

Расчет конструкций на действие сейсмических сил
и оценка их сейсмостойкости

**ТЕХНОЛОГИЯ ЗАЩИТЫ СТРОИТЕЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ ОТ
ДЕЙСТВИЯ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ВОЛНЫ ПРИ ВЗРЫВНЫХ РАБОТАХ
В МЯГКИХ ГРУНТАХ**

НИКОЛЕНКО Ю.В., канд. техн. наук; МАЛОВ А.Н., канд. техн. наук,
СВИНЦОВ А.П., д-р техн. наук, проф.; РОГОВ В.А., д-р техн. наук, проф.
Российский университет дружбы народов, Москва

Представлены результаты исследования влияния взрывных волн в грунтах при камуфлетном взрыве на охраняемые объекты. На основе анализа многочисленных экспериментальных данных установлены закономерности изменения параметров напряженно-деформированного состояния грунтов, что позволило упростить методику расчета и более полного учета свойств самого грунта.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: сейсмическая волна, взрывные работы, мягкий грунт

Взрывные работы широко применяют в строительстве. Имеющийся научно-практический опыт позволяет акцентировать внимание на следующих технологических направлениях: устройство оросительных каналов, котлованов под водоемы (взрывы на выброс), уплотнение просадочных и лессовых грунтов, возведение камуфлетных фундаментов, дробление фундаментов, подлежащих сносу или реконструкции зданий и сооружений (взрыв может быть как направленным, так и с обрушением объекта на свое место), валка высотных объектов (дымовых труб, градирен, башен и пр.). Значительный объем работ с применением взрывов выполняют при реконструкции зданий и сооружений, в том числе внутри цехов, рядом с действующим оборудованием и конструкциями. Указанные строительные объекты называются охраняемыми, а взрывные работы проводят при обеспечении мероприятий по их защите. Особенно актуальной является задача защиты охраняемых объектов от воздействия сейсмических волн и волн сжатия, распространяющихся в грунтах. Успешное ее решение возможно с учетом закономерностей формирования и изменения напряженно-деформированного состояния грунтов под влиянием сейсмической волны и волны сжатия от взрыва. Многочисленными экспериментальными исследованиями [1-5] установлено, что основным фактором, определяющим диссипацию энергии на фронте волны напряжений, является свободная пористость грунта, тогда как минералогический (вещественный) состав его не играет значительной роли [5]. Вода, находящаяся в порах, оказывает большое влияние на прочностные характеристики грунта, непосредственно влияя на связи между твердыми частицами.

Известно, что между минеральными частицами могут образовываться либо кристаллические, либо водно-коллоидные связи, прямо зависящие от количества воды в грунте. В водонасыщенных грунтах существуют преимущественно водно-коллоидные связи, в сухих – кристаллизационные, во влажных – и те, и другие одновременно. При интенсивных давлениях, генерируемых взрывной нагрузкой, кристаллизационные связи практически не влияют на динамические параметры грунта вне зависимости от его вида. Это обусловлено относительно небольшой прочностью кристаллизационных связей (в пределах прочности грунта). Для более полного учета влияния воды, находящейся в свободных порах грунта, на его напряженно-деформированное состояние авторами выполнено новое прочтение результатов выполненных ранее экспериментальных исследований с изменением расстановки приоритетов.

При этом принято, что

- степень влажности грунта G_w является его обобщающей характеристикой, определяемой согласно требованиям СНиП 2.02.01-83* ;

- взрывное воздействие от сосредоточенного сферического заряда на глубине $\bar{H} \geq 8$; где \bar{H} – приведенная глубина заложения заряда; $\bar{H} = h/r_3$, h – глубина заложения заряда, м; r_3 – приведенный радиус сосредоточенного заряда к радиусу сферического заряда, $r_3 = 0,054\sqrt[3]{c}$ или – цилиндрического, $r_3 = 0,014\sqrt[3]{c}$;

- давления во всех грунтах равны на границе заряд-среда, которая удалена от геометрического центра заряда на расстояние $R_1 = 1$; $R_1 = r/r_3$; r – расстояние от геометрического центра заряда до точки, в которой определяется давление, м; c – масса заряда, кг;

- максимальные напряжения в волне сжатия в воде σ^* в зависимости от расстояния до точки взрыва определяются по формуле Коула:

$$\sigma^* = 533\left(\sqrt[3]{c}/R\right)^{1,13}, \text{ кг/см}^2,$$

где R – расстояние от центра взрыва до точки, в которой определяется давление, м; c – масса заряда, кг.

Приводя $(\sqrt[3]{c}/R)$ к R_1 , а также, используя дополнительно результаты, полученные в [3,4], авторы предлагают следующее выражение для водонасыщенных грунтов (при $G_w = 1$):

$$\sigma^* = 14.7 \cdot R_1, \text{ кг/см}^2 \quad (1)$$

Результаты расчетов по предложенной формуле (1) и формуле Коула представлены в табл. 1.

Таблица 1

Приведенное расстояние \bar{R}_1	Расстояние до измеряемой точки, м	Напряжения по Коулу, $\sigma_K, \text{ кг/см}^2$	Напряжения по расчету, $\sigma_P, \text{ кг/см}^2$	Относительная ошибка
10	3,16	1068,5	1076	0,007
20	6,32	493,0	489,8	0,006
50	15,8	173,4	173,4	0,000
60	18,9	141,0	140,9	0,001

Как видно из приведенной табл. 1 результаты расчета по формуле (1) хорошо согласуются с результатами, полученными по формуле Коула. Относительная ошибка не превышает 0,7%. При проведении исследований с взрывами зарядов различной мощности в условиях сферической и цилиндрической симметрии установлены эмпирические зависимости [1–5], характеризующие затухание максимальных компонент напряжений $\sigma_1^* \sigma_2^* \sigma_3^*$, МПа, с расстоянием от центра взрыва в виде: $\sigma_i^* = a_i R_i^{-b}$ при $i = 1, 2, 3$; где a_i – коэффициент, зависящий от типа ВВ, условий заряда, а также от вида и свойств грунтов; b_i – показатель степени, характеризующий затухание максимума напряжения в волне сжатия с увеличением расстояния за счет геометрического расхождения фронта волны, а также за счет потерь энергии на необратимые деформации грунтов. Развитие необратимых объемных деформаций происходит за счет уменьшения свободной пористости, т.е. максимальные давления, возникающие в грунтовом массиве при взрыве, и разрушающие кристаллизационные связи частиц, не состоящие вызвать заметные остаточные деформации минерального материала зерен [6, 7].

Для уточнения методики оценки воздействия сейсмических волн от взрыва на строительные объекты авторами обобщены результаты экспериментальных измерений полей напряжений в песчаных и лессовидных грунтах, суглинках и плотных глинах естественного залегания, взятых из работ [1-5], интегральными

степенями влажности (табл. 1). В связи с тем, что взрыв в водонасыщенных грунтах существенно отличается от взрыва не в водонасыщенных грунтах авторами принята за основной приоритет влажность грунта. С этих позиций в эмпирических формулах, рекомендованных [1-5] для каждого отдельного типа грунта, произведена замена $\sqrt[3]{c}/R$ на приведенное к сферическому заряду расстояние R_1 . Это позволило установить функциональную зависимость изменения коэффициентов a_1 и b_1 от интегральной степени влажности G_w грунта, т.е. найти: $a_1 = f(G_w)$ и $b_1 = \varphi(g_w)$. С учетом указанного приоритета получена функциональная связь между максимальным давлением в волне сжатия σ^* , интегральной степенью влажности G_w и приведенным расстоянием R_1 :

$$\lg \sigma_1^* = 5,072 - 0,932G_w - (3,806 - 2,706G_w) \lg R_1. \quad (2)$$

Таблица 1

Вид грунта	Объемная масса скелета, $\gamma_{ск}, \text{ г/см}^3$	Массовая влажность, $w, \%$	Интегральная степень влажности
Водонасыщенный песок естественного сложения [4]	1,58-1,60	27,4	1,0
Водонасыщенный насыпной песок с содержанием воздуха: [4]			
0,008-0,012			0,81
0,015-0,025			0,67
0,030-0,040			0,51
Песок ненарушенной структуры: [4]	1,48-1,62	8-10	0,25
Песок ненарушенной структуры: [5]	1,50-1,52	7-8	0,26
Песок ненарушенной структуры: [5]	1,50-1,52	10-12	0,34
Песок нарушенной структуры [4]	1,47-1,49	3-6	0,15
Песок нарушенной структуры [4]	1,45-1,46	5-7	0,21
Суглинки естественного сложения: [3]	1,34-1,38	12-14	0,25
Суглинки естественного сложения: [4]	1,60-1,65	10-15	0,34
Плотные глины [4]	1,70-1,75	20-22	0,62

Экспериментальные и расчетные данные по определению максимального давления в волне сжатия представлены в табл. 2. В рамках обобщения экспериментальных данных, представленных в [1, 2, 4, 5] уточнено значение коэффициента бокового давления ξ , которое определяется по формуле:

$$\xi = 0,145 + 0,855R_1. \quad (3)$$

Таблица 2

Приведенное расстояние от центра взрыва, \bar{R}_1	Максимальные давления в волне сжатия в зависимости от степени влажности грунтов G_w								
	0,15	0,17	0,21	0,25	0,34	0,51	0,67	0,84	1,0
10	<u>32,4</u>	<u>34,3</u>	<u>43,0</u>	<u>50,7</u>	<u>72,0</u>	<u>173,4</u>	<u>446,0</u>	<u>688,0</u>	<u>1145,0</u>
	34,0	37,0	43,5	51,2	74,0	148,3	385,0	510,0	1096,5
20	<u>3,1</u>	<u>3,48</u>	<u>4,7</u>	<u>1,9</u>	<u>10,3</u>	<u>28,6</u>	<u>73,6</u>	<u>197,0</u>	<u>553,0</u>
	3,2	3,60	4,7	1,8	10,0	27,6	71,6	197,0	505,0
30	<u>0,8</u>	<u>0,93</u>	<u>1,3</u>	<u>1,9</u>	<u>3,1</u>	<u>10,0</u>	<u>25,6</u>	<u>88,0</u>	<u>361,0</u>
	0,9	0,93	1,2	1,8	3,2	10,3	31,6	105,0	327,5
40	<u>0,3</u>	<u>0,35</u>	<u>0,50</u>	<u>0,80</u>	<u>1,50</u>	<u>4,7</u>	<u>16,1</u>	<u>59,0</u>	<u>267,0</u>
	0,3	0,36	0,49	0,67	1,35	5,1	18,0	68,0	238,6
50	-	-	-	-	-	-	<u>8,8</u>	<u>37,5</u>	<u>211,0</u>
	-	-	-	-	-	-	11,5	48,4	186,7

Примечание: значения в числителе – экспериментальные данные; значения в знаменателе – расчетные данные по формуле (2).

Величина коэффициента бокового давления по формуле (3) существенно зависит от интегральной степени влажности грунта. Значения ξ , вычисленные по формуле (3), статистически однородны с величинами коэффициентов, полученных в [1, 2, 4, 5] для отдельных видов грунтов.

Авторами выполнен анализ экспериментальных данных о скоростях движения максимальных напряжений D_m во взрывной волне [2, 4] с учетом ее распространения в водонасыщенном грунте. Указанный показатель определяется в зависимости от расстояния от точки взрыва и степени влажности грунтов:

$$\lg D_m = \lg(1,5783G_w + 2,134) + 1,268 - \lg R_l \quad (4)$$

Величина скорости движения максимальных напряжений, рассчитанная по формуле (4) с достаточной для инженерных расчетов точностью описывает фактические экспериментальные данные (табл. 3) и может быть использована для практических расчетов.

Таблица 3

Приведенное расстояние от центра взрыва, \bar{R}_1	Максимальные скорости распространения напряжений в грунте D_m в зависимости от степени влажности грунтов G_w				
	0,25	0,51	0,67	0,81	1,0
10	250,0	471,0	950,0		
	279,0	471,0	900,0		
20	133,0	230,0	460,0	880,0	
	139,0	235,0	450,0	1018,0	
30	96,0	160,0	300,0	570,0	
	93,0	157,0	300,0	680,0	
40	80,0	147,0	225,0	450,0	
	70,0	118,0	225,0	509,0	
50				400,0	1720,0
				407,0	1700,0

Примечание: значения в числителе – данные экспериментальных исследований; значения в знаменателе – расчетные данные по формуле (4).

Выбор средств и способов производства взрывных работ определяется типом строительных конструкций, подлежащих разрушению, наличием или отсутствием охраняемых объектов в зоне действия волны сжатия, а также рядом других факторов. При этом очень важным является показатель времени действия волны сжатия $\tau^\circ(R_1)$. Г.В. Рыковым [4] предложено описание времени действия волны сжатия на основе линейной зависимости $\tau^\circ(R_1) = (a_\tau + b_\tau R_1)10^{-3}$.

Учитывая степень влажности каждого грунта, а также то обстоятельство, что приведенное время действия $\tau^\circ(R_1)$ на приведенном расстоянии $R_1 = 1$ должно быть для данного ВВ постоянно, получили:

$$\tau^\circ(R_1) = (8 + 0,039G_w^{-1,939} R_1)10^{-3}, \quad \tau^\circ(R_1) = \tau/\sqrt[3]{c}, \quad (5)$$

где τ – время действия волны, с. Максимальные относительные ошибки при вычислении по формуле (5) не превышают 0,18.

Формулы (2), (4), (5) позволяют описать закономерности измерения напряжений за фронтом ударной волны на различных расстояниях (пределах области существования ударных волн) от центра взрыва в следующем виде:

$$\sigma_1(R_1, t) = \sigma^*(R_1)(1 - t/\tau(R_1))^{n_0}.$$

Семейство кривых $n_0(R_1)$ по некоторым исследованным грунтам представлены в [4]. С учетом степени влажности грунтов показатель степени затухания волны сжатия определяется по формуле

$$\lg n_0 = 2,063G_w^{0,195} - 0,8951\lg R_1. \quad (6)$$

Зависимость (6) описывает процесс затухания волны сжатия с достаточной для инженерных расчетов точностью.

Таким образом, в результате обработки экспериментальных данных, представленных в [1 – 5] установлено:

- для всех видов мягких грунтов обобщающей их характеристикой служит степень их влажности;
- в передаче давления при взрывных нагрузках основную роль играет вода, находящаяся в порах грунта;

- формулы (2-6) описывают закономерности изменения параметров взрывной волны любой точке (в пределах действия формул) в зависимости от мощности взрыва и расстояния от его центра.

Л и т е р а т у р а

1. *Красников Н.Д.* Динамические свойства грунтов и методы их определения. – Л.: Стройиздат, 1970.
2. *Ляхов Г.М., Полякова Н.И.* Волны в плотных средах и нагрузки на сооружения. – М.: Недра, 1967.
3. *Ляхов Г.М.* Волны в грунтах и пористых многокомпонентных средах. – М.: Наука, 1982.
4. *Рыков Г.В., Скобеев А.М.* Измерение напряжений в грунтах при кратковременных нагрузках. – М.: Наука, 1978.
5. *Смирнов А.Г., Биржшикис И.С.* Использование взрыва при строительстве сооружений на водонасыщенных грунтах. – М.: Недра, 1984.
6. *Губарев Г.А., Дамащук Л.И.* Взрывная проходка профильных выемок в мягких грунтах. – Киев: Наукова думка, 1978. – 28 с.
7. *Ганопольский М.И., Баран В.Л., Беллин В.А., Пупков В.В., Сивенков В.И.* Методы ведения взрывных работ: специальные взрывные работы. – М.: Изд-во Московского государственного горного университета, 2007. – 563 с.

PROTECTION OF CONSTRUCTION PROJECTS FROM ACTION OF THE SEISMIC WAVE WHEN BLASTING IN SOFT SOIL

You. Nikolenko, A. Malov, A. Svintsov, V. Rogov

Results of the study on the influence of the explosive waves in soft soil are presented when camouflet-blasting on protected projects. On the basis of experimental research, regularities of the changes of parameters of tense-deformed conditions of soil is established which has allowed to simplify the method of design and to account characteristics of soil.

