УДК 622.83

Е.М.ВОЛОХОВ, *канд. техн. наук, доцент, volohov@spmi.ru*
Н.С.БАК, *аспирант, nxbac@mail.ru*
Санкт-Петербугский государственный горный институт (технический университет)

E.M.VOLOHOV, *PhD in. eng. sc., associate professor, volohov@spmi.ru*
N.S.BAC, *post-graduate student, nxbac@mail.ru*
Saint Petersburg State Mining Institute (Technical University)

РАСЧЕТ СДВИЖЕНИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ ГОРНЫХ ПОРОД, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ ТОННЕЛЕЙ С УЧЕТОМ ВЕРТИКАЛЬНОЙ АСИММЕТРИИ В РАСПРЕДЕЛЕНИИ СДВИЖЕНИЙ

В работе рассмотрены проблемы применения теоретических методов механики сплошной среды для расчета сдвижений и деформаций горных пород при сооружении тоннелей. Основное внимание уделено учету в расчетах вертикальной асимметрии в распределении сдвижений в породном массиве вокруг тоннеля. Представлен краткий анализ причин проявления такой асимметрии. Предложен способ учета в расчетах вертикальной асимметрии в распределении сдвижений над и под тоннелем на основе феноменологического подхода с учетом особенностей функций распределения деформаций и данных натурных наблюдений.

Ключевые слова: сдвижения земной поверхности, деформации, подземное строительство.

CALCULATION OF DISPLACEMENT AND DEFORMATIONS OF ROCKS TUNNELS ARISING AT BUILDING TAKING INTO ACCOUNT VERTICAL ASYMMETRY IN DISTRIBUTION OF DISPLACEMENT

In work problems application of theoretical methods mechanics continuous environment for calculation of displacement and deformations rocks are considered at a construction of tunnels. The basic attention is given the account in calculations of vertical asymmetry in distribution of displacement in a pedigree file round a tunnel. The short analysis of the reasons display such asymmetry is presented. The way of the account in calculations vertical asymmetry in distribution displacement over and under a tunnel on the basis phenomenological approach taking into account features of functions of distribution of deformations and the given natural supervision is offered.

Key words: displacements of a terrestrial surface, deformations, underground building.

Активное освоение подземного пространства больших городов со строительством крупных транспортных сооружений неизменно связано с проблемами оценки вредного влияния такого строительства на геологическую среду, здания и сооружения, расположенные на поверхности. В настоящее время строятся и проектируются объекты метрополитена в крупных городах Российской Федерации, проектируются сети метрополитена в крупнейших городах Ханой и Хошимин в Республике Вьетнам.

Рассмотрим особенности применения теоретических методов механики сплошной среды для прогнозного расчета сдвижений и деформаций, возникающих при строительстве тоннелей горным способом в пределах квазиоднородной породной толщи.

Аналитические методы механики сплошной среды (МСС) получили широкое распространение в механике горных пород и механике подземных сооружений [2]. Для маркшейдерских расчетов сдвижений и деформаций такая методология использовалась лишь на этапах первичной теоретической оценки качественных особенностей геомеханических процессов, происходящих в породном массиве при добыче полезных ископаемых [1]. Обоснование применимости методов механики сплошной среды к расчетам сдвижений и деформаций в горно-геологических условиях строительства тоннелей горным способом в пределах квазиоднородных породных толщ приведены, например, в [3]. Рассмотрим теоретическое решение для изотропной невесомой плоскости с отверстием [8], имеющее непосредственное отношение к проблематике данной статьи. Здесь рассматривается лишь гравитационная нагрузка от веса полного столба пород над тоннелем, приложенная на бесконечности, горизонтальная составляющая соответствует гипотезе акад. А.Н.Динника об отсутствии горизонтальных деформаций в ходе исторического нагружения массива. Расчетная схема для случая плоской деформации представлена на рис.1. Формулы для составляющих смещений и деформаций приведены в прямоугольной декартовой системе координат (ось x направлена вверх, ось y налево). Ориентация осей оставлена согласно [2].

Формулы для составляющих смещений u (вертикальная) и v (горизонтальная):

$$u(x,y)=-\frac{1+\mu}{E}R^2x\left[\left((3-4\mu)p_1+p_2\right)\frac{1}{x^2+y^2}+\right.$$
$$\left.+\,p_1\frac{x^2-3y^2}{(x^2+y^2)^3}\left(x^2+y^2-R^2\right)\right];$$
$$v(x,y)=\frac{1+\mu}{E}R^2y\left[\left((3-4\mu)p_1-p_2\right)\frac{1}{x^2+y^2}+\right.$$
$$\left.+\,p_1\frac{y^2-3x^2}{(x^2+y^2)}\left(x^2+y^2-R^2\right)\right], \qquad (1)$$

где $p_1=\frac{1-\lambda}{2}\gamma H$; $p_2=\frac{1+\lambda}{2}\gamma H$; γ – средневзвешенное значение объемного веса пород, МПа/м (кг/м^3); H глубина выработки, м; R – радиус выработки, м; λ – коэффициент бокового распора.

Формулы для составляющих деформаций ε_x, ε_y и γ_{xy}:

$$\varepsilon_x(x,y)=\frac{-(1+\mu)R^2}{E(x^2+y^2)^2}\left[\left((3-4\mu)p_1+p_2\right)(y^2-x^2)+\right.$$
$$+\frac{3(x^2+y^2-R^2)p_1}{(x^2+y^2)^2}(6x^2y^2-x^4-y^4)+$$
$$\left.+\frac{2p_1x^2}{(x^2+y^2)}(x^2-3y^2)\right];$$

$$\varepsilon_y(x,y)=\frac{(1+\mu)R^2}{E(x^2+y^2)^2}\left[\left((3-4\mu)p_1-p_2\right)(x^2-y^2)+\right.$$
$$+\frac{3(x^2+y^2-R^2)p_1}{(x^2+y^2)^2}(6x^2y^2-x^4-y^4)+$$
$$\left.+\frac{2p_1y^2}{(x^2+y^2)}(y^2-3x^2)\right];$$

$$\gamma_{xy}(x,y)=\frac{(1+\mu)R^2p_1}{E(x^2+y^2)^4}4xy(x^2-y^2)\times$$
$$\times\left(2(x^2+y^2)-3R^2\right).$$

Для большинства теоретических решений механики сплошной среды в рамках расчетной схемы в виде бесконечной неве-

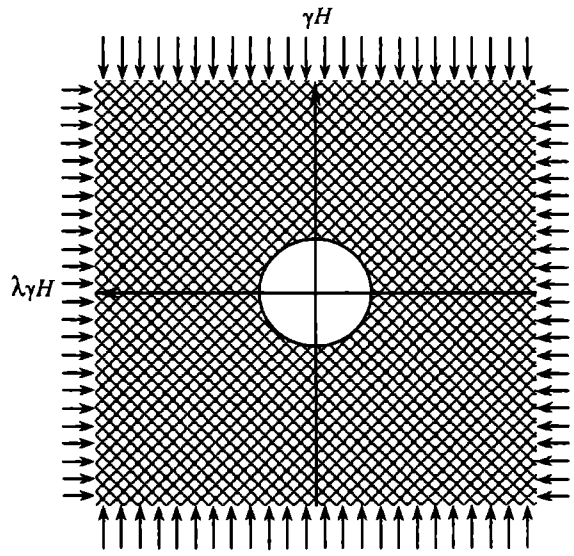


Рис.1. Плоская расчетная схема

сомой плоскости с отверстием (рис.1) характерен симметричный вид распределений сдвижений и деформаций относительно горизонтальной и вертикальной осей сечения выработки. Такая симметрия определяется особенностями расчетной схемы, на которые следует обратить внимание, если основной целью расчета является получение достоверных функций сдвижений.

Натурные данные показывают, что сдвижения в породном массиве, вызванные проходкой горной выработки, распределяются несимметрично относительно горизонтальной оси сечения выработки, даже для выработок круглого сечения [7]. Подработанная часть массива характеризуется бóльшими значениями вертикальных сдвижений (оседаний) в сравнении с надработанной частью массива. К основным причинам проявления такой асимметрии в распределении вертикальных сдвижений следует отнести:

• наличие объемных сил в массиве (реальный массив – не невесомая среда);

• относительную близость свободной от нагрузок земной поверхности (над тоннелем всегда есть граница – земная поверхность);

• особенности механизма образования и развития смещений, связанных с направлением действия гравитационной нагрузки (любое дополнительное сжатие в массиве в основном приводит к образованию вертикальных сдвижений).

Все три фактора могут быть учтены в расчетах при правильной постановке задачи, выборе расчетной схемы и назначении дополнительных граничных условий, что связанно с серьезными трудностями математического характера. Даже при получении теоретического решения в таких постановках (например [9]) его прямое использование для расчетов весьма затруднительно.

Существенное влияние первых двух факторов проявляется при небольших глубинах заложения тоннеля [4]. При бóльших глубинах влияние этих факторов резко снижается, однако асимметрия в вертикальных сдвижениях согласно натурным данным проявляется весьма отчетливо. Так, например, в сечении выработки оседание верхней точки щелыги свода может вдвое превышать величину пучения в лотке тоннеля [7].

В работе [5] нами уже исследовались закономерности в распределениях вертикальных сдвижений массива вокруг проходимого тоннеля. В данной работе предлагается учесть указанную асимметрию вертикальных сдвижений в точной постановке на основе феноменологического подхода, связанного со специальным интегрированием функций деформаций из классических «симметричных» решений МСС.

Как известно, сдвижения и деформации в МСС связываются уравнениями Коши:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x};\ \gamma_{xy} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y};$$
$$\varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y};\ \gamma_{xz} = \frac{\partial \omega}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}; \qquad (2)$$
$$\varepsilon_z = \frac{\partial \omega}{\partial z};\ \gamma_{yz} = \frac{\partial \omega}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z},$$

где u, v, ω – составляющие смещений по осям координат; ε_x, ε_y, ε_z – составляющие деформаций по осям координат; γ_{xy}, γ_{yz}, γ_{zx} – составляющие деформаций сдвига.

Из уравнений (2) видно, что в общем случае простым интегрированием функций вертикальных деформаций функции вертикальных сдвижений получить нельзя.

Однако анализ конкретных функций сдвижений и деформаций из классических решений МСС выявил их существенную для рассматриваемой здесь проблемы особенность. Оказалось, что функция вертикальных сдвижений не содержит составляющей, зависящей только от горизонтальной координаты (см. формулу (1)).

Для вертикальной и горизонтальной составляющих можно записать:

$$u(x,y) = \int_{x_0}^{x} \varepsilon_x(x,y)dx + f_1(y),$$

$$v(x,y) = \int_{0}^{y} \varepsilon_y(x,y)dy + f_2(x),$$

где $f_1(y)$ – составляющая, зависящая только от горизонтальной координаты; $f_2(x)$ – составляющая, зависящая только от вертикальной координаты.

При анализе формул (1) нетрудно заметить, что $f_1(y) = 0$ и $f_2(x) = 0$, т. е. деформация сдвига γ_{xy} определяется только составляющими сдвижений, одновременно зависящими от обоих осей.

Следовательно, функция вертикальных сдвижений однозначно может определяться через простое интегрирование функции деформаций:

$$u(x,y) = \int_{x_0}^{x} \varepsilon_x(x,y)dx =$$

$$= u(x,y)\Big|_{x_0}^{x} = u(x,y) - u(x_0,y), \qquad (3)$$

где x_0 – начало отчета.

Таким образом, при известной функции деформации $\varepsilon_x(x,y)$ функцию вертикальных сдвижений $u(x,y)$ можно находить по формуле (3). Отметим, что при $x_0 = 0$ выражения для $u(x,y)$ будут полностью соответствовать функции u в формулах (1).

Аналогичное заключение можно сделать и для других известных решений, в частности, решения проф. С.Г.Лехницкого для трансверсально-изотропной среды [6].

Рассмотрим реальный механизм появления и развития сдвижений и деформаций в породном массиве при сооружении тоннеля, подтверждаемый данными натурных исследований. Проходка тоннеля вызывает образование двух зон сжатия слева и справа от тоннеля, над и под тоннелем формируются зоны растяжений (рис.2). Возникновение и развитие зон сжатия приводит к образованию вертикальных сдвижений, причем сдвижения в нижней части этих зон практически не проявляются, а в области над этими зонами сдвижения (оседания) принимают максимальные значения. Механизм сдвижений в этих зонах напоминает смещения образца породы на жестком основании и сдавливаемого сверху нагрузкой. Процесс сдвижений в вертикальном направлении развивается несимметрично – над тоннелем сдвижения, направленные вниз, значительно превосходят сдвижения под тоннелем, направленные вверх. Образование и развитие зоны растяжений под тоннелем приводят к пучению пород в почве выработки. Зона растяжений над тоннелем увеличивает оседание в верхней части свода. Очевидно, в массиве на горизонте, соответствующем центру сечения выработки, вертикальные сдвижения не равны нулю (как это подразумевается в обычной теоретической схеме). Они направлены вниз и максимальны около контура тоннеля.

Для учета в аналитических расчетах указанных особенностей геомеханических процессов предлагается интегрировать функцию вертикальных деформаций с фиксацией нижнего предела интергрирования в области массива под тоннелем с минимальными вертикальными сдвижениями. В рассматриваемом здесь плоском случае эта область будет представляться линией, названной в [6] линией нулевых вертикальных сдвижений. Анализ функций сдвижений показал, что в качестве такой линии (для первого приближения) можно выбрать горизонтальную линию под тоннелем как горизонт нулевых сдвижений.

Существенным моментом, во многом определяющим количественную сторону подобных расчетов, является выбор «горизонта нулевых сдвижений». Расчеты показали, что удаление горизонта вниз вплоть до бесконечности приводит к приближению функций сдвижений к первоначальному виду (когда этот горизонт находится на горизонтальной оси сечения). Таким образом, искомый горизонт находится под тоннелем на некоторой (конечной) глубине. Наиболее предпочтительным вариантом фиксации горизонта является расчет его глубины на основе натурных данных по вертикальным сдвижениям контура тоннеля (в боках выработки на уровне горизонтального диаметра или в своде и лотке тоннеля).

С физической точки зрения в качестве таких границ наиболее корректно использовать горизонт кровли коренных пород или кристаллического фундамента, находящихся под тоннелем.

Результаты расчетов сдвижений с учетом вертикальной асимметрии их распределения представлены на рис.3.

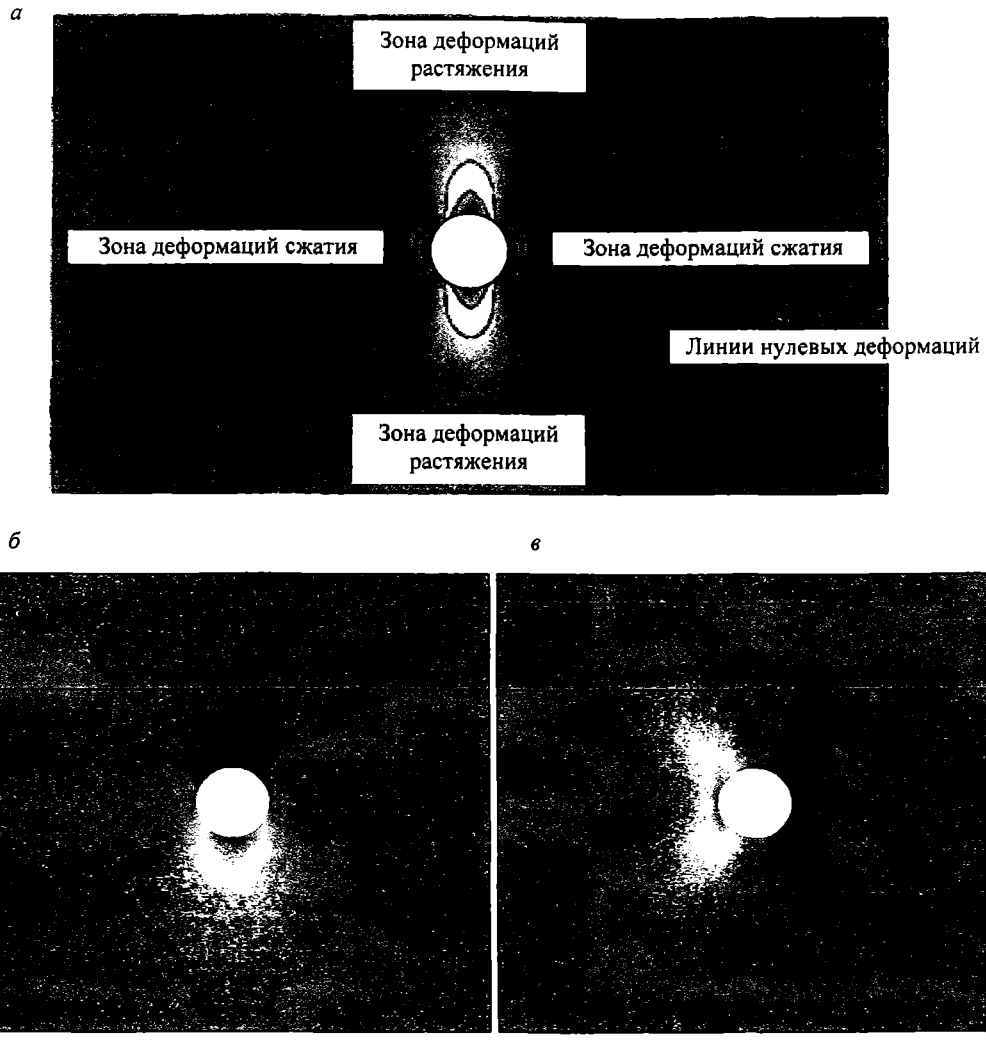


Рис.2. Распределение деформаций и смещений в массиве с круглой выработкой:
а, *б* – вертикальная составляющая смещений; *в* – горизонтальная составляющая смещений

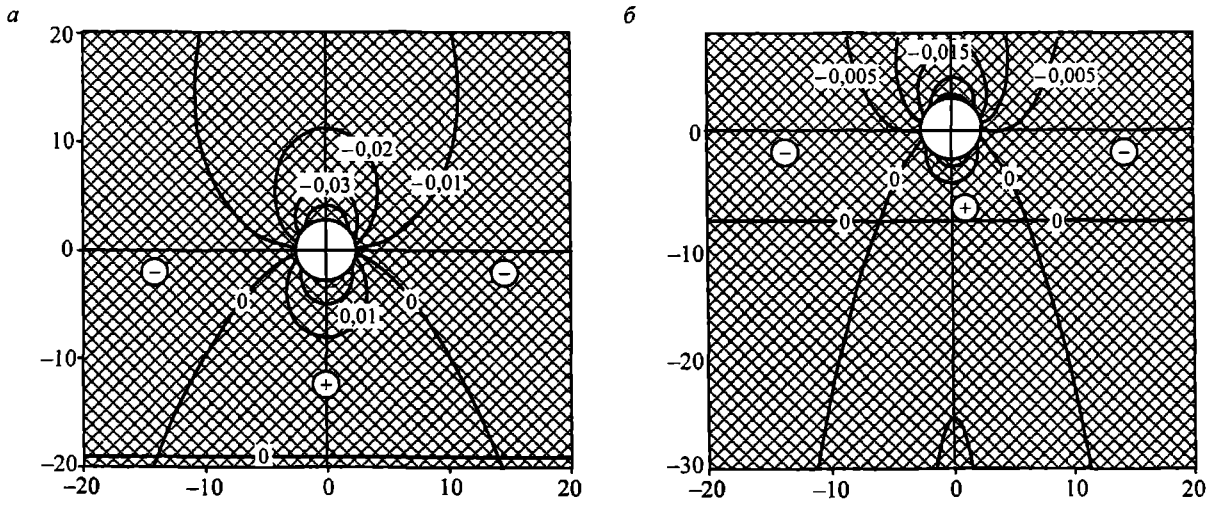


Рис.3. Распределение смещений в массиве с учетом вертикальной асимметрии

Выводы

Расчет сдвижений, возникающих при проходке тоннелей, если он опирается на методы МСС, должен учитывать асимметрию в распределении вертикальных сдвижений. Ее учет можно осуществить на основе использования точных методов, в расчетных схемах которых зафиксированы все значимые в этой части факторы. Но зачастую такой подход сопряжен с серьезными трудностями математического характера.

Для учета основного фактора, определяющего несимметричный характер распределения вертикальных сдвижений, можно использовать феноменологический подход, основанный на фиксации особенностей механизма геомеханических процессов (главной из которых является реализация основной части отрицательных вертикальных сдвижений за счет зон сжатия в массиве) и особенностей функций сдвижений и деформаций из классических «симметричных» решений. Указанные особенности позволяют переходить от вертикальных деформаций к сдвижениям через простое интегрирование и выбирать за начало отчета наиболее подходящий горизонт.

Для тоннелей неглубокого заложения, где проявляется влияние собственного веса пород и свободной земной поверхности на распределение вертикальных сдвижений, необходимо учитывать их в расчетах, хотя бы на основе специальных функций влияния.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Авершин С.Г.* Сдвижение горных пород при подземных разработках. М.: Углетехиздат, 1951.

2. *Булычев Н.С.* Механика подземных сооружений. М.: Недра, 1982.

3. *Волохов Е.М.* Некоторые основные принципы решения задач расчета сдвижений и деформаций массивов горных пород при проходке в нем тоннелеобразных выработок / Е.М.Волохов, В.Н.Гусев // Маркшейдерский вестник. 2003. № 1.

4. *Волохов Е.М.* К вопросу оценки влияния объемных сил в расчетах напряженно-деформированного состояния массива при проходке в нем горных выработок // Маркшейдерский вестник. 2003. № 3.

5. *Волохов Е.М.* Учет вертикальной асимметрии распределения сдвижений в массиве горных пород, окружающем сооружаемый тоннель // Записки Горного института / СПГГИ. СПб, 2007. Т.172.

6. *Лехницкий С.Г.* Теоретическое исследование напряжений в упругом анизотропном массиве вблизи подземной выработки эллиптического сечения // Труды ВНИМИ. Сб. 45. Л., 1962.

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

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

9. *Шерман Д.И.* Упругая весомая полуплоскость, ослабленная отверстием эллиптической формы, достаточно близко расположенным от ее границы / Проблемы механики сплошной среды. М.: Изд-во АН СССР, 1961.

REFERENCES

1. *Avershin S.G.* Of this year displacement rocks at underground minings. Moscow: Ugletehizdat, 1951.

2. *Bulychyov N.S.* Mechanics of underground constructions. Moscow: Nedra, 1982.

3. *Volohov E.M., Gusev V.N.* Some main principles of the decision of problems of calculation displacements and deformations of files of rocks at tunneling // Markshejdersky bulletin. 2003. N 1.

4. *Volohov E.M.* To a question of an estimation of influence of volume forces in calculations of the is intense-deformed condition of a file at tunneling in it of mountain developments // Markshejdersky bulletin. 2003. N 3.

5. *Volohov E.M.* Account of vertical asymmetry of distribution displacements in the file of rocks surrounding the constructed tunnel // Notes of a college of mines / SPMI. Saint Petersburg, 2007. V.172.

6. *Lehnitsky S.G.* Of this year Theoretical research of pressure in an elastic anisotropic file near to underground development of elliptic section // Works LISTEN. Col. 45. Leningrad, 1962.

7. *Lemanov U.S.* Deposits of a terrestrial surface at a construction of tunnels in cambrian clay / LIIJT. Leningrad, 1957.

8. *Musheleshvile N.I.* Some the primary goals of the mathematical theory of elasticity. Moscow: Publishing house AN of the USSR, 1954.

9. *Sherman D.I.* Elastic the powerful semiplane weakened by an aperture of the elliptic form, close enough located from its border / Problems of mechanics of the continuous environment. Moscow: Publishing house AN of the USSR, 1961.