

ЧИСЛЕННО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД ИНЖЕНЕРНОЙ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ РАЗРАБОТКИ КОТЛОВАНА НА ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ПРИЛЕГАЮЩЕГО К НЕМУ ГРУНТОВОГО МАССИВА С УЧЁТОМ ЖЁСТКОСТИ ОГРАЖДАЮЩЕЙ КОНСТРУКЦИИ

Зерцалов М.Г.¹, Казаченко С.А.²

¹*Национальный Исследовательский Московский Государственный Строительный
Университет (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия*

²*Тоннельная ассоциация России, г. Москва, Россия*

АННОТАЦИЯ

На предварительной стадии проектирования разработки котлована необходимо выполнять расчёты различных вариантов по оценке влияния процесса его устройства на окружающую застройку. В настоящее время анализ изменения НДС массива грунта при устройстве котлованов выполняется с применением численных методов, наибольшее распространение из которых получил метод конечных элементов, реализованный во множестве расчетных комплексов. Очевидно, что при нынешнем уровне развития компьютерной техники данный метод позволяет наиболее полно учесть все факторы, оказывающие влияние на конечный результат. Вместе с тем, даже решение задачи в двухмерной постановке отнимает много времени и требует необходимой квалификации, выполняющего расчёты, персонала. Учитывая это, остается актуальной разработка новых инженерных методов, позволяющих оперативно и с достаточной точностью выполнять требуемые расчеты на этапе предварительного вариантного проектирования. В статье рассмотрен численно-аналитический метод оперативной оценки влияния разработки котлована на перемещения прилегающего к нему грунтового массива, с учетом жесткости ограждающей конструкции. Метод основан на решении задачи Мелана и численного моделирования с использованием метода планирования эксперимента. Напряжён-деформированное состояние массива, определённое аналитическим путём, корректируется подбором жёсткости, ограждающей откосы котлована, конструкции. Результаты аналитического решения сопоставлялись с результатами расчётов, выполненных с использованием МКЭ, и показали сходимость в пределах 5-20%, что хорошо согласуется с принятой инженерной точностью расчётов. Метод, как альтернативный, может быть использован на предварительной стадии проектировании устройства котлованов.

Ключевые слова: геотехнические изыскания; котлован; метод конечных элементов; напряженно-деформированное состояние; оценка влияния

NUMERICAL-ANALYTICAL METHOD OF ENGINEERING ASSESSMENT OF THE IMPACT OF THE DEVELOPMENT OF THE PIT ON THE MOVEMENT OF THE ADJACENT SOIL MASS, TAKING INTO ACCOUNT THE RIGIDITY OF THE FENCING OF THE PIT

Zertsalov M.G.¹, Kazachenko S.A.²

¹*Moscow State University of Civil Engineering (MGSU) National Research University
(NRU MGSU), Moscow, Russia*

²*Russia Tunnel Association, Moscow, Russia*

ABSTRACT

At the preliminary design stage of the pit excavation, it is necessary to perform calculations of various options for assessing the impact of the process of the excavation on the surrounding building. Currently, the analysis of changes in the stress – strain state of the soil mass during the construction of pits is carried out using numerical methods, the most widespread of which is the finite element method, implemented in a variety of calculation complexes. It is obvious that at the current level of development of computer technology, this method allows us to take completely into account all the factors that affect the final result. At the same time, even solving the problem in a two-dimensional formulation takes a lot of time and requires the necessary qualifications of the personnel performing the calculations. Taking this into account, it remains relevant to develop new engineering methods that allow performing the required calculations quickly and with sufficient accuracy at the stage of preliminary variant design. The article considers a numerical-analytical method for the operational assessment of the impact of the pit excavation on the deformation of the adjacent soil mass, taking into account the stiffness of the enclosing structure. The method is based on solving the Melan problem and numerical modeling using the experiment planning method. The stress-strain state of the soil mass, determined analytically, is corrected by selecting the stiffness of the structure enclosed of the slopes of the excavation. The results of the analytical solution were compared with the results of calculations performed using FEM, and showed convergence in the range of 5-20%, which is in good agreement with the accepted engineering accuracy of calculations. The method, as an alternative, can be used at the preliminary stage of designing of pits excavation.

Keywords: geotechnical surveys; excavation; finite element method; stress-strain state; impact assessment

На предварительной стадии проектирования разработки котлована необходимо выполнять расчёты различных вариантов по оценке влияния процесса его устройства на окружающую застройку. В настоящее время, анализ изменения НДС массива грунта при устройстве котлованов выполняется с применением численных методов, наибольшее распространение из которых получил метод конечных элементов (МКЭ), реализованный во множестве расчетных комплексов (Z_Soil, Plaxis, Midas и др). Очевидно, что при нынешнем уровне развития компьютерной техники данный метод позволяет наиболее полно учесть все факторы, оказывающие влияние на конечный результат. Вместе с тем, даже решение задачи в двухмерной постановке отнимает много времени и требует необходимой квалификации, выполняющего расчёты, персонала. Учитывая это, остается актуальной разработка новых инженерных методов, позволяющих оперативно и с достаточной точностью выполнять требуемые расчеты на этапе предварительного вариантного проектирования.

В статье рассматривается метод решения задачи об изменении НДС массива грунта в окрестностях котлована в «плоской» постановке, основанный на использовании известного решения Мелана [1].

1. ПОСТАНОВКА И РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Рассмотрим грунтовую полуплоскость, в которой предполагается устройство котлована прямоугольного очертания с закреплением его бортов ограждающей конструкцией по консольной схеме. По окончании разработки котлована на ограждение будут действовать следующие нагрузки: горизонтальные напряжения от веса грунта; гидростатическое давление (при наличии); реактивный

отпор грунта в зоне заделки. Силы и воздействия, связанные с технологией производства работ, в данной работе не рассматриваются (рис.1).

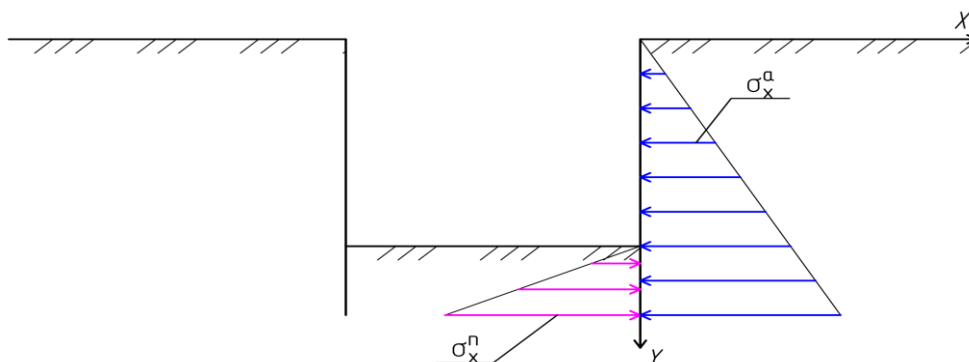


Рис.1. Распределение напряжений вдоль ограждения котлована после его разработки.

В настоящее время аналитическое решение указанной задачи отсутствует, однако, она может быть решена, используя известную задачу Мелана [1] об определении напряжений от действия сосредоточенной силы, приложенной внутри полуплоскости, которая была дополнена, в части определения перемещений, М.И.Горбуновым-Посадовым и его сотрудниками [2,3]. В указанных работах получено решение для определения относительных перемещений бортов и дна котлована прямоугольного очертания без подкрепления и без учета нагрузки от возводимого сооружения. Построены эпюры перемещений относительно угловой точки, которая считается неподвижной. Анализ деформаций массива авторами не выполнялся.

Следует также отметить, что в работе [4] на основании задачи Мелана получен метод расчета ограждения котлованов с учетом разрыва в грунтовом массиве путем введения двойных сил, который позволяет учесть тот факт, что грунт не работает на растяжение. В решении задачи учитывается жесткость ограждения, при этом, часть ограждающей конструкции, расположенная выше дна котлована, авторами не рассматривается.

Выводы, сделанные в указанных выше работах, были учтены в [5], где автор использовал решение задачи Миндлина, как обобщающей для задач Буссинеска, Черрути и Мелана, для определения технологических осадок окружающей застройки в процессе устройства траншеи при сооружении «стены в грунте». Для перехода к граничным условиям, соответствующим задаче Миндлина, автор вводит предположение, что массив является сплошным, а наличие разработанной траншеи учитывается вводом дополнительной компенсирующей распределенной нагрузки от гидростатического давления бентонитового раствора, заполняющего траншею.

Аналогичный подход использован в рассматриваемой работе, на основании которого, было получено аналитическое решение в условиях «плоской» задачи для центрального сечения прямоугольного котлована нормально к его длинной стороне. Расчётная схема, используемая при решении задачи, показана на рис.2.

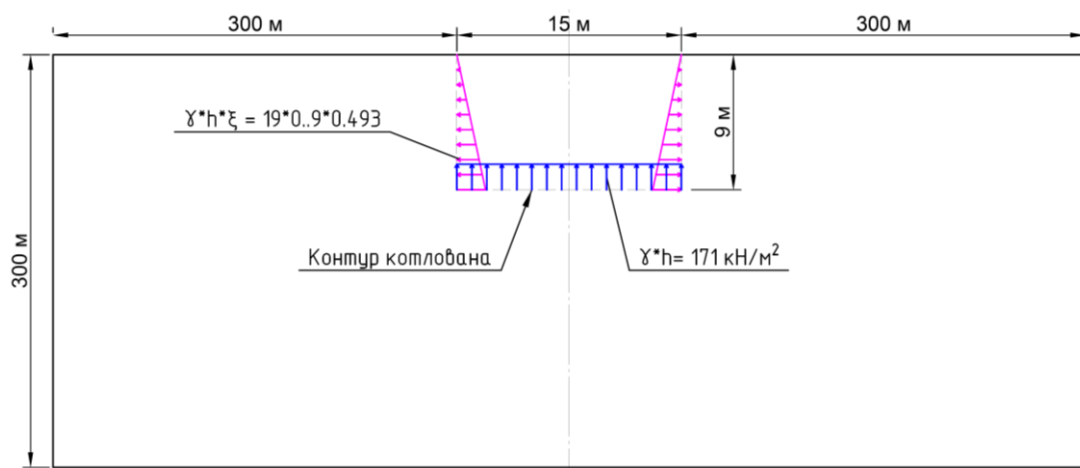


Рис.2. Расчетная схема с приложением нагрузок, возникающих при отрывке котлована.

Как уже указывалось, решение задачи Мелана позволяет определить напряжения в грунтовой полуплоскости от действия сосредоточенной силы. Переход к распределённым нагрузкам различной интенсивности может быть выполнен путем интегрирования полученных напряжений в заданных пределах.

Согласно решению Мелана, для вертикальной сосредоточенной силы P , приложенной на некоторой глубине s , функция напряжений, удовлетворяющая граничным условиям $\sigma_x = 0$; $\tau_{xy} = 0$, имеет вид

$$\varphi = \frac{Q}{\pi} \left[-\frac{1}{2}(y-s)(\theta_1 + \theta_2) - \frac{m-1}{4m} \ln \frac{r_1}{r_2} + \frac{m+1}{2m} \cdot \frac{dxy}{r_2^2} \right], \tag{1}$$

где, $m = 1/\nu$, θ_1 – угол между осью x (вертикальной) и прямой, соединяющей точку приложения силы P с точкой (x, y) , в которой определяются напряжения, θ_2 – аналогичный угол, но не для точки приложения силы, а для зеркального отображения этой точки с координатами $(-d, 0)$; r_1 и r_2 – расстояния между точками (x, y) и соответствующими точками $(d, 0)$ и $(-d, 0)$ в соответствии с рис.3.

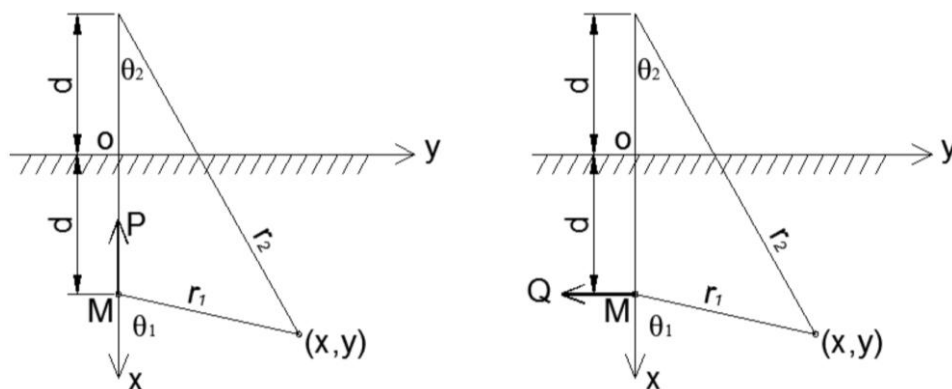


Рис.3. Схема к задаче Мелана.

Для горизонтальной силы Q , приложенной в той же точке, функция напряжений определяется уравнением

$$\varphi = \frac{Q}{\pi} \left[-\frac{1}{2}(y-s)(\theta_1 + \theta_2) - \frac{m-1}{4m} \ln \frac{r_1}{r_2} + \frac{m+1}{2m} \cdot \frac{dxy}{r_2^2} \right]. \quad (2)$$

Компоненты напряжений, представленные через функцию напряжений, выражаются в виде

$$\sigma_x = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2}; \quad \sigma_y = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2}; \quad \tau_{xy} = -\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial y}. \quad (3)$$

Тогда формулы для вычисления напряжений от вертикальной сосредоточенной силы P на глубине s имеют вид, представленный в выражениях (4), а формулы для вычисления напряжений от горизонтальной сосредоточенной силы Q на глубине s имеют вид, представленный в выражениях (5)

$$\begin{aligned} \sigma_x(x, y, s) &= -\frac{P}{\pi} \left\{ \frac{m+1}{2m} \left[\frac{x^2(y-s)}{[x^2+(y-s)^2]^2} + \frac{(x^2+2s^2)(y+s)-2sx^2}{[x^2+(y+s)^2]^2} + \frac{8syx^2(y+s)}{[x^2+(y+s)^2]^3} \right] + \right. \\ &\quad \left. + \frac{m-1}{4m} \left[-\frac{y-s}{x^2+(y-s)^2} + \frac{y+3s}{x^2+(y+s)^2} + \frac{4yx^2}{[x^2+(y+s)^2]^2} \right] \right\}; \\ \sigma_y(x, y, s) &= -\frac{P}{\pi} \left\{ \frac{m+1}{2m} \left[\frac{(y-s)^3}{[x^2+(y-s)^2]^2} + \frac{(y+s)^3+2sy(y+s)}{[x^2+(y+s)^2]^2} - \frac{8syx^2(y+s)}{[x^2+(y+s)^2]^3} \right] + \right. \\ &\quad \left. + \frac{m-1}{4m} \left[\frac{y-s}{x^2+(y-s)^2} + \frac{3y+s}{x^2+(y+s)^2} - \frac{4yx^2}{[x^2+(y+s)^2]^2} \right] \right\}; \\ \tau_{xy}(x, y, s) &= -\frac{Px}{\pi} \left\{ \frac{m+1}{2m} \left[\frac{(y-s)^2}{[x^2+(y-s)^2]^2} + \frac{y^2-2sy-s^2}{[x^2+(y+s)^2]^2} + \frac{8sy(y+s)^2}{[x^2+(y+s)^2]^3} \right] + \right. \\ &\quad \left. + \frac{m-1}{4m} \left[\frac{1}{x^2+(y-s)^2} - \frac{1}{x^2+(y+s)^2} + \frac{4y(y+s)}{[x^2+(y+s)^2]^2} \right] \right\}. \quad (4) \end{aligned}$$

$$\sigma_x(x, y, s) = -\frac{Qx}{\pi} \left\{ \frac{m+1}{2m} \left[\frac{x^2}{[x^2+(y-s)^2]^2} + \frac{x^2+8sy+6s^2}{[x^2+(y+s)^2]^2} + \frac{8sy(y+s)^2}{[x^2+(y+s)^2]^3} \right] + \right. \\ \left. + \frac{m-1}{4m} \left[-\frac{1}{x^2+(y-s)^2} + \frac{3}{x^2+(y+s)^2} - \frac{4y(y+s)}{[x^2+(y+s)^2]^2} \right] \right\};$$

$$\sigma_y(x, y, s) = -\frac{Qx}{\pi} \left\{ \frac{m+1}{2m} \left[\frac{(y-s)^2}{[x^2+(y-s)^2]^2} - \frac{s^2-y^2+6sy}{[x^2+(y+s)^2]^2} - \frac{8syx^2}{[x^2+(y+s)^2]^3} \right] - \right. \\ \left. - \frac{m-1}{4m} \left[\frac{1}{x^2+(y-s)^2} - \frac{1}{x^2+(y+s)^2} - \frac{4y(y+s)}{[x^2+(y+s)^2]^2} \right] \right\};$$

$$\tau_{xy}(x, y, s) = -\frac{Q}{\pi} \left\{ \frac{m+1}{2m} \left[\frac{(y-s)x^2}{[x^2+(y-s)^2]^2} + \frac{(x^2+2sy)(y+s)}{[x^2+(y+s)^2]^2} - \frac{8sy(y+s)x^2}{[x^2+(y+s)^2]^3} \right] + \right. \\ \left. + \frac{m-1}{4m} \left[\frac{y-s}{x^2+(y-s)^2} + \frac{3y+s}{x^2+(y+s)^2} - \frac{4y(y+s)^2}{[x^2+(y+s)^2]^2} \right] \right\}. \quad (5)$$

Результирующие вертикальная и горизонтальная силы от веса грунта вычисляются, соответственно, по формулам

$$P = \gamma \cdot s \quad \text{и} \quad Q = \xi \cdot \gamma \cdot s, \quad (6)$$

где

ξ – коэффициент бокового давления $= \frac{\nu}{1-\nu}$, ν – коэффициент Пуассона (принят $= 0,3$), γ – удельный вес грунта (принят $= 19 \text{ кН/м}^3$), s – глубина рассматриваемой площадки.

Тогда значение вертикальной распределённой нагрузки от веса изымаемого грунта получим путем интегрирования выражения (4) в рассматриваемом диапазоне по ширине выемки (dx)

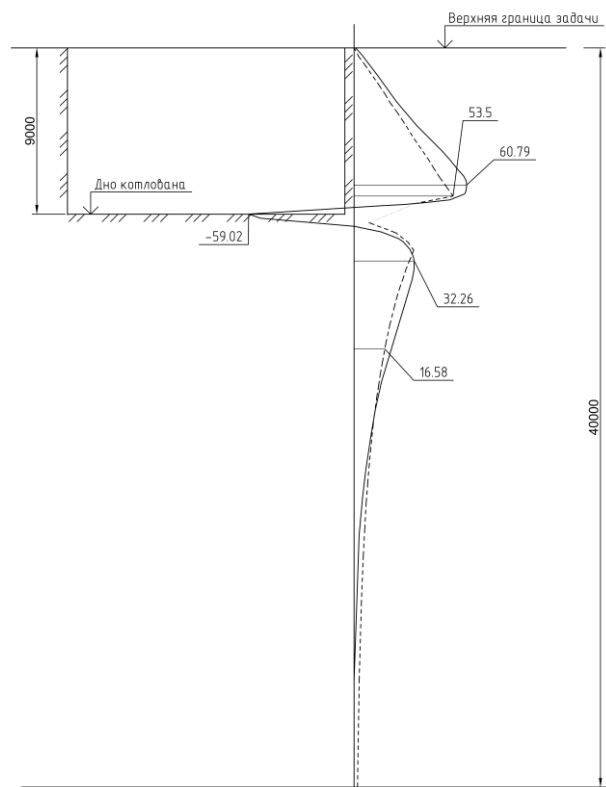
$$\int_{-b}^b \sigma_x(x, y, s) dx. \quad (7)$$

Аналогично, значение горизонтальной распределённой нагрузки от веса грунта может быть получено путем интегрирования выражения (5) в рассматриваемом диапазоне по глубине (ds)

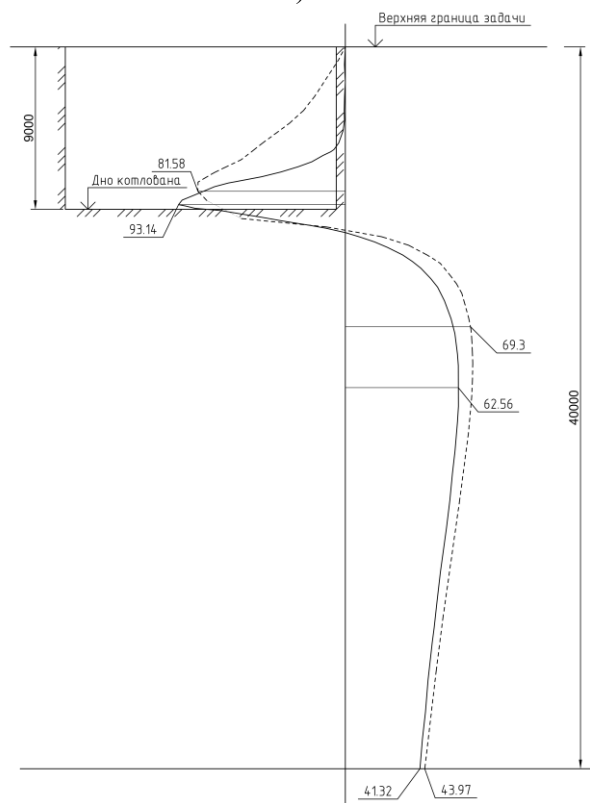
$$\int_0^h \sigma_x(x, y, s) ds. \quad (8)$$

Расчёты с использованием приведенных выше выражений целесообразно проводить, применяя соответствующие программные продукты, например, Mathcad и др.

Для сравнения результатов аналитического расчета и расчета с использованием МКЭ были построены эпюры дополнительных вертикальных и горизонтальных напряжений на удалении 0,5 м от борта котлована (рис.4) и на удалении 5 м от борта котлована, что соответствует расстоянию до границ призмы обрушения (рис.5).

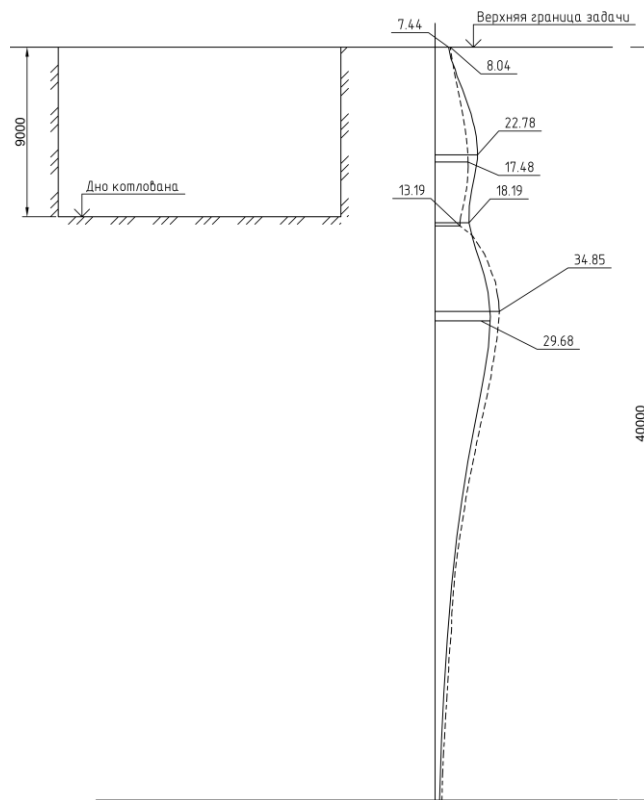


а)

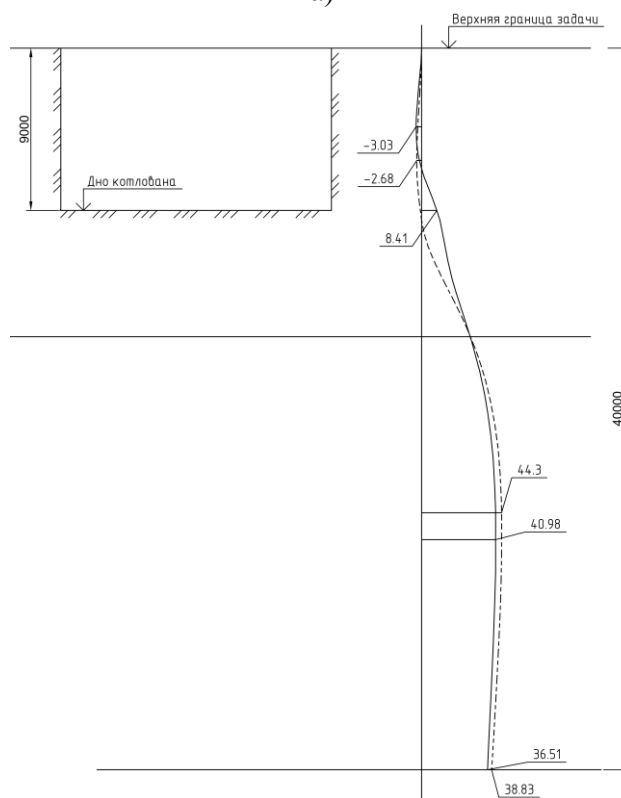


б)

Рис.4. Эпюры дополнительных а) горизонтальных и б) вертикальных напряжений в полуплоскости от устройства выемки на удалении 0,5 м. Сплошной линией представлены результаты, полученные по МКЭ, пунктиром – аналитическим методом.



а)



б)

Рис.5. Эпюры дополнительных горизонтальных (а) и вертикальных (б) напряжений в полуплоскости от устройства выемки на удалении 5 м. Сплошной линией представлены результаты, полученные по МКЭ, пунктиром – аналитическим методом.

Приведенные выше эпюры показывают хорошую сходимость между решениями численным и аналитическим методами, расхождение в значениях не превышает 15%, что соответствует инженерной точности расчётов. Также необходимо отметить, что при удалении рассматриваемых сечений от выемки сходимость результатов численного и аналитического решений увеличивается.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ В ОКРЕСТНОСТЯХ ВЫЕМКИ В УПРУГОЙ ОДНОРОДНОЙ ПОЛУПЛОСКОСТИ

Как показывают многочисленные расчёты, определение дополнительных деформаций массива в окрестностях котлована в упругой постановке приводит к результатам, не совпадающим с результатами натурных наблюдений. Результаты расчётов показывают чрезмерное поднятие дна котлована и поверхности земли вне котлована, а также расхождение его бортов. Для устранения указанных расхождений при проектировании котлованов применяют инженерную методику, в соответствии с которой ограничивают размеры расчетной области до размеров сжимаемой толщи грунта [6], и либо принимают модуль упругости массива по ветви разгрузки [7], либо понижают удельный вес изымаемого грунта [8]. Аналогичная методика использовалась в данной статье. Расчётная область и величины нагрузок представлены на рис.6.

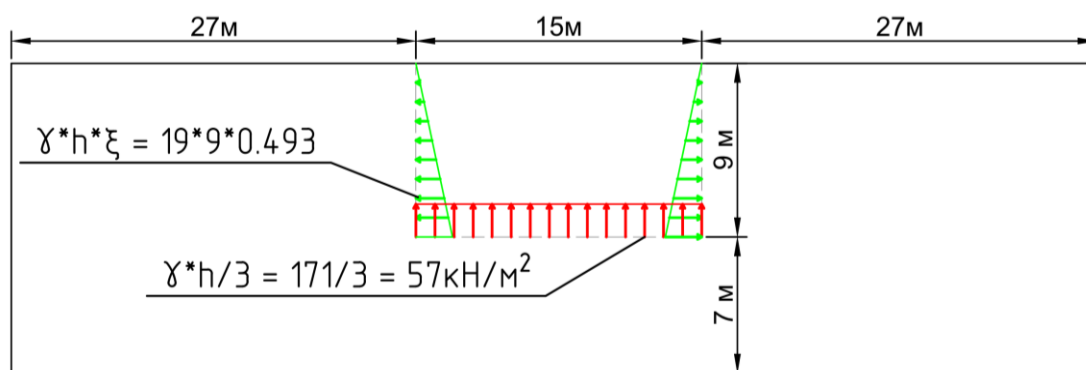


Рис.6. Расчетная область с приложением нагрузок к границам предполагаемой выемки.

В соответствии с принятой схемой выполнялся расчёт величин вертикальных напряжений в грунтовом массиве и, возникающих, при этом, соответствующих вертикальных перемещений. Для сравнения результатов аналитического расчета и МКЭ были построены эпюры горизонтальных и вертикальных напряжений на удалении 0,5 м от борта котлована и на удалении 5 м от борта (рис.7).

Сходимость между аналитическим и численным методами решения не превышает 20%, что дает основание перейти к определению дополнительных деформаций массива, вызванных устройством выработки. Значение дополнительных осадок, полученных по МКЭ, на удалении 0,5 м от котлована составило 16 мм и на удалении 5,0 м – 7 мм. Аналитический расчет выполнялся методом послойного суммирования, вычислялись дополнительные напряжения и деформации в каждой точке массива на необходимом удалении в пределах ограниченной расчетной области с шагом 0,5 м по глубине, по полученным значениям напряжений определялись значения деформаций. Значение осадок на удалении 0,5 м от котлована составило 14,1 мм, на удалении 5,0 м – 6,2 мм.

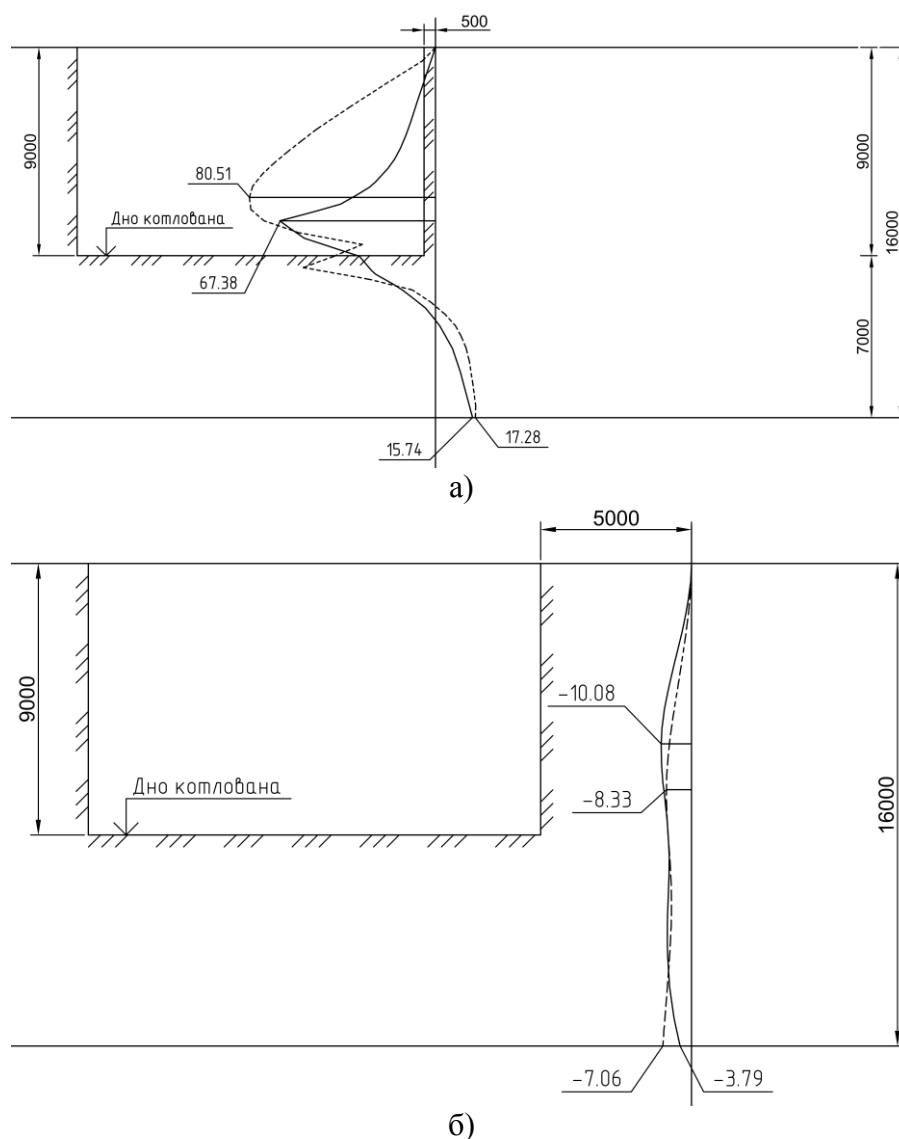


Рис.7. Эпюры дополнительных вертикальных напряжений в полуплоскости от устройства выемки на удалении 0,5 м (а) и 5,0 м (б). Сплошной линией представлены результаты, полученные по МКЭ, пунктиром – аналитическим методом.

Описанные результаты приведены в виде эпюр на рис.8.

Сравнение результатов численного и аналитического расчётов показали их сходимость в пределах 20%, что также соответствует инженерной точности расчётов и позволяет применять разработанный метод на предварительной стадии проектирования.

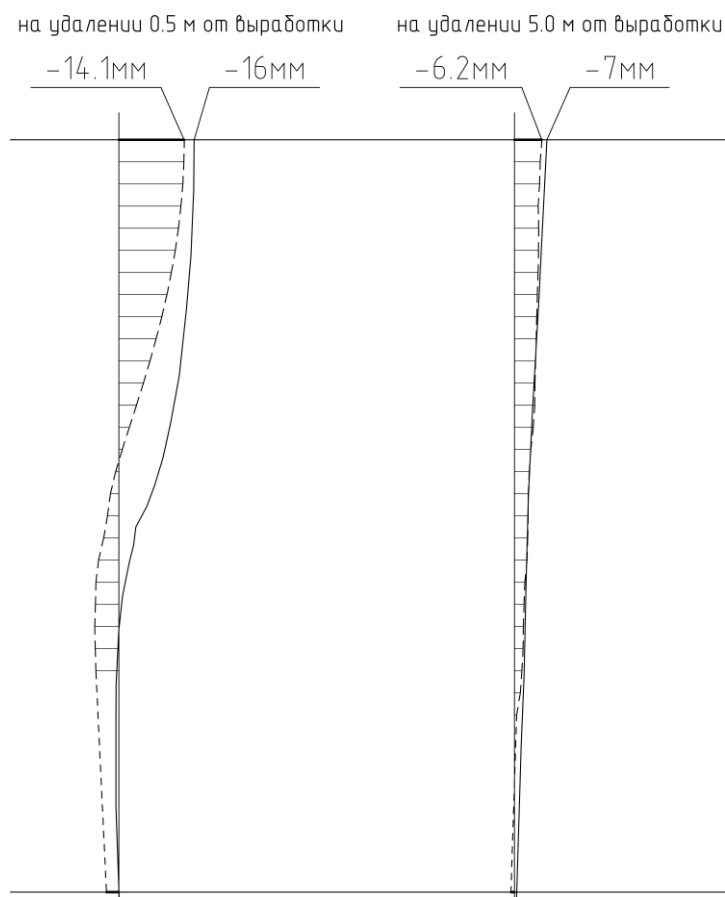


Рис.8. Эпюры дополнительных вертикальных деформаций в полуплоскости от устройства выемки на удалении 0,5 м и 5,0 м. Сплошной линией представлены результаты, полученные по МКЭ, пунктиром – аналитическим методом.

3. УЧЕТ ОГРАЖДЕНИЯ КОТЛОВАНА

Ограждающие конструкции котлована должны обладать жёсткостью, обеспечивающей безопасную осадку земной поверхности. В нормативных документах в настоящее время отсутствуют рекомендации по допустимым горизонтальным смещениям ограждения котлованов. Учитывая это, в данной работе предельные значения верха ограждающей конструкции определялись допустимыми осадками земной поверхности в пределах призмы обрушения. При недостаточной жёсткости ограждения, в массиве будут развиваться зоны предельного состояния, как в зоне заделки, так и в части выше уровня дна котлована. Если же жесткость ограждения достаточна, тогда зоны предельного состояния в массиве не развиваются, и, следовательно, для определения значений дополнительных деформаций поверхности массива грунта может быть применена, описанная выше, методика. Результаты, полученные с её использованием, позволили установить линейную зависимость (рис.9) между горизонтальными смещениями верхней точки контура выработки и дополнительными вертикальными осадками земной поверхности на удалении 0,5 м и 5,0 м от бровки котлована (в пределах зоны обрушения).

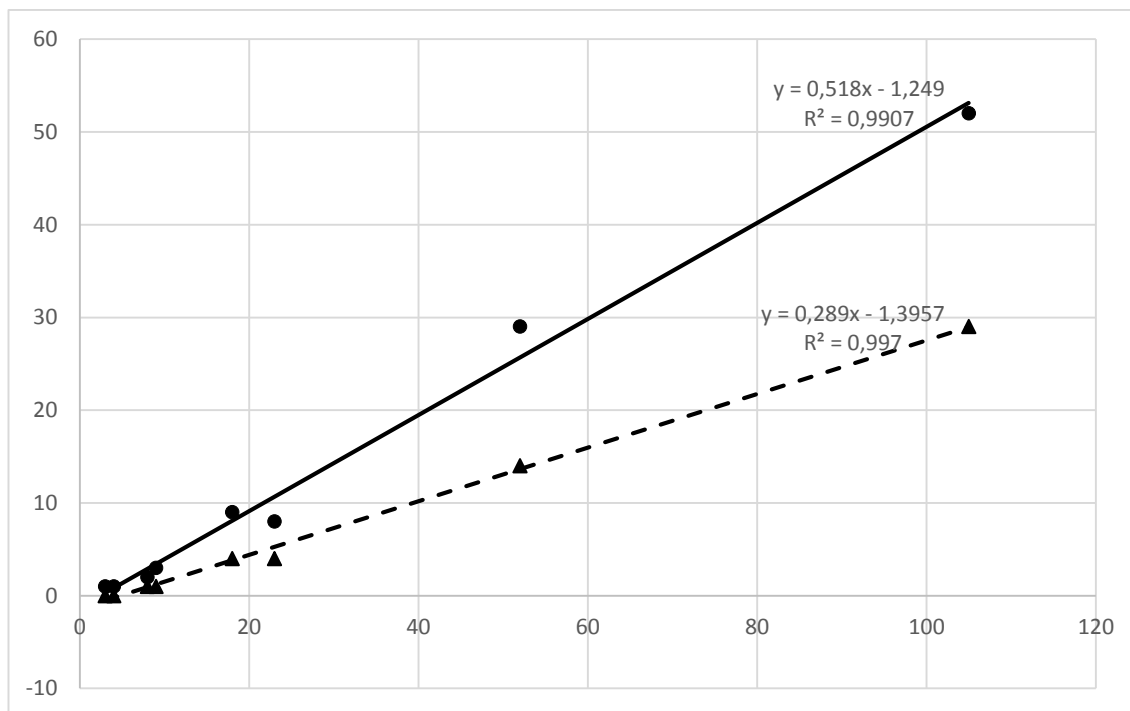


Рис.9. Определение зависимости между дополнительными вертикальными осадками (по вертикальной оси) массива и горизонтальным смещением (по горизонтальной оси) ограждения на удалении 0,5 м (сплошной линией) и 5,0 м (пунктиром) от бровки котлована.

Для определения горизонтальных смещений стенки котлована, в соответствии с методом планирования эксперимента, была выполнена серия численных расчётов с варьированием выбранных независимых факторов, оказывающих наибольшее влияние на горизонтальные смещения стенки. К указанным факторам относятся: модуль деформации грунта (от 10 до 25 МПа); глубина котлована, соответствующая безраспорной схеме ограждения (от 3 до 7 м) и его жесткость. На основании результатов численных расчётов было получено уравнение регрессии, позволяющее установить величину горизонтального смещения верха стенки котлована при различных комбинациях значений выбранных факторов

$$Y = 27,75 - 21,75 \cdot X_1 + 15,75 \cdot X_2 + 7,0 \cdot X_3 - 13,25 \cdot X_1 X_2 - 7,5 \cdot X_1 X_3 + 6,0 \cdot X_2 X_3 \quad (9)$$

Определив по графику (рис.9) горизонтальное перемещение, соответствующее допустимой осадке и, используя уравнение (9), подбором определяется необходимая жёсткость ограждающей конструкции.

В заключение, следует отметить, что для учета наличия сооружения в границе зоны обрушения рассмотренный метод также может быть использован. При этом осадки сооружения определяются в соответствии с решением задачи Фламана, и суммируются с дополнительными осадками земной поверхности, определяемыми по предлагаемому методу.

ВЫВОДЫ

1. На основании известной задачи Мелана в рамках теории упругости в «плоской» постановке получено решение для определения напряжённо-деформированного состояния, формирующегося во вмещающем массиве грунта при отрывке котлована. Результаты аналитического решения сопоставлялись с результатами расчётов, выполненных с использованием МКЭ, и показали сходимость в пределах 5-20%, что хорошо согласуется с принятой инженерной точностью расчётов.
2. Предложен график зависимости, позволяющий установить связь между величиной горизонтальных смещений верха борта котлована и вертикальных деформаций поверхности грунтового массива возле котлована и на границе призмы обрушения.
3. На основании решённой задачи Мелана предложен численно-аналитический метод оценки влияния устройства котлованов на окружающую городскую застройку. Напряжённо-деформированное состояние массива, определённое аналитическим путём, корректируется подбором жёсткости, ограждающей откосы котлована, конструкции. Алгоритм подбора базируется на результатах численного моделирования и метода планирования экспериментов. Такой подход позволяет оперативно оценить влияние котлована на НДС грунтового массива и выбрать приемлемый вариант ограждающей конструкции. Метод, как альтернативный, может быть использован на предварительной стадии проектировании устройства котлованов.
4. При наличии окружающей застройки осадка существующих сооружений может быть определена, с использованием решения задачи Фламана для подсчёта напряжений в массиве грунта на глубину, определяемую отметкой нижнего конца ограждающей конструкции. Полученную осадку сооружения необходимо суммировать с дополнительной осадкой земной поверхности, вычисляемой по предлагаемому методу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Melan E. *Der Spannungszustand der durch eine Einzelkraft im Innern beanspruchten Halbscheibe* // Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik. – 1932. – Vol.12. – No.6. – Pp.343-346.
2. Горбунов-Посадов М.И., Шехтер О.Я., Кофман В.А. *Давление грунта на жесткий закругленный фундамент и свободные деформации котлована* // Механика грунтов. – 1954. – Вып.24. – С.39-80.
3. Горбунов-Посадов М.И., Маликова Т.А., Соломин В.И. *Расчет конструкций на упругом основании*. – М.: Стройиздат, 1984. – 627 с.
4. Горбунов-Посадов М.И., Огранович А.Б. *Расчет фундаментной стенки на горизонтальную нагрузку с учетом разрыва сплошности основания* // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1966. – Вып.3. – С.7-9.
5. Сапин Д.А. *Дополнительные технологические осадки фундаментов зданий соседней застройки при устройстве траншейной «стены в грунте»: дис. ... канд. техн. наук.* – СПб.: СПбГАСУ, 2016. – 177 с.
6. СП 249.1325800.2016 *Коммуникации подземные. Проектирование и строительство закрытым и открытым способами*. – Москва, 2016.

7. Шарафутдинов Р.Ф. *Совершенствование метода прогноза деформаций земной поверхности при щитовой проходке тоннелей для подземных коммуникаций: дис. ... канд. техн. наук.* – М.: НИИОСП, 2013. – 165 с.
8. Конюхов Д.С., Казаченко С.А. *Влияние математической модели поведения грунта под нагрузкой на моделирование воздействия строительства метрополитена на окружающую застройку* // Транспортное строительство. – 2017. – №10 – С.12-15.

REFERENCES

1. Melan E. *Der Spannungszustand der durch eine Einzelkraft im Innern beanspruchten Halbscheibe.* Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik, 1932, Vol.12, No.6, Pp.343-346.
2. Gorbunov-Posadov M.I., Shehter O.Ya., Kofman V.A. *Davlenie grunta na zhestkij zakruglennyy fundament i svobodnye deformatsii kotlovana [Soil pressure on a hard rounded foundation and free deformations of the pit].* Mekhanika gruntov, 1954, Iss.24, Pp.39-80.
3. Gorbunov-Posadov M.I., Malikova T.A., Solomin V.I. *Raschet konstruksij na uprugom osnovanii [Calculation of structures on an elastic base].* Moskva, Strojizdat, 1984, 627 p.
4. Gorbunov-Posadov M.I., Ogranovich A.B. *Raschet fundamentnoj stenki na gorizontaľ nuyu nagruzku s uchetom razryva sploshnosti osnovaniya [Calculation of the foundation wall for a horizontal load, taking into account the discontinuity of the base].* Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov, 1966, Iss.3, Pp.7-9.
5. Sapin D.A. *Dopolnitel'nye tekhnologicheskie osadki fundamentov zdaniy sosednej zastrojki pri ustrojstve transhejnoj "steny v grunte" [Additional technological precipitation of the foundations of neighboring buildings during the construction of a trench for "slurry wall"].* Dis. ... kand. tekhn. nauk, Sankt-Peterburg, SPbGASU, 2016, 177 p.
6. SP 249.1325800.2016 *Kommunikatsii podzemnye. Proektirovanie i stroitel'stvo zakryтым i otkryтым sposobami [Underground communications. Design and construction by closed and open methods].* Moskva, 2016.
7. Sharafutdinov R.F. *Sovershenstvovanie metoda prognoza deformatsij zemnoj poverkhnosti pri shhitovoj prokhodke tonnelej dlya podzemnykh kommunikatsij [Improvement of the method of forecasting deformations of the Earth's surface during shield tunneling for underground utilities].* Dis. ... kand. tekhn. nauk, Moskva, NIIOСП, 2013, 165 p.
8. Konyuhov D.S., Kazachenko S.A. *Vliyanie matematicheskoy modeli povedeniya grunta pod nagruzkoj na modelirovanie vozdejstviya stroitel'stva metropolitena na okruzhayushhuyu zastrojku [The influence of a mathematical model of soil behavior under load on modeling the impact of metro construction on the surrounding buildings].* Transportnoe stroitel'stvo, 2017, No.10, Pp.12-15.

Поступила в редакцию 19 июля 2021 года.

Сведения об авторах:

Зерцалов Михаил Григорьевич – д.т.н., проф., Национальный Исследовательский Московский Государственный Строительный Университет (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия; e-mail: mzertsalov@yandex.ru

Казаченко Сергей Андреевич – инж., Тоннельная ассоциация России, г. Москва, Россия; e-mail: Kazachenko.sa@yandex.ru