УДК 622.831.1

**Е.М.ВОЛОХОВ, В.Н.ГУСЕВ, Ю.В.ЛИР**
*Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет)*

# К ВОПРОСУ ВЫБОРА ГРАНИЧНОГО КРИТЕРИЯ ДЛЯ МУЛЬДЫ СДВИЖЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД В МАССИВЕ НАД СООРУЖАЕМЫМ ТОННЕЛЕМ

Излагается способ определения граничного критерия для мульды сдвижения горных пород в массиве над сооружаемым тоннелем при использовании двухслойных расчетных схем в прогнозах оседаний земной поверхности. Предлагаемый способ применяется для условий проходки тоннелей Санкт-Петербургского метрополитена.

In the given work the way of definition of boundary criterion for a zone of deformations of rocks in a file above a builded tunnel is stated at use of two-layer settlement circuits in forecasts of deformations of a terrestrial surface. The method is applied to conditions of a construction of tunnels of the St.-Petersburg underground.

Теоретическое описание развития сдвижений в неоднородных толщах горных пород при сооружении тоннелей сопряжено с серьезными трудностями математического характера. Поэтому вся задача предрасчета сдвижений при сооружении тоннелей разделялась на две части [1, 4, 6, 7]. В первой части максимально достоверно описывается аналитически в сдвижениях поведение массива вблизи проходимой выработки в пределах однородной толщи пород. Во второй части производится построение мульд сдвижений на земной поверхности, основанием для которого служат основные параметры мульды сдвижения из первой части предрасчета (рис.1).

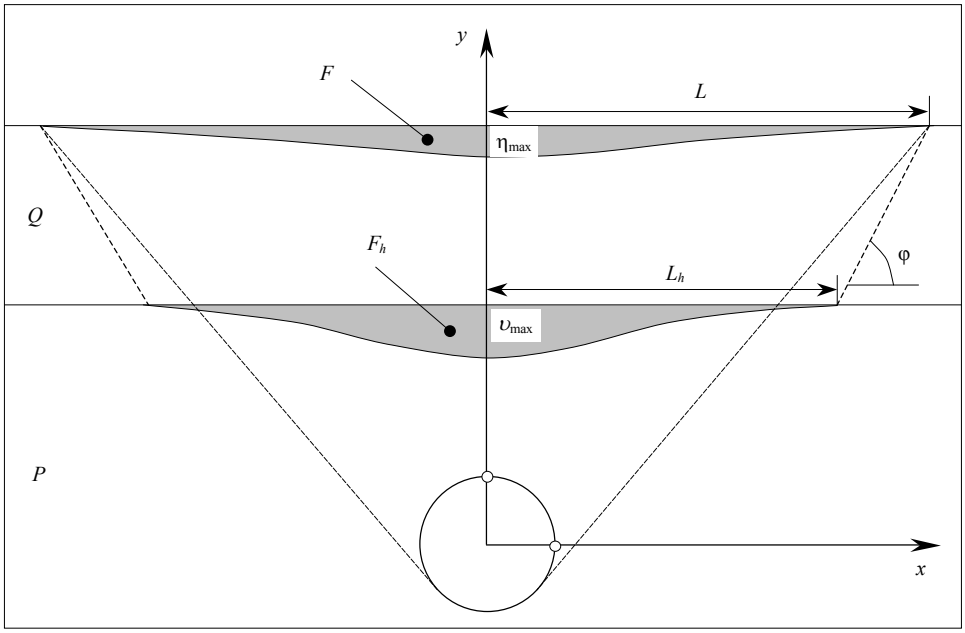



Рис.1. Общая схема расчета мульды сдвижения на земной поверхности

*Q* – четвертичная толща; *P* – протерозойская толща; $\eta_{max}$, $\upsilon_{max}$ – максимальные оседания в мульдах сдвижения соответственно на поверхности и на контакте; *L*, $L_h$ – длины полумульд сдвижения соответственно на поверхности и на контакте; *F*, $F_h$ – площади в главном сечении мульд сдвижения

Выделение границ однородной толщи пород носит весьма условный характер, так как реальные геологические разрезы редко позволяют провести в них четкие границы, а если таковые и имеются, то возникают проблемы при аппроксимации их на разрезе прямыми линиями.

В работе Ю.А.Лиманова [4] вся толща пород над тоннелями делится на четвертичную и протерозойскую. Верхняя четвертичная толща отождествляется с жидкостью (из-за низкого сцепления, сильной обводненности и подвижности пород этой толщи), нижней протерозойской толще присваиваются характеристики упругой однородной невесомой среды. Анализ геологических данных, для которых Ю.А.Лиманов построил расчетную схему, показывает, что между четвертичной и протерозойской толщами нет ярко выраженных границ. Верхние слои протерозоя представлены переходным слоем, являющимся продуктом гляциотектонических процессов, его характеристики неоднородны по слою и меняются от свойственных протерозою до характеристик, свойственных четвертичным отложениям. Нижняя часть четвертичных отложений представлена слоями моренных отложений с весьма похожими на переходный слой характеристиками.

Подобные обстоятельства, не позволяющие во многих случаях выделить в массиве две резко отличающиеся по свойствам толщи, осложняют задачу выявления необходимой для расчетной схемы границы толщ. С другой стороны, с удалением от выработки влияние резко снижается, значение градиентов деформаций резко уменьшается, характер сдвижений становится более однородным, а значит вид мульд сдвижений от слоя к слою меняется все менее значительно. Как показывает анализ аналитических решений, уже при удалении от выработки на величину ее диаметра все основные параметры мульд сдвижений от слоя к слою меняются весьма незначительно. Следовательно, задача выбора точного местоположения мульды сдвижения на контакте коренных и четвертичных отложений становится не столь актуальной. В этом случае можно рекомендовать в качестве границы контакта двух толщ выбирать самую близкую к тоннелю в верхней части массива из всех возможных. Так, для условий проходки тоннелей метрополитена в Санкт-Петербурге следует в качестве границы принимать уровень почвы переходного слоя протерозойских глин.

На основе аналитического решения в смещениях, учитывающего все основные факторы, и достоверных исходных данных (в том числе и деформационных свойствах пород) появляется возможность определить основные параметры мульды сдвижения на контакте коренных и четвертичных отложений. Фиксируя вертикальную координату в аналитических формулах для распределений горизонтальных и вертикальных составляющих смещений [3, 5], мы получаем выражения для контура мульды, как функции от горизонтальной координаты:

$$u_h = u_h(x) = u(x, h);\ \upsilon_h = \upsilon_h(x) = \upsilon(x, h), \quad (1)$$

где $u(x, y)$ и $\upsilon(x, y)$ – аналитические функции распределений соответственно горизонтальной и вертикальной составляющих смещений из теоретического решения.

Для получения наклонов и кривизны можно использовать известные формулы:

$$i_h = \frac{\partial \upsilon_h}{\partial x};\ k_h = \frac{\partial^2 \upsilon_h}{\partial x^2}. \quad (2)$$

Следует отметить, что формулы (2) являются приближенными так как не учитывают распределение горизонтальной составляющей сдвижений $u_h$, несколько изменяющей контур мульды, а следовательно и величины наклонов и кривизны, однако погрешность, вносимая подобным упрощением даже в нашем случае (случае сдвижений при проходке тоннелей), соизмеримых по величине $u_h$ и $\upsilon_h$, пренебрежима мала.

К основным параметрам мульды сдвижений прежде всего относятся: максимальное оседание $\upsilon_{max}$, длина полумульды $L_h$ ($x_г$) и площадь мульды сдвижения $F_h$ (рис.1).

Если для максимального оседания процедура получения выражения выглядит вполне очевидной

$$\upsilon_{max} = \upsilon(h, 0),$$

то для остальных основных параметров мульды на контакте задача несколько усложняется. Здесь $h$ – отметка мульды относительно оси тоннеля.

Расчет длины полумульды $L_h$ и площади мульды $F_h$ на контакте толщ тесно связан с определением граничного критерия этой мульды, потому что особенностью теоретического решения является отсутствие четких границ мульды. Так, нулевому оседанию соответствует длина полумульды, равная бесконечности и наоборот (рис.1, 2).

Проблема определения граничного критерия для мульды сдвижения контакта толщ может быть решена на основе приобщения эмпирических данных. Так, в работе [4] в качестве граничного критерия для мульды сдвижения на контакте принята погрешность геодезического определения отметок в 10 мм. Однако, как показывает анализ контура мульды, прямое использование данной величины приводит к весьма завышенным значениям длин полумульды. Ю.А.Лиманов [4] использует в качестве граничного критерия величину $2a$, где $a$ является функцией, зависящей от глубины заложения в толще глин и диаметра тоннеля.

Наиболее целесообразным было бы использование критерия, связанного с точностью геодезических измерений на поверхности (ведь именно ими определяются границы мульд на земной поверхности) и мощностью четвертичных пород над тоннелем. Большой объем натурных данных по сдвижениям позволяет подойти к задаче нахождения граничного критерия, в основу кото-

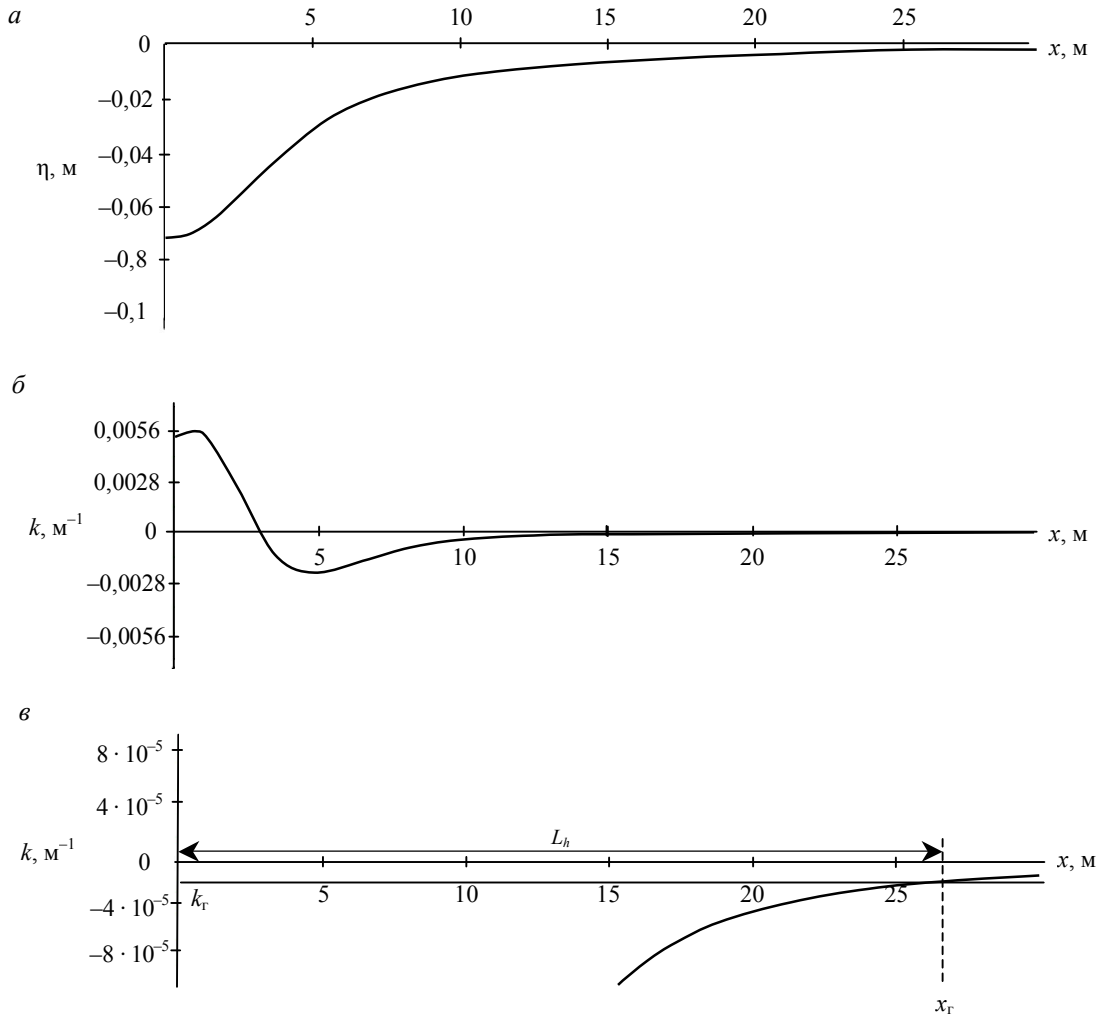



Рис.2. Схема к определению границы мульды $x_г$ (длины полумульды $L_h$) на контакте сред: *а* – график оседания; *б* – график кривизны; *в* – то же, с фиксацией граничной кривизны $k_г$ для определения $L_h$

рой положено применение обратного расчета для определения границы мульды на контакте (по границе мульды на поверхности, с использованием граничного угла).

Как показала практика многочисленных обратных расчетов по граничным критериям, наиболее перспективным следует признать использование в качестве критерия для мульды контакта не оседаний, не наклонов, а кривизны мульды. Именно она давала устойчивые значения на краю фактических мульд.

По аналогии с зависимостью значения критической кривизны от содержания слабых пород (аргиллитов, алевролитов и глинистых сланцев) в долях от общей мощности пород, принятой в практике оценок зон водопроводящих трещин [2], для граничного значения кривизны можно принять следующее выражение:

$$k_{\text{г}} = ae^{bA}, \qquad (3)$$

где $A = h_{\text{чтв}} / H$ – отношение мощности слабой четвертичной толщи к общей (четвертичной коренной) мощности пород над выработкой, $a$ и $b$ – некоторые эмпирические постоянные.

Данный подход может иметь следующее физическое объяснение: чем больше мощность четвертичных отложений, тем большее значение деформационного критерия (в нашем случае критерия кривизны) должно определять область активных сдвижений, способных достичь земной поверхности.

Использование однозначного граничного критерия позволяет определить длину полумульды как горизонтальное расстояние от проекции оси тоннеля до точки аналитической мульды, удовлетворяющей величине критерия (рис.2):

$$L_h = x_{\text{г}} \text{ при } k(x_{\text{г}}) = k_{\text{г}}, \qquad (4)$$

где $k(x)$ – функция кривизны мульды контакта; $k_{\text{г}}$ – значение граничной кривизны.

Применение данного подхода для условий проходки тоннелей Санкт-Петербургского метрополитена можно связать с применением решений С.Г.Лехницкого, оперирующего трансверсально-изотропной средой [3].

Отсутствие четких границ мульд в теоретическом решении С.Г.Лехницкого, как и в любом другом теоретическом решении, не позволяет рассчитать длину полумульды и площадь мульды на контакте толщ, являющихся основой для применения метода типовых кривых [1, 4, 6, 7]. Ввод четкого граничного критерия для этой мульды на основе приобщения эмпирических данных, как было показано выше, ограничивает область активных деформаций в массиве и фиксирует границы мульд сдвижения в нем. В качестве такого критерия будем использовать значение кривизны в мульде на контакте толщ, определяемых выражением (3).

Для определения постоянных $a$ и $b$ воспользуемся натурными данными. Анализ фактического материала по сдвижениям на земной поверхности, полученного на объектах Санкт-Петербургского метрополитена, показывает, что длина полумульды на поверхности практически не зависит от мощности четвертичных отложений над тоннелями и определяется в основном глубиной их заложения или величиной углов влияния (углов наклона линий, непосредственно соединяющих границы выработки с краем мульды на земной поверхности). Прямое применение углов влияния для определения границ мульды на земной поверхности плохо вписывается в физическую картину сложных геомеханических явлений в подрабатываемом массиве, и к тому же разброс в значениях этого угла на разных объектах не позволяет говорить о достоверности его фиксированного значения.

Оперируя значениями фактических полумульд на земной поверхности и величиной граничного угла в четвертичных отложениях, мы имеем возможность фиксировать граничную точку мульды на контакте толщ. Анализ значений кривизны в этих точках и относительных мощностей четвертичной толщи $A$ позволяет сделать вывод о устойчивой зависимости граничной кривизны от относительной мощности четвертичной толщи в виде выражения (3). При этом значения постоянных получились следующие: $a = -0{,}1 \cdot 10^{-5}$ и $b = 2{,}18$.

Длина полумульды на контакте толщ $L_h$, определяемая как горизонтальное расстояние от проекции оси тоннеля до точки аналитической мульды $x_г$, удовлетворяющей величине критерия $k(x_г) = k_г$, будет выражаться в соответствии с выражением (4).

Площадь мульды сдвижения на разрезе (см. рис.1) выражается как определенный интеграл по функции оседаний:

$$F_h = \int_0^{x_г} \upsilon_h (1 - u'_{hx}) dx \quad \text{или} \quad F_h \cong \int_0^{x_г} \upsilon_h dx ,$$

где $u'_{hx}$ – производная функция по функции горизонтальных сдвижений $u_h$ по $x$.

**ЛИТЕРАТУРА**


1. *Волохов Е.М.* Аналитическая методика расчета основных параметров мульды сдвижения при сооружении тоннелей в кембрийских глинах / Е.М.Волохов, С.П.Павлов. Записки Горного института. Т.146. СПб, 2001.

2. *Гусев В.Н.* Геомеханика техногенных водопроводящих трещин / СПГГИ. СПб,1999.

3. *Лехницкий С.Г.* Теоретическое исследование напряжений в упругом анизотропном массиве вблизи подземной выработки эллиптического сечения // Труды ВНИМИ. Л., 1962.

4. *Лиманов Ю.А.* Осадки земной поверхности при сооружении тоннелей в кембрийских глинах / ЛИИЖТ. Л., 1957.

5. *Мусхелишвили Н.И.* Некоторые основные задачи математической теории упругости. М.: Изд-во АН СССР, 1954.

6. Пособие по проектированию мероприятий для защиты эксплуатируемых зданий и сооружений от влияния горнопроходческих работ при строительстве метрополитена / В.Ф.Подаков, Ю.Ф.Соловьев, В.Н.Капустин и др. Л.: Стройиздат, 1973.

7. *Хуцкий В.П.* Расчет оседаний земной поверхности во времени при сооружении станций метрополитена в Петербурге // Маркшейдерское дело и геодезия: Межвузовский сборник научных трудов / СПГГИ. СПб, 1999.