УДК 624.1

**М.А.КАРАСЕВ**, *канд. техн. наук, доцент, karasevma@gmail.com*
*Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет)*

**M.A.KARASEV**, *PhD in eng. sc., associate professor, karasevma@gmail.com*
*Saint Petersburg State Mining Institute (Technical University)*

# АНАЛИЗ ПРИЧИН ДЕФОРМАЦИИ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ И ХАРАКТЕР ФОРМИРОВАНИЯ МУЛЬДЫ ОСЕДАНИЯ, ВЫЗВАННОЙ СТРОИТЕЛЬСТВОМ ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ

Приведен анализ причин, вызывающих деформацию породы вокруг тоннеля и смещения его контура при использовании щитовых проходческих комплексов. Описан характер формирования мульды оседания земной поверхности в продольном и поперечном направлении, форма мульды оседания в пространственной системе координат. Рассмотрены полуэмпирические методы определения осадки земной поверхности, горизонтальных смещений и деформаций породы на поверхности земли. Приведены данные о потерях объема грунта, полученные по натурным наблюдениям.

***Ключевые слова***: тоннель, осадка, мульда оседания, грунт, геотехнология.

# TUNNEL INDUCED DEFORMATION OF STRATA AND FORMATION OF SURFACE SETTLEMENT TROUGHT DURING CONSTRUCTION PROCESS

Analysis of tunnel induced settlement due to tunnel development with a help of TBM is given in current article. Surface settlement trough and settlement profile in longitudinal and transverse directions is shown below. A brief analysis of semi-empirical method of tunnel induced settlement calculation and determination of strains around excavation is given. Volume loss is given based on the in-situ observation.

***Key words***: tunnel, settlement, surface trough, soil, geotechnology.

Строительство тоннелей, независимо от применяемой технологии их проведения, вызывает осадки земной поверхности. Точная форма мульды оседания земной поверхности, вызванная строительством тоннеля, зависит от многих факторов, но в общем виде она может быть представлена как поверхность (рис.1) [1].

Основные причины, вызывающие осадку земной поверхности при строительстве тоннелей и подземных сооружений, можно разделить на три следующие группы:

1. Мгновенные осадки, вызванные строительством тоннеля, и их величина зависят от устойчивости лба забоя, скорости ведения проходческих работ, времени, необходимого для установки обделки, и в случае использования щитовых комплексов – времени, необходимого на тампонаж пространства между обделкой и породой. Мгновенные осадки вдоль продольной оси тоннеля начинаются на некотором расстоянии впереди лба забоя и прекращаются после твердения и набора прочности тампонажного раствора.

2. Осадки, вызванные деформациями тоннельной обделки, особенное внимание вызывают при строительстве тоннелей или подземных сооружений большого поперечного сечения на незначительной глубине. Однако осадками такого типа можно пренебречь, если для строительства тоннеля используется щитовой комплекс, нагрузки на обделку которого можно спрогнозировать с достаточной точностью, а значительных величин деформаций обделки можно избежать за счет грамотного выбора параметров крепи.

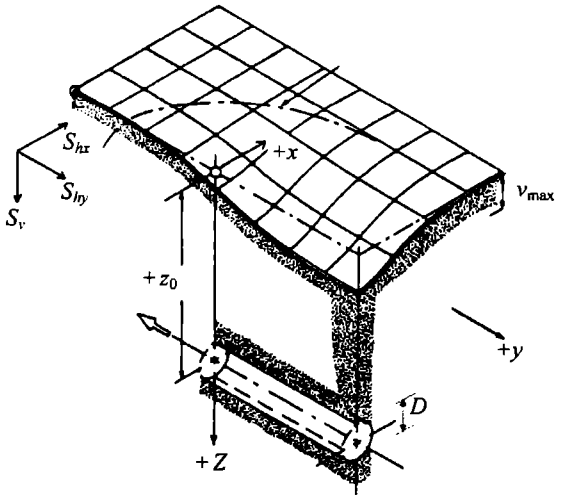



Рис.1. Форма мульды оседания земной поверхности, вызванная строительством транспортного тоннеля

3. Длительные осадки, вызванные первичной консолидацией грунтов (обычно к этому склонны связные или уплотняемые грунты в процессе рассеивания избыточного порового давления) и вторичной консолидацией грунтов (ползучесть грунтов, величина которой зависит от скорости, с которой уплотненный грунтовый скелет может сжиматься и течь).

Как показывает практика, мгновенные осадки реализуются в первые несколько дней (в зависимости от типа породы). Приблизительно такое же количество времени необходимо проходческому щиту для того, чтобы лоб забоя переместился на достаточное расстояние и проходческие работы не оказывали влияние на рассматриваемый участок. Macklin и Field (1999) отмечали, что мгновенные осадки реализуются в течение 24 ч до и после проведения тоннеля. С практической точки зрения можно считать, что они реализуются мгновенно.

Осадки в длительном периоде могут развиваться от нескольких недель и месяцев для песков и мягких глин до нескольких лет для плотных глин.

Отношение величины мгновенных осадок к величине осадок в длительном периоде зависит от многих факторов и с трудом поддается обобщению. Согласно натурным экспериментальным исследованиям, для типичного участка, сложенного плотными глинами, около 60 % осадок реализуется мгновенно [11, 15]. Однако в работе [2] показано, что длительные осадки в 2,5 раза могут превышать величину мгновенных осадок. Но при этом ширина мульды оседания также увеличивается и, следовательно, уменьшается относительный уклон поверхности земли. В длительном периоде времени сооружения, расположенные на земной поверхности, могут воспринять дополнительные ее осадки за счет реализации реологических свойств пород (ползучесть и релаксация). Таким образом, наиболее важными являются мгновенные осадки и им должно уделяться особое внимание.

Обобщенный полуэмпирический метод определения осадки земной поверхности для случая строительства одиночного тоннеля в однородных породах был предложен Attewell и Woodman [3]. Мульда оседания земной поверхности (рис.1), образующаяся в результате строительства тоннеля, может быть описана зависимостью

$$S = \frac{V_s}{\sqrt{2\pi} i_x} e^{-\frac{x^2}{2i_x^2}} \left[ G\left(\frac{y - y_i}{i_x}\right) - G\left(\frac{y - xy_f}{i_x}\right) \right], \quad (1)$$

где $S$ – величина осадки земной поверхности в точке $(x, y)$; $x$ – расстояние от рассматриваемой точки до продольной оси тоннеля; $y$ – координата точки по продольной оси тоннеля; $V_s$ – полезный объем мульды оседания земной поверхности; $y_i$ – начальная позиция тоннеля; $y_f$ – расположение лба забоя; $i_x$ – ширина мульды оседания, $i_x = kZ$; $k$ – безразмерная константа характеризующая параметры породы; $Z$ – расстояние от поверхности земли до продольной оси тоннеля; $G$ – функция распределения,

$$G = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\alpha} e^{-\frac{\alpha^2}{2}} d\alpha ; \; \alpha = \frac{y - y_i}{i} \quad (2)$$

Рассматривая характер мульды оседания земной поверхности (рис.1), можно выделить два основных направления развития осадок – поперечное и продольное.

*Осадка земной поверхности в поперечном направлении.* Peck R.B. [3] показал, что

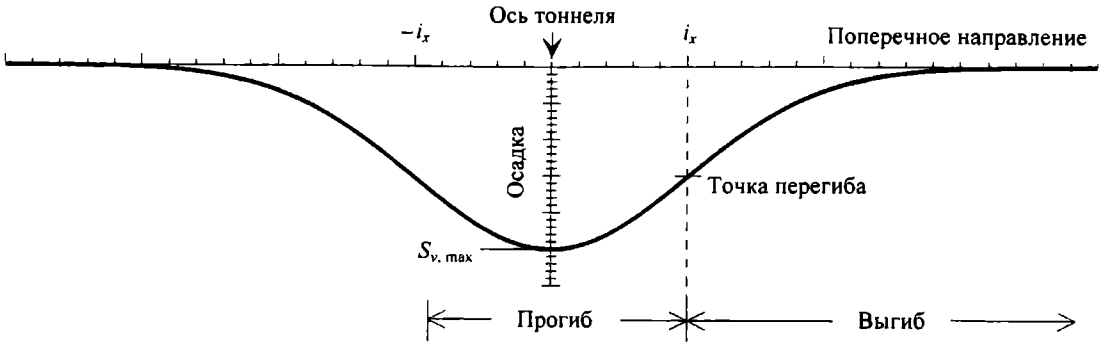



Рис.2. Осадка земной поверхности в поперечном направлении, вызванная строительством тоннеля [6]

мульду оседания земной поверхности в поперечном направлении можно описать функцией Гаусса, и такое описание получило широкое распространение при анализе вертикальных осадок в поперечном направлении,

$$S_v(x) = S_{v,\max} e^{-\frac{x^2}{2i_x^2}} \qquad (3)$$

где $S_{v,\max}$ – величина осадки земной поверхности над продольной осью тоннеля; $x$ – расстояние от центра тоннеля до рассматриваемой точки.

Типовой характер мульды оседания земной поверхности в поперечном направлении показан на рис.2. Максимальный наклон мульды оседания расположен в точке перегиба, которая располагается на расстоянии $i_x$ от центральной продольной оси тоннеля. Данная точка является ключевой для определения деформационного критерия здания. Точка перегиба отделяет зону выгиба от зоны прогиба.

Площадь, заключенная между начальным положением земной поверхности и кривой, описывающей характер ее оседания, после проведения проходческих работ равна

$$V_s = \int_{-\infty}^{+\infty} S_v dx = \sqrt{2\pi} i_x S_{v,\max}, \qquad (4)$$

где $V_s$ – объем мульды оседания земной поверхности на 1 м длины.

Для условий, когда осадки на земной поверхности от проведения проходческих работ реализовались полностью, уравнение (1) можно переписать в следующем виде:

$$S_v = S_{v,\max} e^{\left(-\frac{x^2}{2i_x^2}\right)} = \frac{V_l}{i_x^2\sqrt{2\pi}} e^{\left(-\frac{x^2}{2i_x^2}\right)} \qquad (5)$$

Метод для прогноза смещения породы в поперечном направлении, вызванного строительством тоннеля, был предложен в 1982 г. [12]. Вектор смещения направлен от точки рассмотрения к центру тоннеля:

$$S_x(x) = \frac{x}{Z} S_v(x), \qquad (6)$$

где $S_h(x)$ – величина горизонтальных смещений; $S_v(x)$ величина вертикальных смещений.

Величину горизонтальных деформаций найдем, продифференцировав $S_h(x)$ по $x$:

$$\varepsilon_h = \frac{dS_h(x)}{dx} = \frac{S_v(x)}{Z}\left(1 - \frac{x^2}{i_x^2}\right) e^{\left(-\frac{x^2}{2i_x^2}\right)} \qquad (7)$$

Отрицательное значение в уравнении говорит о том, что реализуются деформации сжатия, в то время как положительное значение деформаций означает, что реализуются деформации растяжения.

Максимальные горизонтальные смещения (рис.3) соответствуют точке перегиба мульды оседания земной поверхности. Максимальные деформации сжатия соответствуют точке с координатами $x = 0$, деформации растяжения $x = \sqrt{3i_x}$

*Осадка земной поверхности в продольном направлении.* Продольный профиль осадки земной поверхности, вызванной строительством тоннеля, можно получить, рассмат-

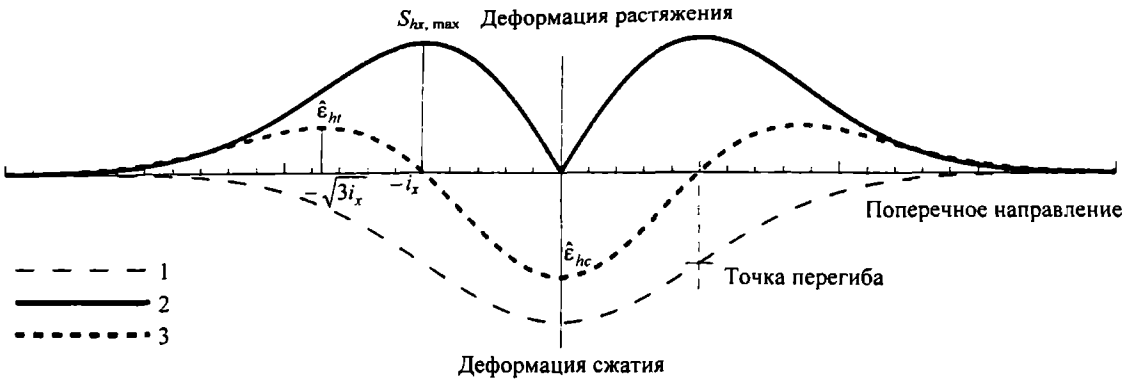



Рис.3. Характер распределения осадки земной поверхности в продольном направлении по оси тоннеля
1 – осадка поверхности; 2 – горизонтальные деформации; 3 – горизонтальные смещения

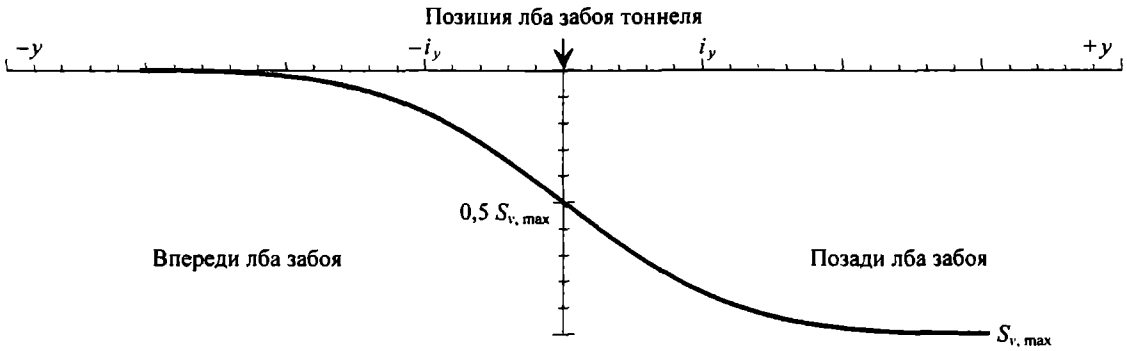



Рис.4. Характер распределения горизонтальных смещений и горизонтальных деформаций, вызванных строительством тоннеля

ривая тоннель как набор точечных источников в продольном направлении, каждый из которых вызывает осадку земной поверхности, наложив их друг на друга, можно найти общий профиль мульды оседания в продольном направлении [3].

Характер распределения осадки земной поверхности в продольном направлении по оси тоннеля (рис.4) можно получить, приравняв $x = 0$ в уравнении (1),

$$S_v(y) = \frac{V_S(y)}{\sqrt{2\pi i_x}}\left[G\left(\frac{y-y_i}{i_y}\right) - G\left(\frac{y-y_f}{i_y}\right)\right]. \quad (8)$$

Согласно зависимости (8), рост осадок наблюдается в положительном направлении $y$ и достигает максимума $S_{v,\max}$ при $y = \infty$, в то время как при $y = -\infty$ величина вертикальных осадок $S_{v,\max} = 0$. Величина осадки при $y = 0$ равна $S_{v,\max}/2$. В плотных глинах 30-50 % вертикальных осадок земной поверхности от $S_{v,\max}$ происходит впереди лба забоя тоннеля и среднее значение составляет 40 % [3].

Ширина профиля осадок земной поверхности в продольном направлении определяется $i_y$ (ширина мульды оседания в продольном направлении). Часто для практических расчетов принимают $i_x = i_y$. Attewell [4] сравнил величины $i_x$ и $i_y$ для различных инженерно-геологических и технологических условий. Хотя результаты показали, что мульда оседания в поперечном направлении несколько больше, чем в продольном, можно сделать вывод, что в общем случае взаимосвязь $i_x = i_y$ справедлива. В некоторых случаях, например при строительстве перегонного тоннеля в Лондоне (Nyren, 1998), было получено отношение $i_x / i_y = 3$. Однако, несмотря на такие различия, принято рассматривать размеры мульды оседания равными в продольном и поперечном направлениях.

Допустив, что результирующий вектор смещений направлен в сторону центра тоннеля, Attewell и Woodman [3] показали, что горизонтальные смещения породы в продольном направлении на поверхности земли можно определить по формуле

$$S_h(y) = \frac{V_s(y)d^2}{8Z} e^{-\frac{y^2}{2i_y^2}} \qquad (9)$$

Продифференцировав $S_h(y)$ по $y$, получим горизонтальные деформации в продольном направлении над центральной продольной линией тоннеля

$$\varepsilon_h(y) = -y\frac{V_s(y)d^2}{8i_y^2 Z} e^{-\frac{y^2}{i_y^2}} \qquad (10)$$

где растягивающие деформации (со знаком плюс) реализуются впереди лба забоя тоннеля, а сжимающие – позади.

В процессе ведения проходческих работ, на участке тоннеля, который не закреплен или частично закреплен, происходит смещение породы в сторону тоннеля. Таким образом, количество породы, которое вынимается из подземного пространства, всегда больше, чем теоретическое, посчитанное из проектного профиля тоннеля. Дополнительный объем породы $V_{sl}$, извлеченный из подземного пространства, носит название «потерянный объем» (*volume loss*) и определяется через параметр $V_l$, который является отношением между объемами извлеченной породы и самого тоннеля (определенному по внешнему диаметру тоннеля),

$$V_l = \frac{V_{sl}}{S_t \cdot 100}, \qquad (11)$$

где $S_t$ – площадь поперечного сечения тоннеля.

Потерянный объем является мерой нарушенности массива проходческими работами и вызывает развитие мульды оседания земной поверхности.

Для щитовой проходки Attewell выделил [5] четыре источника, приводящих к потерям объема и как следствие – осадкам земной поверхности (рис.5).

• Потери объема у лба забоя: порода перемещается в сторону незакрепленного лба забоя. Этот процесс вызван изменением напряженного состояния массива и как следствие радиальными смещениями породы, которые и выдавливают ее в сторону наименьшего отпора. Процесс вызывает развитие осадки земной поверхности впереди лба тоннеля.

• Потери объема, связанные с щитовым комплексом: заполнение пустого пространства между щитовым комплексом и породным массивом. Дополнительные потери объема могут быть связаны с некачествен-

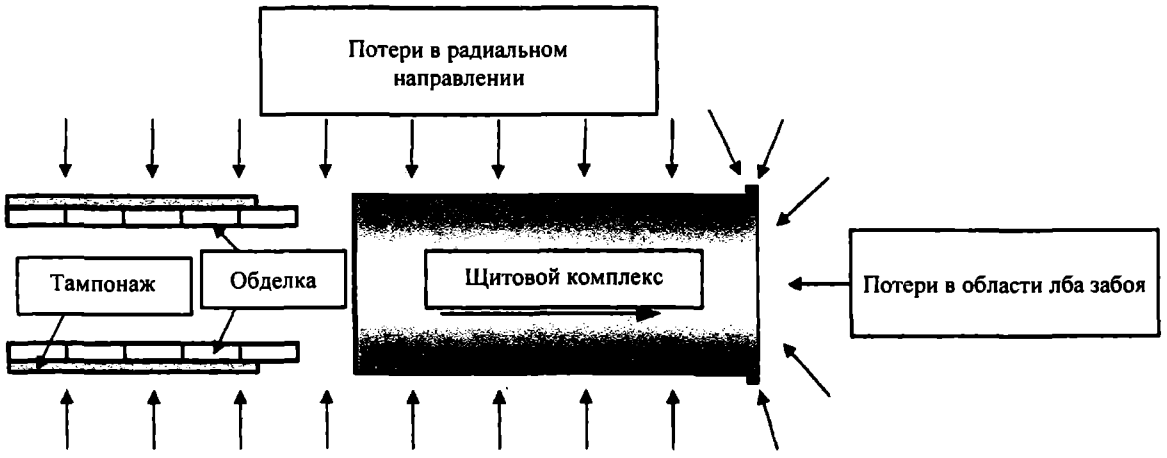



Рис.5. Источники потерь объема при строительстве тоннеля щитовым способом

ным выполнением работ или образованием пустот в блочных и трещиноватых грунтах.

• Потери объема, связанные с установкой обделки: при возведении обделки за щитом образуется пространство, незакрепленное обделкой, через которое порода может быть выдавлена в тоннель. После установки обделки все еще остается пространство между обделкой и породой, что может вызвать дополнительные радиальные смещения породы и осадки поверхности земли. Для минимизации этого эффекта обычной практикой является тампонирование пространства за обделкой или применение технологии с предварительным обжатием обделки на породу.

• Потери объема после проведения тампонажных работ: радиальные смещения продолжаются и после установки крепи и набора прочности тампонажным раствором. Это вызвано изменением напряженно-деформированного состояния массива и передачи нагрузки на обделку тоннеля, а также реологическими процессами, происходящими в породах.

Метод определения осадки земной поверхности «потери объема» является полуэмпирическим, основанным на теоретических изысканиях. Метод позволяет учесть основные параметры, которые влияют на величину осадки земной поверхности, вызванной строительством тоннеля: физико-механические свойства массива, технологию и последовательность ведения проходческих работ, параметры крепи и т.д. Необходимо отметить, что напрямую данные параметры не задаются, а вводятся через два комплексных коэффициента: $k_l$ – коэффициент для определения точки перегиба; $V_l$ – потери объема породы. Эти коэффициенты позволяют описать поверхность оседания земной толщи и определяются на основе экспериментальных исследований.

Максимальное значение осадки и расположение точки перегиба можно определить по следующим выражениям:

$$L_{inf} = k_l Z; \qquad (12)$$

$$S_{\max} = \frac{A_t V_l}{100} \frac{1}{\sqrt{2\pi L_{inf}}}, \qquad (13)$$

где $A_t$ – площадь сечения тоннеля.

Величину деформаций кровли можно определить по формуле

$$u_a = \frac{2r_t - \sqrt{4r_t^2 - \frac{4r_t^2 V_l}{100}}}{2}, \qquad (14)$$

где $r_t$ – радиус тоннеля вчерне.

Рекомендуемые значения коэффициента $k_l$ для различных типов грунтов и горных пород:

| Тип грунта или горной породы | Коэффициент $k_l$ |
|---|---|
| Бессвязные грунты | 0,3 |
| Нормально уплотненные глины | 0,5 |
| Переуплотненные глины | 0,6-0,7 |
| Глинитый сланец | 0,6-0,8 |
| Кварцит | 0,8-0,9 |

Рекомендуемые значения коэффициента $V_l$ в зависимости от технологии проведения тоннеля:

| Технологии проведения тоннеля | Коэффициент $V_l$ |
|---|---|
| С использованием механизированного проходческого комплекса с раскрытием тоннеля на все сечение | 0,5-1,0 |
| С поэтапным раскрытием сечения тоннеля | 0,8-1,5 |

Несколько зависимостей было предложено для оценки потерь объема $V_l$ на основании критерия устойчивости обнажения [6]

$$N = \frac{\sigma_v - \sigma_t}{s_u}, \qquad (15)$$

где $\sigma_v$ – вертикальные напряжения на уровне оси тоннеля (включая пригрузку на поверхности земли); $\sigma_t$ – давление, вызванное отпором крепи; $s_u$ – прочность породы на сдвиг, полученная по результатам недренированных испытаний.

Параметры грунта в зависимости от величины критерия устойчивости $N$ [8]:

| Состояние массива | $N$ |
|---|---|
| Грунты (горные породы), находящиеся в непосредственной близости от тоннеля, устойчивы и работают в упругой зоне | < 2,0 |
| Образование местных зон пластических деформаций в непосредственной близости от контура тоннеля | 2,0-2,4 |
| Образование значительных зон пластических деформаций в непосредственной близости от тоннеля | 2,4-4,6 |
| Потеря устойчивости лба забоя | > 6,0 |

В 1980 г. Davis [7] показал, что для тоннелей неглубокого заложения критерий устойчивости зависит от глубины. В 1981 г. Mair [9] разработал методику, которая позволила учесть этот фактор,

$$LF = \frac{N}{N_{tc}}, \qquad (16)$$

где $N$ – критерий устойчивости обнажения для условий эксплуатации; $N_{tc}$ – критерий устойчивости при обрушении породы в обнажение.

Результаты численного моделирования (плоскодеформационная постановка) и лабораторных испытаний на центрифугах (рис.6) показали, что потери объема $V_l$ меньше 3 % при $LF < 0{,}5$.

Величина смещений контура тоннеля, вызывающих потерю объема грунта, является функцией от типа породы, технологии и скорости ведения проходческих работ, размеров тоннеля, типа и жесткости применяемых крепей. Потери объема грунта вызваны двумя факторами – потерями в радиальном направлении со стороны стен тоннеля и потерями со стороны лба забоя. Потери грунта приводят к осадкам земной поверхности, чем больше величина $V_l$, тем более серьезные повреждения получат здания и сооружения, расположенные на поверхности. Полезный объем мульды оседания земной поверхности $V_s$ в общем случае можно приближенно считать равным величине дополнительного объема грунта, извлеченного из подземного пространства $V_{sl}$. Если грунт является недренированным (постоянный объем), то $V_s = V_{sl}$. Если условия проведения тоннеля соответствуют дренированному состоянию, а грунты – это плотные пески, то значение $V_s$ в общем случае будет меньше $V_{sl}$ – эффект дилатансии (Cording, 1975). Для грубых расчетов можно принять допущение $V_s = 0{,}7V_{sl}$. В рыхлых грунтах значение $V_s$ может быть больше $V_{sl}$, это связано с уплотнением грунтов.

Исследования показали, что при производстве проходческих работ щитовыми комплексами с гидропригрузом забоя в песчаных и гравелистых грунтах величина потерь объема породы невелика ($V_l < 0{,}5$ %), в то время как в глинситых грунтах значение $V_l$ находится в диапазоне 1-2 %. Эти данные не учитывают осадки в длительном периоде времени. Leblais и Bochon (1991) отмечали, что потери объема породы $V_l$ находятся в диапозоне 0,2-0,9 % для тоннеля диаметром 9,25 м, проводимого через плотные мелкие пески. Глубина расположения тоннеля изменялась от 22 до 52 м. Величина $V_l$ изменялась от 0,8-1,3 % на участке мелкого заложения при глубине до поверхности от 4,1 до 7,2 м. Потери объема грунта при строительстве тоннеля диаметром 9,48 м щитовым комплексом с гидропригрузом забоя в Каире в песках плотных и средней плотности составили 0,2-1 %. Глубина заложения тоннеля 16 м, ниже уровня подземных вод.

Параметр $i$ определяет ширину мульды оседания поверхности земли. В поперечном направлении $i$ является расстоянием от центра тоннеля до точки перегиба поверхности оседания. O'Reilly & New (1982) представили данные о строительстве тоннелей в глинах, на основании результатов которых построен график зависимости (рис.7) $i$ от глубины заложения тоннеля $Z$, который можно описать функцией $i = 0{,}43\,Z + 1{,}1$ для связных пород; $i = 0{,}28\,Z - 0{,}1$ для бессвязных пород.

Позже Rankin [14] представил результаты схожих исследований, которые подтвердили правильность подхода O'Reilly & New. Для глинистых пород им была получена зависимость $i = 0{,}5\,Z$.

Kimura & Mair [10] получили схожие результаты в лаборатории, проводя испытания на центрифуге.

Наблюдение за осадками земной поверхности, вызванных строительством тоннеля диаметром 6,05 м, щитовым проходческим комплексом с компенсацией давления горных пород сжатым воздухом, в породах, представленных рыхлыми илистыми песками и мягкими глинами, показали, что осадка земной поверхности в основном реализуется в хвостовой части щитового комплекса и связана с наличием незаполненного пространства в хвостовой части. Лишь незначительная часть осадки земной поверхности реализовалась впереди лба за-

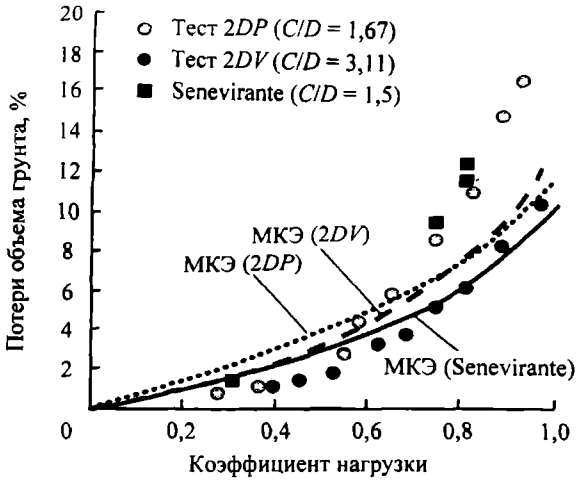



Рис.6. Зависимость между величиной относительной устойчивости тоннеля и потерей объема $V_l$ [9]

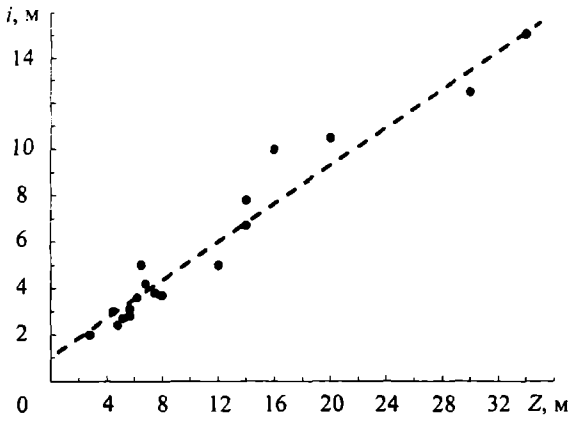



Рис.7. Зависимость между расстоянием до точки перегиба $i$ и расстоянием от поверхности земли до центра тоннеля $Z$

боя. Схожие наблюдения были получены Namoto (1995) при строительстве тоннелей в Японии щитовым комплексом с гидропригрузом забоя и под избыточным давлением. Данные наблюдений, полученные в Каире при строительстве тоннеля диаметром 9,48 м щитовым комплексом с гидропригрузом забоя, на глубине 16 м от поверхности земли, в песках средней плотности, с подстилающим слоем глины, показали, что осадка поверхности земли впереди лба забоя составляет (0,25 – 0,3) $S_{max}$.

Несмотря на то, что в грунтах сложного строения происходят потери объема, величина и характер могут значительно отличаться от полученных по полуэмпирическим методам по следующим причинам:

• потери объема, вызванные строительством тоннеля, не полностью передаются на земную поверхность вследствие наличия прочной прослойки пород выше залегания тоннеля;

• потери объема будут распространяться в строну слабых грунтов, что приведет к развитию ассиметрии в мульде оседания земной поверхности;

• при строительстве тоннелей даже в полускальных и скальных породах наличие участков ослабления и нарушений может вызвать дополнительные осадки земной поверхности;

• наличие в забое смешанных пород в общем случае приводит к повышенной потери объема грунта в сравнении с однородными породами;

• хрупкое поведение породы может вызвать задержку в реализации осадки земной поверхности.

Еще одним ограничением полуэмпирических методов является расчет продольных осадок земной поверхности по трассе строящегося тоннеля. Согласно этому расчету примерно 50 % вертикальных осадок $S_{max}$ реализуется впереди лба забоя тоннеля. Хотя данное допущение вполне приемлемо для стандартных методов строительства тоннелей, где осадки земной поверхности вызваны в первую очередь деформацией массива впереди забоя, допущение несправедливо для тоннелей, пройденных щитовыми проходческими комплексами (с компенсацией давления горных пород сжатым воздухом, с гидропригрузом забоя).

Приведенные полуэмпирические зависимости позволяют достаточно быстро и с высокой степенью надежности оценить осадку земной поверхности и деформационные процессе в породном массиве. Но достаточно часто в тоннелестроении возникают ситуации, которые невозможно спрогнозировать данными методами, например строительство тоннелей в неоднородных породах, учет взаимовлияния тоннелей, форма тоннеля и т.д. Это вызывает дополнительные требования к методам расчета осадки земной поверхности, в частности, использования математического моделирования, основанного на численных методах анализа.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Attewell P.B. Yeates J., Selby A.R.* Soil movements induced by tunneling and their effects on pipelines and structures. Glasgo, Blackie, 1986.

2. *Attewell P.B., Selby A.R.* Tunnelling in compressible soils: Large ground movements and structural implications // Tunnelling and Underground Space Technology. 1989. № 4.

3. *Attewell P.B., Woodman J.P.* Predicting the dynamics of ground settlement and its derivatives caused by tunnelling in soil // Ground Engineering. 1982. 15 (8).

4. *Attewell P.B., Yeates J., Selby A.R.* Soil movements indced by tunnelling and their effects on pipelines and structures. Glasgo. Blackie, 1986.

5. *Attewell P.B.* Ground movements caused by tunnelling in soil // Large ground movements and structures. London: Pentech Press, 1978.

6. *Broms B.B., Bennermark H.* Stability of clay in vertical openings // Journal of Soil Mechanics and Foundations. ASCE. 1967. 193.

7. *Davis E.H., Gunn M.J., Mair R.J., Seneviratne H.N.* The stability of shallow tunnels and underground openings in cohesive material // Géotechnique. 1980. 30 (4).

8. *Lake L.M., Rankin W.J., Hawley J.* Prediction and effects of ground movements caused by tunnelling in soft ground beneath urban areas / CIRIA Funders Report. 1992.

9. *Mair R.J., Gunn M.J., O'Reilly M.P.* Ground movements around shallow tunnels in soft clay / Proc. 10-th ICSMFE. Vol.1. Rotterdam: Balkema, 1981.

10. *Mair R.J.* Centrifugal modelling of tunnel construction in soft clay / Thesis (PhD). University of Cambridge, 1979.

11. *Morton K., Au E.* Settlement observations on eight structures in London / Proc. Conf. Settlement of Structures, Cambridge. London: Pentech Press, 1975.

12. *O'Reilly M.P., New B.* Settlement above tunnels in the United Kingdom- their magnitude and prediction / Proc. Int. Symposium Tunnelling-82. London: Institution of Mining and Metallurgy. 1982.

13. *Peck R.B.* Deep excavations and tunnelling in soft ground / Proc. 7-th ICSMFE. Mexico, 1969.

14. *Rankin W.J.* Ground movements resulting from urban tunnelling: predictions and effects / Engineering geology of underground movements; the Geological Society. London, 1988.

15. *Simons N.E., Som N.N.* Settlement of structures on clay with particular emphasis on London clay / CIRIA Report 22, 1970.



## REFERENCES

1. *Attewell P.B. Yeates J., Selby A.R.* Soil movements induced by tunneling and their effects on pipelines and structures. Glasgo, Blackie, 1986.

2. *Attewell P.B., Selby A.R.* Tunnelling in compressible soils: Large ground movements and structural implications // Tunnelling and Underground Space Technology. 1989. № 4.

3. *Attewell P.B., Woodman J.P.* Predicting the dynamics of ground settlement and its derivatives caused by tunnelling in soil // Ground Engineering. 1982. 15 (8).

4. *Attewell P.B., Yeates J., Selby A.R.* Soil movements indced by tunnelling and their effects on pipelines and structures. Glasgo. Blackie, 1986.

5. *Attewell P.B.* Ground movements caused by tunnelling in soil // Large ground movements and structures. London: Pentech Press, 1978.

6. *Broms B.B., Bennermark H.* Stability of clay in vertical openings // Journal of Soil Mechanics and Foundations. ASCE. 1967. 193.

7. *Davis E.H., Gunn M.J., Mair R.J., Seneviratne H.N.* The stability of shallow tunnels and underground openings in cohesive material // Géotechnique. 1980. 30 (4).

8. *Lake L.M., Rankin W.J., Hawley J.* Prediction and effects of ground movements caused by tunnelling in soft ground beneath urban areas / CIRIA Funders Report. 1992.

9. *Mair R.J., Gunn M.J., O'Reilly M.P.* Ground movements around shallow tunnels in soft clay / Proc. 10-th ICSMFE. Vol.1. Rotterdam: Balkema, 1981.

10. *Mair R.J.* Centrifugal modelling of tunnel construction in soft clay / Thesis (PhD). University of Cambridge, 1979.

11. *Morton K., Au E.* Settlement observations on eight structures in London / Proc. Conf. Settlement of Structures, Cambridge. London: Pentech Press, 1975.

12. *O'Reilly M P., New B.* Settlement above tunnels in the United Kingdom- their magnitude and prediction / Proc. Int. Symposium Tunnelling-82. London: Institution of Mining and Metallurgy. 1982.

13. *Peck R.B.* Deep excavations and tunnelling in soft ground / Proc. 7-th ICSMFE. Mexico, 1969.

14. *Rankin W.J.* Ground movements resulting from urban tunnelling: predictions and effects / Engineering geology of underground movements; the Geological Society. London, 1988.

15. *Simons N.E., Som N.N.* Settlement of structures on clay with particular emphasis on London clay / CIRIA Report 22, 1970.