

## Метод определения зоны разрушения структуры грунта при взрывных воздействиях

### The method of definition of a destruction zone of a ground structure at explosive influences

Какенов К.С., Есенбаева Г.А.

*Карагандинский экономический университет Казпотребсоюза (E-mail: sattu55@mail.ru)*

Мақалада жарылыс барысында топырақ құрылымының бұзылуына әкелетін себептер қарастырылған. Соққы толқындар әсерінен топырақ қаңқасының кернелуі жағдайының өзгеру сипаттамаларын анықтау үшін есеп теңдеулері шығарылған. Жарылыс барысында топырақ құрылымының бұзылу және тығыздану аумақтарының шектерін зерттеу топырақтың кернелуі және құрылымының бұзылу жағдайларын қарастырудан тұрады. Жарылыс кезінде топырақтың тығыздануы мен құрылымының бұзылу аумақтарының нұсқасын анықтаудың тәжірибелік әдісі ұсынылған.

The reasons of destruction of a ground structure at explosions are considered in the article. The rated equations for definition of the characteristics changes of a ground skeleton intense state at the action of shock waves are deduced. It is shown, that the problem of definition of border for a structure destruction zone and ground compression at explosive influence leads to consideration of the condition of the structure destruction and the intense ground state at an explosion. The empirical method of definition of a zone contour of structure destruction and of a ground compression at an explosion is offered.

По сравнению с разрушением структуры при ударных, вибрационных и фильтрационных воздействиях характерной особенностью действия взрывов на грунт является многообразие причин, вызывающих разрушение их структуры. Непосредственными причинами разрушения структуры грунтов при взрывах могут быть: прохождение ударной волны по системе частиц грунта в поровой воде, взаимное смещение частиц грунта из-за образования и пульсации газовой полости и фильтрационные силы, возникающие вследствие давления газов взрыва на воду и ее движения по порам грунта. Для разработки достоверных расчетных методов оценки действия взрывов необходимо из большого числа действующих факторов выделить наиболее существенные, которые в основном и определяют разрушение структуры грунтов.

Основной причиной разрушения структуры и последующего уплотнения грунтов считаются взаимные смещения самих частиц грунта при взрывных воздействиях [1].

Взаимные смещения частиц при действии ударных волн определяются изменением напряжений в скелете грунта по сравнению с напряжениями от собственного веса грунта и пригрузки. Для характеристики изменения напряженного состояния скелета грунта введем соотношение

$$\Delta = \sigma(\rho_{\max}) / \sigma(\gamma_{zp}), \quad (1)$$

где  $\sigma(\rho_{\max})$  — максимальное давление ударной волны, передающейся на скелет грунта;  $\sigma(\gamma_{\max})$  — напряжение от собственного веса грунта и пригрузки.

С увеличением  $\Delta$  величина взаимных смещений частиц за период действия взрывной волны увеличивается. Вводя критическое значение  $\Delta_K$ , при котором происходит смещение частиц, вызывающее полное разрушение структуры грунта, можно определить контуры области, очерчивая ее линией  $\Delta = \Delta_K$ . В частном случае слоя однородного грунта зависимость (1) принимает вид

$$\sigma = \Delta_K \cdot \gamma_{zp} \cdot z. \quad (2)$$

Сжимающие напряжения  $\sigma(\rho_{\max})$  в скелете грунта в результате действия ударной волны можно определить, рассматривая в процессе сжатия грунт как трехкомпонентную среду. Характер процесса сжатия водонасыщенных грунтов в период действия взрывных волн, а следовательно, и характер взрывных воздействий, в значительной мере зависят от длительности взрывной волны и водопроницаемости грунтов.

Длительность действия взрывных волн, в зависимости от мощности и расстояния, может изменяться от миллисекунд до нескольких десятых долей секунды. В сравнительно маловодопроницаемых водонасыщенных песчаных грунтах, и тем более супесях, лессах или суглинках, за этот малый

промежуток времени не может произойти существенного отжатия воды из пор грунта. Поэтому для этих условий можно принять, что сжатие грунта за период действия взрывных волн определяется в основном объемной сжимаемостью трехкомпонентной среды (вода, газовые пузырьки, твердые частицы) и деформируемостью скелета грунта. Таким образом, сжатие сравнительно мало водопроницаемых грунтов при взрывных воздействиях происходит в условиях, близких к испытанию грунтов, в так называемой закрытой системе, т.е. без оттока воды из образца.

Под фазами грунта в дальнейшем понимаются компоненты грунта: вода, газ, минеральные твердые частицы, рассматриваемые как однородная среда, подчиняющаяся определенным законам деформирования.

Под скелетом грунта понимается совокупность минеральных частиц и среды, осуществляющей непосредственную связь структурных элементов. Связь между структурными элементами грунта может иметь как водно-коллоидную, так и цементационную природу.

Основными параметрами многофазного грунта являются объемная концентрация твердых частиц  $m_T = V_T / V$ , объемная концентрация жидкости  $m_B$  и газа  $m_G$ :  $m_B = V_B / V$ ;  $m_G = V_G / V$ , пористость  $m = V_{II} / V$ . Здесь  $V$  — объем элемента;  $V_{II}$  — объем пор;  $V_G$  — объем пор, занятый газом. Очевидно, что  $m_T + m_B + m_G = 1$ .

Удобными характеристиками являются коэффициент пористости  $e = V_{II} / V_T = m / m_T = m(1 - m)$ ; степень водонасыщения  $I_B = m_B / m = m_B / (m_B + m_G)$ .

Общее изменение объема элемента грунта  $\Delta V$  при всестороннем сжатии складывается из изменений компонентов, т.е.

$$\Delta V = \Delta V_B + \Delta V_T + \Delta V_G \quad (3)$$

В большом диапазоне нагрузок сжатие воды, и тем более минеральных частиц, можно считать линейно зависящим от давления и представить в виде [1]

$$\Delta V_B = \frac{\rho}{E_B} \cdot V_B \cdot p = \beta_B \cdot V_B \cdot p, \quad \Delta V_T = \frac{\rho}{E_T} \cdot V_T \cdot p = \beta_T \cdot V_T \cdot p, \quad (4)$$

где  $V_B$  и  $V_T$  — объемы воды и твердых минеральных частиц;  $E_B$  и  $E_T$  — модули объемной сжимаемости воды и твердых частиц;  $p$  — дополнительное избыточное давление в воде, окружающей твердые частицы.

Учитывая, что температура водонасыщенного грунта практически не меняется, сжимаемость газа можно рассматривать в предположении изотермического процесса. Растворимостью газа в воде за короткий период действия взрывной волны можно пренебречь. В этих условиях изменение объема газа будет равно:

$$\Delta V_G = \frac{\rho}{p_1 + p} \cdot V_G, \quad (5)$$

где  $V_G$  — объем защемленного газа;  $p_1$  — первоначальное давление в поровой воде, включая атмосферное.

Подставив (4) и (5) в уравнение (3) и перейдя к объемной деформации, получим:

$$\varepsilon_3 = \beta_B \cdot m_B \cdot p + \beta_T \cdot m_T \cdot p + m_G \cdot p / (p_1 + p). \quad (6)$$

Из условия неразрывности при отсутствии оттока воды суммарная объемная деформация компонент должна быть равна объемной деформации скелета грунта, т.е.  $\varepsilon_3 = \varepsilon_{ск}$ . В свою очередь объемная деформация скелета за счет изменения объема пор равна

$$\varepsilon_{ск} = e_1 - e(\sigma) / (1 + e_1), \quad (7)$$

где  $e_1$  — начальный коэффициент пористости;  $e(\sigma)$  — коэффициент пористости при сжимающих напряжениях  $\sigma$  в скелете грунта.

Учитывая, что часть нагрузки  $q$  передается на поровую воду  $p$ , а часть — на скелет грунта  $\sigma$ , из условия равновесия имеем:

$$q = \sigma + p. \quad (8)$$

Решив совместно систему уравнений (6)–(8), получим уравнение сжатия элемента грунта в условиях закрытой системы:

$$e_1 = e(\sigma) / (1 + e_1) = (\beta_B \cdot m_B + \beta_T \cdot m_T)(q - \sigma) - m_G(q - \sigma) / (p_1 + q - \sigma). \quad (9)$$

Уравнение (9) получено в предположении мгновенной деформируемости всех компонент и самого скелета грунта. Не учитываются их вязкие свойства, влияние которых, особенно вязкости скелета грунта, в условиях быстротекущих взрывных процессов может быть весьма существенно.

Решение уравнения (9) определяется видом принимаемой зависимости  $e(\sigma)$ , например, приняв ее в виде спрямленной компрессионной зависимости  $e(\sigma) = -\alpha\sigma + e_1$  или

$$\varepsilon_{CK} = a\sigma / (1 + e_1) = \beta_{CK} \cdot \sigma,$$

уравнению (9) можно придать вид:

$$\sigma^2 (\beta_{T.B} + \beta_{CK}) - \sigma [(p_1 + q)(\beta_{T.B} + \beta_{CK}) \cdot q \cdot \beta_{T.B} - m_\Gamma] + (p_1 q + q^2) \cdot \beta_{T.B} + q \cdot m_\Gamma = 0, \quad (10)$$

где  $\beta_{T.B} = \beta_T \cdot m_T + \beta_B \cdot m_B$ .

Объемная сжимаемость скелета грунта может быть получена по результатам испытаний сухих грунтов. Сжимаемость грунтов при статическом нагружении, как известно, значительно больше, чем при динамических воздействиях. К сожалению, исследований сжимаемости практически сухих грунтов при взрывных воздействиях выполнено ограниченное количество.

Для практических расчетов зон разрушения структуры грунта, т.е. в пределах относительно малых давлений, графики  $\sigma(\dot{\varepsilon})$  можно аппроксимировать зависимостью в виде

$$\varepsilon_{CK} = a\sigma / (\sigma + b). \quad (11)$$

Коэффициенты  $a$  и  $b$  будут иметь следующие значения: мелкозернистый песок —  $a = 0,048$ ,  $b = 2,2$  МПа; гравийно-песчаная смесь —  $a = 0,005$ ,  $b = 0$ ; супесь и суглинок твердые —  $a = -0,02$ ,  $b = -8$  МПа; супесь нарушенной структуры и лессовидный суглинок —  $a = 0,14$ ,  $b = 6$  МПа.

Тогда зависимость (10) с учетом (11) приобретает вид

$$a\sigma / (\sigma + b) = (q - \sigma)(\beta_{T.B} - m_\Gamma) / (p_1 + q - \sigma). \quad (12)$$

Анализ уравнений (10) или (12) показывает, что в зависимости от величины сжимаемости компонент  $\beta_T$ ,  $\beta_B$  и скелета грунта  $\beta_{CK}$  возможно различное распределение давлений между скелетом грунта  $\sigma$  и поровой водой  $p$ . Объемная сжимаемость минеральных частиц на порядок меньше сжимаемости воды, и поэтому роль их сжимаемости в распределении нагрузок между скелетом грунта и поровой водой незначительна и в большинстве случаев может не учитываться.

В водонасыщенных грунтах существенная передача взрывной нагрузки на скелет возможна в весьма малосжимаемых грунтах, т.е. при малой величине коэффициента  $\beta_{CK}$ . Так, например, в полностью водонасыщенном плотном песке с пористостью  $m = 0,4$ ,  $m_T = 0,6$ ,  $e_1 = 0,67$ ,  $\beta_{CK} = 10^{-2}$  МПа<sup>-1</sup> учет объемной сжимаемости воды ( $10^{-3}$  МПа<sup>-1</sup>) и минеральных частиц ( $10^{-4}$  МПа<sup>-1</sup>) по зависимости (12) приводит к передаче нагрузки на скелет грунта  $\sigma = 0,044 \cdot q$ , а остальная, большая часть нагрузки  $q$  воспринимается поровой водой.

С увеличением содержания газообразной составляющей сжимаемость поровой воды с газом увеличивается до  $2 \times 10^{-3}$  МПа<sup>-1</sup> и сжимаемость водонасыщенного грунта все в большей мере начинает определяться объемной сжимаемостью скелета грунта. В свою очередь это приводит к увеличению напряжений, передаваемых на скелет грунта  $\sigma = 0,18 \cdot q$ , и соответствующему уменьшению давлений, воспринимаемых поровой водой.

Задача определения границы зоны разрушения структуры и уплотнения грунта при взрывных воздействиях сводится к совместному рассмотрению условия разрушения структуры и напряженного состояния грунта при взрыве. Учитывая изложенное, можно предложить приближенный, полуэмпирический метод определения контура зоны разрушения структуры и уплотнения грунтов при взрывах. В качестве условия разрушения структуры принимается зависимость (2), а напряжения в скелете грунта определяются по уравнениям (9), (11) или, в простейших случаях, по зависимости (10), где всестороннее давление  $q$  принимается равным максимальному давлению на фронте ударной волны  $p_{\max}$ .

Для определения  $p_{\max}$  можно воспользоваться эмпирической формулой, полученной при обработке данных в работе [2]. Тогда определение границы зоны разрушения структуры грунта сводится к решению системы уравнений:

$$a\sigma / (\sigma + b) = (p_{\max} - \sigma) [(\beta_T \cdot m_T + \beta_B \cdot m_B) - m_\Gamma / (p_1 + \gamma \cdot z + p_{\max} - \sigma)], \quad (13)$$

$$\sigma = \Delta_K \cdot \gamma_{sp} \cdot z, \quad (14)$$

$$x = \left[ R^2 + (h - z)^2 \right]^{1/2}, \quad (15)$$

$$p_{\max} = \Delta P \cdot (R_0)^{-\mu\sigma}, \quad (16)$$

где  $\Delta P$  — максимальное избыточное давление в объеме при взрывном горении газозвоздушной смеси,  $R_0 = R/r_{СКВ}$  — безразмерное расстояние.

Задавшись  $R$ , по зависимости (16) определяем  $p_{\max}$ , а затем по известной  $\Delta_k$  из уравнения (14) находим  $z$ , а из уравнения (15) — величину  $x$ , т.е. координаты зоны разрушения структуры в радиусе  $R$ . Последовательно увеличивая  $R$ , можно построить график зоны разрушения структуры.

Величину  $\Delta_k$  приходится определять экспериментально, путем взрыва в шурфе и замера глубинными реперами пористости, максимальной глубины разрушения структуры и уплотнения  $z_{\max}$ .

#### Выводы

1. Проведенные исследования позволили разработать аналитическую зависимость динамического деформирования дисперсных грунтов, которая учитывает основные свойства и поведение грунтов при различных режимах нагружения.

2. Разработан полуэмпирический метод определения зон разрушения структуры грунта при взрывных воздействиях: в зависимости от величины сжимаемости компонентов грунта возможно различное распределение напряжений между скелетом грунта и поровой водой.

#### References

1. *Ivanov P.L.* The compression of bad connected grounds by explosions. — М.: Depths, 1983. — 230 p.
2. *Lyakhov G.M.* Bases of a explosion dynamics in grounds and liquid environments. — М.: Science, 1984. — 216 p.

УДК 622.673.1

### Повышение прочности конструкций горных машин, находящихся в длительной эксплуатации

### The strength increasing of constructions of mining machines that are in long term operation

Мехтиев А.Д., Югай В.В., Эйрих В.И., Кшалова А.А., Алимов М.Ш.

Карагандинский государственный технический университет (E-mail: barton.kz@mail.ru)

Шаршаған қирату қауіпті аймақтарда апатты жағдайда негізгі есеп тежегіш құрылғысын күшейту бойынша ұсыныстарды өңдеу болып табылады. Оған ANSYS бағдарламасын қолдану арқылы қол жеткізуге болады және де бұл ұзақ мерзім бойы ШПМ пайдалану, сондай-ақ қойылған есептің шешімі беріктік және сенімділіктің көрсеткіштерін сақтауға мүмкіндік береді. Тежегіш құрылғы сұлбасында негізгі даму процестері үлгіленген. Конструкциядағы жарықшақтардың ұлғаюының сипаты Fatigue Module ANSYS бағдарламасында жасалған. Конструкцияларды күшейту әдісін, ары қарай оның қирауына жол бермейтін әдісті, қарастырып шықтық.

The main aim is development of recommendations for strengthening the brake construction in accident dangerous areas of fatigue destruction. This allows to keep the HBM strength and reliability parameters during the exploitation period. Solving of the set problem is provided by using the ANSYS program's abilities. The main processes of fatigue cracks development in the «critical points» of the braking system construction are modeled. The «accident dangerous» areas of fatigue destructions and the character of cracks development in the construction are detected with a help of the ANSYS Fatigue Module. The construction strengthening method, which eliminates the possibility of the further destruction, is considered.

Обеспечение надежности работы тормозного устройства (ТУ) шахтной подъемной машины (ШПМ) требует научного поиска рационального варианта конструкции, способной длительное время противостоять усталостному разрушению и сохранять свою работоспособность на протяжении дли-