные осадки в мульде сдвижений поверхности земли, которые могут оцениваться, например, по формуле:

$$S_{max} = \pi V_L (D/2)^2 / 2,5i, \quad (3)$$

где  $V_L$  — перебор грунта при проходке тоннеля;  $D$  — наружный диаметр тоннеля;  $i = K(H + D/2)$  — расстояние от оси тоннеля до точки перегиба мульды осадок,  $K$  — параметр, зависящий от вида грунта.

Выражение (2) с учетом формул (1) и (3) может быть записано в виде:

$$V_S = [\pi V_L V_i (D/2)^2] / [2,5K(H + D/2) K_T H]. \quad (4)$$





Вопрос интенсивности деформаций тоннелируемых грунтовых массивов по сравнению с их продолжительностью исследован еще меньше.

В некоторых публикациях и документах подчеркивается большая неравномерность оседания поверхности земли во времени и особо выделяются периоды опасных интенсивных деформаций. Так, согласно инструкции [8] длительность опасных деформаций при средней скорости осадок  $V_s = 10 \div 30$  мм/мес. может составлять  $0 \div 30\%$  от их общей продолжительности.

### Методика экспериментальных исследований

В качестве экспериментальных данных использовались результаты измерений осадок грунтовых марок, установленных вдоль и поперек трасс проходки щитовых коммуникационных тоннелей, построенных в Московском регионе за последние несколько лет.

Проходка на опытных объектах выполнялась тоннелепроходческими механизированными комплексами с активным пригрузом. Разработка грунта осуществлялась рабочим органом роторного типа. Строительство тоннелей на трех объектах выполнялось ТПМК фирмы Herrenknecht (рис. 1), на одном — фирмы Lovat. Использовались щиты диаметром  $D$ , составлявшим 3,2 и 4,1 м. Тоннели устраивались на глубине  $H = 6 \div 14$  м. Проходка велась со скоростью  $V_i = 2 \div 10$  м/сут.

При проходке разрабатывались следующие характерные для условий г. Москвы грунты: водонасыщенные пески средней крупности, мелкие, пылеватые, средней плотности; суглинки тугопластичные. Толща массива грунта над тоннелем была представлена насыпными отложениями, разнозернистыми песками (влажными и водонасыщенными), глинистыми грунтами различной консистенции, алевролитами а также рядом специфических грунтов (торфами и др.).

Методика экспериментальных исследований состояла в следующем.

На *первом этапе исследований* анализировался характер кривых деформаций поверхности земли во времени, выделялись факторы, способные влиять на общую продолжительность  $T$  и скорость деформаций поверхности земли  $V_s$  при тоннелировании. В качестве таких факторов рассматривались:

- грунты, слагающие инженерно-геологический разрез между поверхностью земли и тоннелем;
- абсолютная ( $H$ ) и относительная ( $H/D$ ) глубина заложения тоннеля;
- средняя скорость продвижения щита  $V_i$ ;
- перебор грунта  $V_L$ .

В качестве обобщенной количественной характеристики инженерно-геологических условий был введен упрощенный показатель — коэффициент связности инженерно-геологического разреза  $K_c$ , отражающий удельный вес дисперсных связных грунтов и определяемый по формуле:

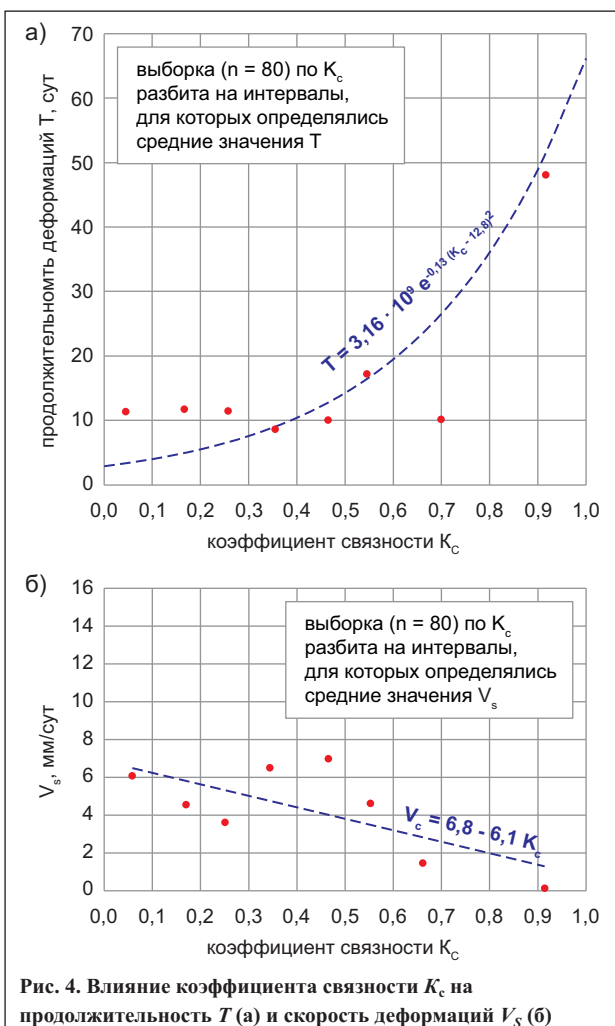


Рис. 4. Влияние коэффициента связности  $K_c$  на продолжительность  $T$  (а) и скорость деформаций  $V_s$  (б)

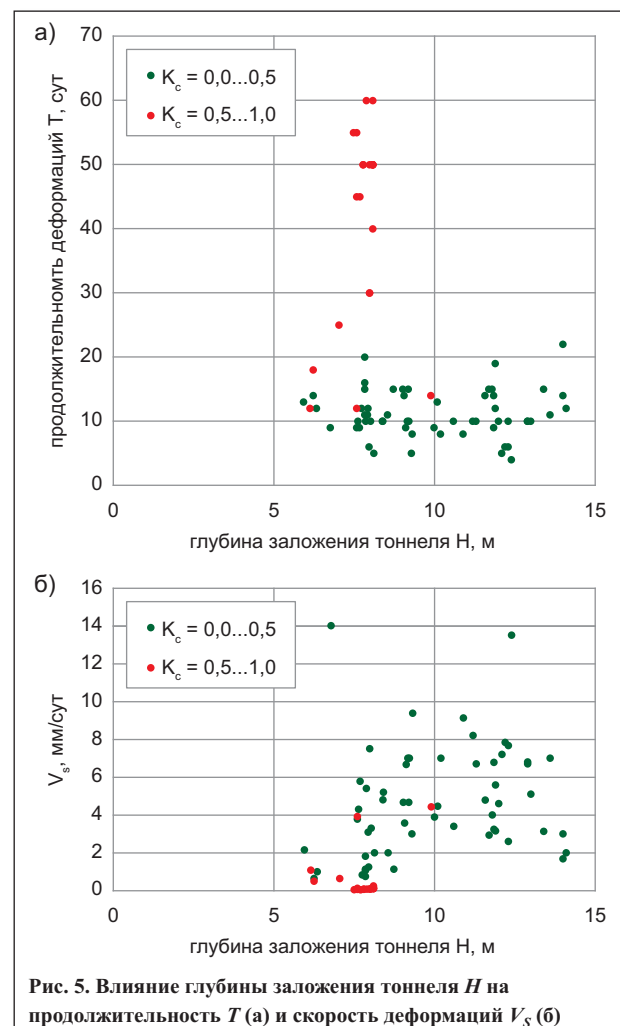


Рис. 5. Влияние глубины заложения тоннеля  $H$  на продолжительность  $T$  (а) и скорость деформаций  $V_s$  (б)

$$K_c = H (\beta_{\text{нссв}} \Sigma h_{\text{нссв}} + \beta_{\text{нас}} \Sigma h_{\text{нас}} + \beta_{\text{св}} \Sigma h_{\text{св}}) / H, \quad (5)$$

где  $\beta_{\text{нссв}}$ ,  $\beta_{\text{св}}$  — коэффициенты для несвязных и связных грунтов соответственно,  $\beta_{\text{нссв}} = 0$ ,  $\beta_{\text{св}} = 1$ ;  $\beta_{\text{нас}}$  — коэффициент, зависящий от связности насыпного грунта (если вид насыпного грунта неизвестен, то  $\beta_{\text{нас}} = 0,5$ );  $H$  — общая толщина грунтов в разрезе между поверхностью земли и тоннелем (рис. 2),  $H = \Sigma h_{\text{нссв}} + \Sigma h_{\text{нас}} + \Sigma h_{\text{св}}$ ;  $\Sigma h_{\text{нссв}}$  — суммарная толщина слоев несвязных грунтов;  $\Sigma h_{\text{нас}}$  — суммарная толщина слоев насыпных грунтов;  $\Sigma h_{\text{св}}$  — суммарная толщина слоев связных грунтов.

Правомерность введения коэффициента связности  $K_c$  объясняется тем, что дисперсные связные грунты в отличие от несвязных, как правило, обладают реологическими свойствами, существенно влияющими на длительность и интенсивность происходящих в грунтовом массиве сдвижений при его подработке. При  $K_c = 1$  толща грунтов над тоннелем сложена только связанными грунтами, деформации которых характеризуются максимальной длительностью и минимальной интенсивностью; при  $K_c = 0$  — наоборот.

Вместо упрощенного показателя  $K_c$  в принципе можно использовать и более сложные подходы, предполагающие применение показателей механических или физических свойств грунтов, данных статического зондирования и т.д., которые, вероятно, могут дать более точные оценки и прогнозы. Однако предложенный под-

ход из-за своей простоты крайне удобен в качестве экспресс-оценки и, как показано ниже, имеет неплохую надежность.

В формуле (5) разделение грунтов на связные и несвязные выполняется согласно существующей классификации [5], за исключением глин и сулинков с показателем текучести  $I_L > 0,75$ , супесей и других связных грунтов с  $I_L > 1,00$  (которые относят к несвязным из-за их низкой прочности, в первую очередь низкого сцепления, и способности быстро заполнять образующийся при тоннелировании зазор между обделкой и грунтом).

Скальные грунты в предложенной выше зависимости (5) не отражены. Это обусловлено тем, что, когда проходка тоннеля ведется в скальных грунтах (или под их защитой), деформации вышележащего грунтового массива отсутствуют или незначительны.

На *втором этапе исследований* для каждого выделенного фактора определялись его статистическая значимость и степень влияния. Было выявлено, что наибольшее влияние на общую продолжительность и скорость деформаций поверхности земли при тоннелировании оказывает вид грунта, расположенного между поверхностью земли и верхом тоннеля.

На *третьем этапе* с помощью регрессионного анализа была определена эмпирическая зависимость, отражающая влияние коэффициента связности грунта  $K_c$  на коэффициент  $K_T$  (см. формулу (1)).

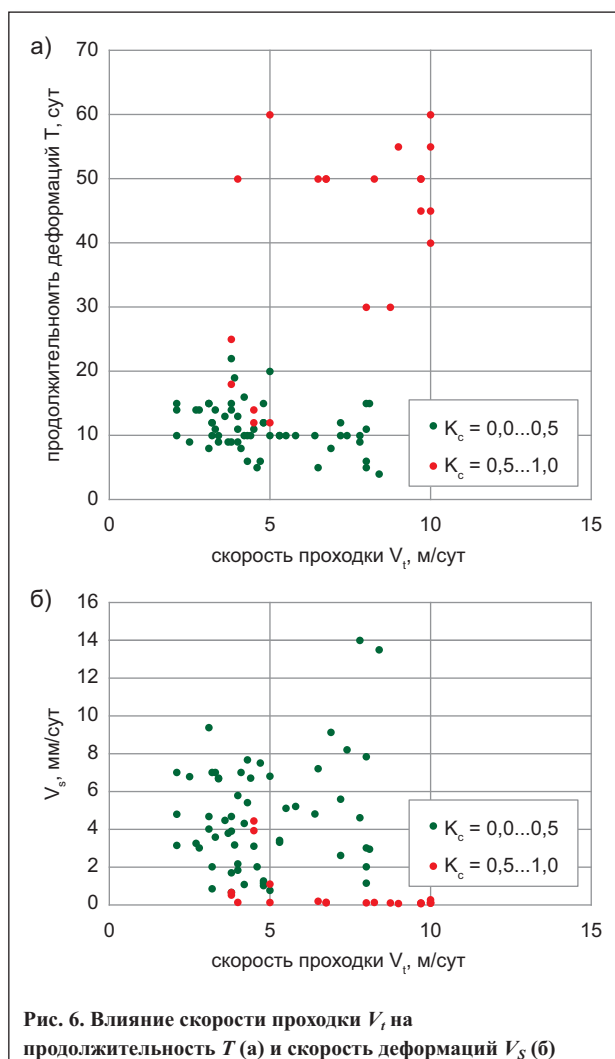


Рис. 6. Влияние скорости проходки  $V_t$  на продолжительность  $T$  (а) и скорость деформаций  $V_s$  (б)

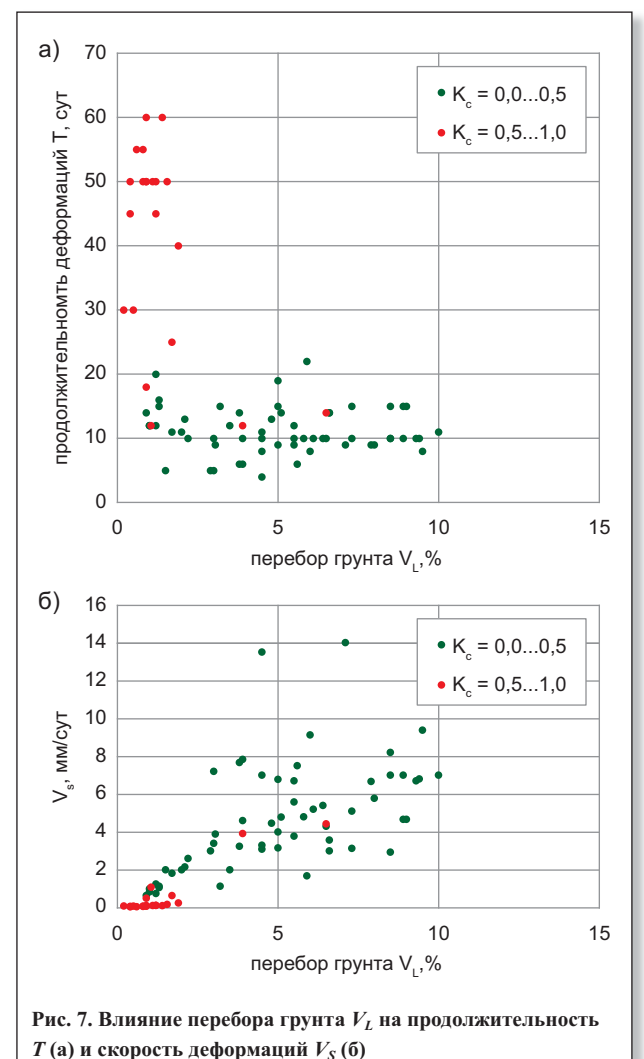


Рис. 7. Влияние перебора грунта  $V_L$  на продолжительность  $T$  (а) и скорость деформаций  $V_s$  (б)

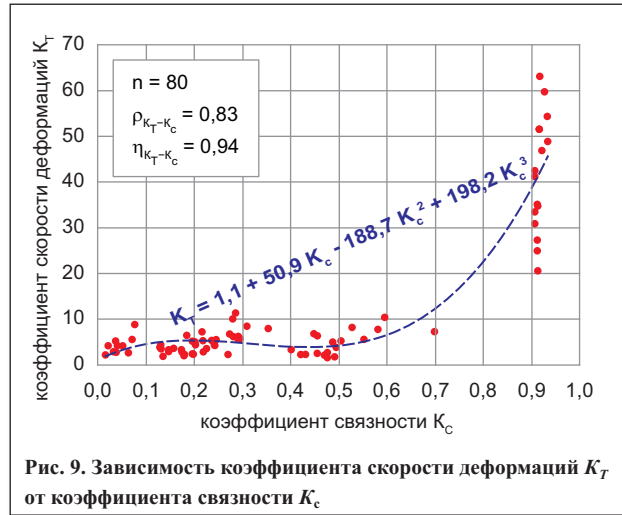
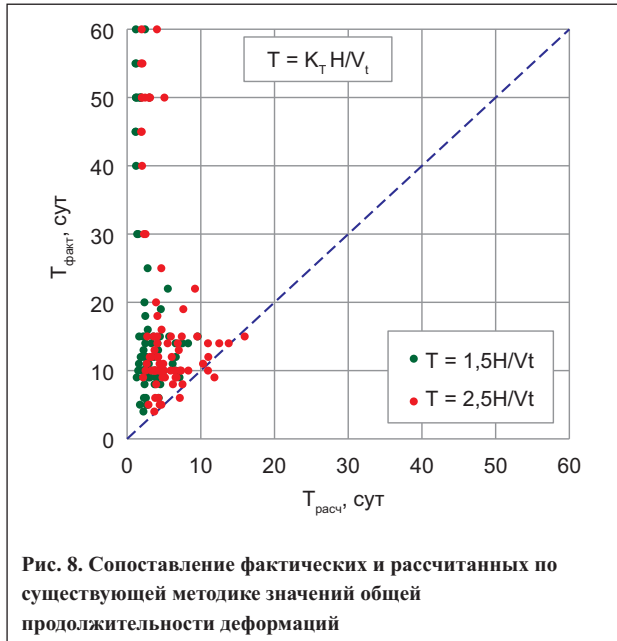


Рис. 9. Зависимость коэффициента скорости деформаций  $K_T$  от коэффициента связности  $K_c$

**Результаты экспериментальных исследований**

С целью изучения характера осадочных деформаций поверхности земли во времени  $t$  для опытных площадок были рассмотрены характерные временные кривые расстояния от забоя проходки до наблюдаемой марки  $L_0(t)$ , осадок  $S(t)$  и скорости осадок  $V_S(t)$  поверхности земли, скорости проходки щита  $V_T(t)$ , построенные для грунтовых марок, расположенных над трассой тоннеля.

В качестве примера на рис. 3 показаны характерные графики по двум экспериментальным площадкам, сложенным преимущественно водонасыщенными разнородными песками в одном случае и тугопластичными глинами в другом.

Анализ временных кривых, построенных для разных объектов, позволил отметить следующее:

- как правило, имеют место осадки; отмеченные незначительные подъемы грунта обусловлены, вероятно, избыточным давлением пригруза в забое щита (реже избыточным давлением нагнетания тампонажного раствора в заобделочное пространство);
- с увеличением связности грунтов максимальные осадки существенно уменьшаются, продолжительность осадок увеличивается, максимальные и средние скорости осадок уменьшаются;
- в момент прохождения щита под грунтовой маркой ее перемещения существенно меньше максимальных значений;
- в несвязных грунтах часто можно выделить три этапа осадок: (1) медленное нарастание; (2) резкие увеличение и снижение (иногда с небольшим участком примерно постоянной  $V_S$ ); (3) медленное снижение;
- в связных грунтах кривая осадок имеет значительно более плавный вид, характеризуемый постепенным увеличением осадок и после достижения точки перегиба их плавным снижением.

Результаты статистических исследований степени влияния различных факторов на общую продолжительность  $T$  и скорость деформаций  $V_S$  поверхности земли при тоннелировании представлены в табл. 1 и на рис. 4–7.

**Влияние различных факторов на общую продолжительность деформаций**

Анализ тесноты статистических связей показал, что наибольшее влияние на продолжительность деформаций грунта  $T$  оказывает коэффициент связности  $K_c$  (коэффициент корреляции  $\rho = 0,79$ ; корреляционное отношение  $\eta = 0,87$ ). Это хорошо иллюстрируют опытные данные на рис. 3, 4, а. Из последнего рисунка также видно, что зависимость  $T = f(K_c)$  носит явно нелинейный характер.

Глубина заложения тоннеля  $H$  слабо влияет на продолжительность осадок поверхности земли ( $\rho = -0,34$ ). Относительная же глубина  $H/D$  фактически не оказывает влияния на продолжительность осадок — коэффициент корреляции близок к нулю.

Скорость проходки  $V_t$  согласно табл. 1 оказывает более существенное влияние на продолжительность деформаций  $T$  ( $\rho = 0,52$ ;  $\eta = 0,71$ ). Кроме того, из рис. 6, а видно, что для преимущественно связных грунтов значения  $T$  в 3–10 раз выше, чем для несвязных. Для обоих типов грунтов также заметна тенденция к постепенному снижению продолжительности деформаций  $T$  с увеличением скорости проходки  $V_S$ .

Перебор грунта  $V_L$  также достаточно тесно связан с продолжительностью  $T$  ( $\rho = -0,55$ ;  $\eta = 0,71$ ). При разделении общей выборки данных по связности грунта

Таблица 1

Результаты корреляционного анализа влияния различных факторов на длительность $T$ и интенсивность $V_S$ деформаций поверхности земли*					
Характеристика	Фактор				
	$K_c$	$H$	$H/D$	$v_t$	$V_L$
$T$	$\frac{0,79}{0,87}$	$\frac{-0,34}{-}$	$\frac{-0,01}{-}$	$\frac{0,52}{0,71}$	$\frac{-0,55}{0,71}$
$V_S$	$\frac{-0,49}{0,62}$	$\frac{0,36}{0,55}$	$\frac{0,23}{0,60}$	$\frac{-0,18}{0,41}$	$\frac{0,73}{0,79}$

\* В числителе — коэффициент корреляции  $\rho$ , в знаменателе — корреляционное отношение  $\eta$ ;  $K_c$  — коэффициент связности;  $H, H/D$  — глубина и относительная глубина заложения тоннеля соответственно;  $V_t, V_L$  — скорость проходки и перебор грунта при тоннелировании соответственно.

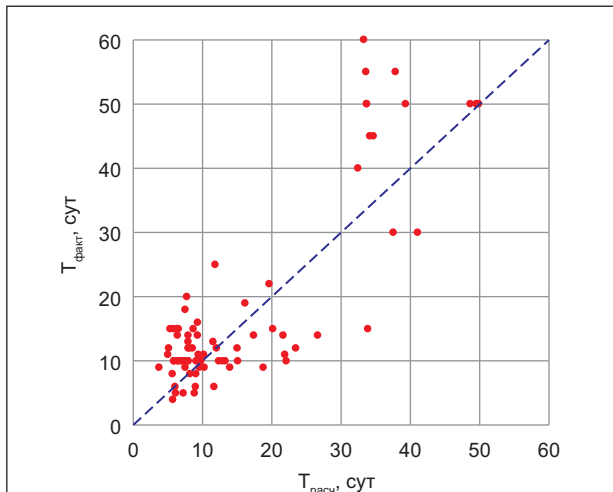


Рис. 10. Сопоставление фактических значений общей продолжительности деформаций с рассчитанными по адаптированной методике

(см. рис. 7, а) теснота корреляционных связей, очевидно, будет меньше.

### Влияние различных факторов на среднюю скорость деформаций

Анализ табл. 1 и рис. 4–7 показывает, что скорость деформаций поверхности земли  $V_S$  имеет наиболее тесную корреляционную связь с перебором грунта ( $\rho = 0,73$ ;  $\eta = 0,78$ ), причем связь эта близка к линейной, что хорошо согласуется с формулой (4). Наличие выявленной тесной статистической зависимости, вероятно, связано с тем, что оба эти параметра корреляционно связаны со степенью связности подрабатываемых грунтов. Подтверждением этого является, например, то, что максимальные значения скоростей осадок и потерь грунта отмечаются именно в водонасыщенных песках.

Коэффициент связности  $K_c$  существенно влияет на величину скоростей осадок  $V_S$  ( $\rho = -0,49$ ;  $\eta = 0,62$ ). Это хорошо иллюстрируют графики и диаграммы на рис. 2, 3, б.

Глубина заложения тоннеля  $H$  также влияет на скорость осадок  $V_S$ , хотя и в меньшей степени ( $\rho = 0,36$ ;  $\eta = 0,55$ ). Не вполне объяснимый характер связи (с увеличением глубины скорость увеличивается), очевидно, вызван тем, что в статистических расчетах не были учтены все влияющие факторы и сложный характер взаимовлияния факторов друг на друга.

Таблица 3

Сопоставление фактических и рассчитанных по предлагаемой методике значений общей продолжительности деформаций	
Статистические показатели	$T_{\text{факт}}/T_{\text{расч}}$
Объем выборки $n$	80
Коэффициент корреляции $\rho$	0,84
Корреляционное отношение $\eta$	0,85
Среднее значение $T_{\text{факт}}/T_{\text{расч}}$	1,3
Стандартное отклонение для $T_{\text{факт}}/T_{\text{расч}}$	0,6
Средняя ошибка $\Delta = T_{\text{факт}} - T_{\text{расч}}$	1,6

Таблица 2

### Сопоставление фактических и рассчитанных по существующей методике значений общей продолжительности деформаций

Статистические показатели	$T_{\text{факт}}/T_{\text{расч}}$ при $K_T$ равном	
	1,5	2,5
Объем выборки $n$	80	80
Коэффициент корреляции $\rho$	-0,38	-0,38
Корреляционное отношение $\eta$	0,47	0,47
Среднее значение $T_{\text{факт}}/T_{\text{расч}}$	9,8	5,9
Стандартное отклонение для $T_{\text{факт}}/T_{\text{расч}}$	12,9	7,7
Средняя ошибка $\Delta = T_{\text{факт}} - T_{\text{расч}}$	15,7	13,6

Скорость проходки  $V_t$  согласно табл. 1 и рис. 6, б оказывает слабое влияние на скорость осадок поверхности земли  $V_S$  ( $\rho = -0,18$ ;  $\eta = 0,41$ ). Из рисунка 6, а также видно, что для глинистых грунтов значения  $V_S$  в десятки раз меньше, чем для песчаных, что объясняется реологичностью первых.

### Прогноз продолжительности деформаций

С целью оценки достоверности определения продолжительности осадок поверхности земли  $T$  по формуле (1), заложенной в действующие нормативные документы [6, 8], была выполнена сравнительная оценка расчетных ( $T_{\text{расч}}$ ) и фактических ( $T_{\text{факт}}$ ) значений указанного параметра на основе использования результатов геотехнического мониторинга проходки ряда коммуникационных тоннелей в Московском регионе.

Поскольку в указанных документах для коэффициента  $K_T$  в формуле (1) приведен лишь диапазон значений  $1,5 \div 2,5$ , при выполнении проверки рассматривались только граничные варианты:  $K_T = 1,5$  и  $K_T = 2,5$ .

Результаты сопоставления расчетных и фактических значений общей продолжительности деформаций, а также соответствующие статистические показатели приведены на рис. 8 и в табл. 2. Анализ результатов сопоставления позволяет отметить следующее.

Расчетные значения общей продолжительности осадок поверхности земли существенно отличаются от экспериментальных значений, при этом почти все опытные точки лежат значительно выше линии абсолютной сходимости. Имеет место значительное (в среднем в  $5,9 \div 9,8$  раза) занижение фактического значения значения  $T$ . Коэффициент корреляции низкий и, что очень важно, с обратным знаком ( $\rho = -0,38$ ), что означает наличие обратно пропорциональной связи между расчетными и фактическими значениями  $T$ .

На основании изложенного можно сделать вывод о ненадежности приведенных в нормах [6, 8] указаний по определению общей продолжительности деформаций поверхности земли при тоннелировании. Это подтверждает приведенное выше замечание авторов о том, что зависимость (1) перенесена из методик, разработанных для добычи полезных ископаемых, в нормы [6, 8] без необходимой адаптации.

На основе экспериментальных исследований авторами был предложен уточненный вариант методики



Таблица 4

Коэффициент $K_T$ в формуле (1), назначаемый в зависимости от коэффициента связности толщи грунта над тоннелем $K_c$											
$K_T$	3,1	3,9	4,8	6,0	7,5	9,4	11,8	14,7	22,5	38,6	61,5
$K_c$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0

(1) для условий щитовой проходки коммуникационных тоннелей. Эта работа выполнялась в два этапа.

На первом этапе путем обратных расчетов, выполненных для каждой расчетной ситуации (для каждой наблюдаемой грунтовой марки), были получены фактические значения коэффициента скорости деформаций  $K_T$ , которые лежали в достаточно широком диапазоне ( $K_T = 1,6 \div 63,0$ ).

На втором этапе в результате корреляционно-регрессионного анализа была оценена степень тесноты связи  $K_T = f(K_c)$  и получена эмпирическая зависимость, позволяющая определять коэффициент скорости деформаций  $K_T$  по коэффициенту связности  $K_c$  подрабатываемых грунтов. Сопоставление параметров и статистические расчеты показали, что выборочный коэффициент корреляции  $\rho$  составляет 0,83, а выборочное корреляционное отношение  $\eta$  равно 0,94. Это свидетельствует о наличии тесной корреляционной связи между рассматриваемыми параметрами. Эмпирическая зависимость  $K_T = f(K_c)$  была получена в виде полинома 3-й степени:

$$K_T = 1,1 + 50,9K_c - 188,7 K_c^2 + 198K_c^3. \quad (6)$$

Сопоставление фактических величин общей продолжительности осадок поверхности земли  $T_{\text{факт}}$  с расчетными значениями  $T_{\text{расч}}$  показало, что предлагаемая методика в отличие от существующей имеет достаточную для практических целей точность (рис. 10, табл. 3). Опытные точки на рис. 10 лежат вблизи линии абсолютной сходимости. Фактические и расчетные значения исследуемого параметра близки между собой:  $T_{\text{факт}}/T_{\text{расч}} = 1,3$ . Коэффициент корреляции и корреляционное отношение имеют высокие и весьма близкие между собой значения:  $\rho = 0,84$ ;  $\eta = 0,85$ .

Предлагаемая методика может быть полезна на стадии проектирования для оценки длительности мониторинга окружающей застройки при проходке тоннелей. Для удобства ее практического применения предлагается таблица для определения  $K_T$  в зависимости от коэффициента связности  $K_c$  (табл. 4).

## Выводы

Вопросы прогноза длительности и интенсивности деформаций грунтовых массивов и оснований существующих зданий и сооружений при проходке тоннелей изучены крайне слабо, хотя являются крайне важными для совершенствования и разработки норм по геотехническому мониторингу и предотвращения аварийных ситуаций при тоннелировании.

Заложенные в действующие нормы немногочисленные положения по этим вопросам в основном взяты из документов по охране зданий и сооружений в зонах влияния горных работ при разработке угольных место-

рождений, причем в значительной степени без необходимой апробации и корректировки.

В данной статье приведены результаты экспериментальных исследований и выявленные при этом закономерности влияния различных факторов на общую продолжительность и скорость деформаций поверхности земли. Показано, что из всех факторов в наибольшей степени на них влияют виды подрабатываемых грунтов и их свойства. Остальные факторы влияют в меньшей степени.

На основе выполненных исследований предложена уточненная методика прогнозной оценки общей продолжительности деформаций поверхности земли применительно к щитовой проходке коммуникационных тоннелей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Букринский В.А., Орлов Г.В. Сдвигение горных пород и земной поверхности при подземных работах. М.: Недра, 1984. 247 с.
2. Викторов С.Д., Иофис М.А., Гончаров С.А. Сдвигение и разрушение горных пород. М.: Наука, 2005. 277 с.
3. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учебное пособие для вузов. М.: Высшая школа, 2003. 479 с.
4. ГОСТ 20522-96. Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний. М.: МНТКС, 1996.
5. ГОСТ 25100-2011. Грунты. Классификация. М.: Росстандарт, 2012.
6. ГОСТ Р 53778-2010. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. М.: Росстандарт, 2010.
7. Ильичев В.А., Никифорова Н.С., Тушиков М.М. Исследование деформирования грунтовых массивов при строительстве мелкозаглубленных коммуникационных тоннелей // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2011. № 3. С. 8–15.
8. Инструкция по наблюдениям за сдвигениями земной поверхности и расположенными на ней объектами при строительстве в Москве подземных сооружений. М.: Госгортехнадзор РФ. 1997. 76 с.
9. Пушилин А.Н., Фаворов А.В., Шейнин В.И. Метод расчета усилий в конструкциях зданий при деформировании основания из-за проходки подземной выработки // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2007. № 3. С. 2–6.
10. Руководство по расчету деформаций земной поверхности под влиянием горных разработок в Донбассе. М.: Углетехиздат, 1954.
11. Atewel P.B., Yeates J., Selby A.R. Soil movements induced by tunneling and their effects on pipelines and structures. Glasgow, UK: Blackie and Son Ltd., 1986. 325 p.
12. Technical manual for design and construction of road tunnels — civil elements. New York: US Department of Transportation, 2009. 702 p.