УДК 624.39.329

ВЛИЯНИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЗРЫВНЫХ ВОЛН НА СЕЙСМОСТОЙКОСТЬ ПОВЕРХНОСТНЫХ ОБЪЕКТОВ

Н. С. Ремез, докт. техн. наук, Н. Н. Богданова, асп. (Институт гидромеханики НАН Украины), М. Ю. Малькова, магистр (НТУУ «КПИ»)

Наведено результати теоретичних досліджень по визначенню впливу амплітуди і частоти коливань при техногенних вибухах на сейсмостійкість поверхневих об'єктів, що охороняються.

Ключові слова: сейсмовибухова хвиля, період коливань, амплітуда, критерій подібності.

Приведены результаты теоретических исследований по определению влияния амплитуды и частоты колебаний при техногенных взрывах на сейсмостойкость оснований охраняемых поверхностных объектов.

Ключевые слова: сейсмовзрывная волна, период колебаний, амплитуда, критерий подобия.

Results of theoretical researches on the definition of influence of amplitude and vibration frequency on seismic stability of the foundation of surface objects to be protected at technogenic explosions are considered.

Keywords: seismoblast wave, period of vibrations, amplitude, criterion of similarity.

Анализ состояния проблемы. Проблема взаимодействия сейсмовзрывных волн (СВВ) с элементами конструкций в грунтах (природными и инженерными объектами) достаточно актуальна в данное время, поскольку такие объекты под влиянием техногенных нагрузок находятся в зоне риска, то есть возможны неравномерные проседания фундаментов, дополнительные нагрузки в конструкциях строений, снижение их надежности и даже разрушение. При этом возникает проблема рационального проектирования таких конструкций и прогнозированной оценки их стойких свойств, что невозможно без точного знания влияния и характера действия внешних сил. Именно поэтому возникает необходимость детального изучения характера поведения СВВ и выделения таких ее характеристик, которые в наибольшей степени оказывают влияние на систему грунтовое основание–фундамент–сооружение. Анализ публикаций по данной теме показывает, что большинство работ в области решения задач динамики и сейсмостойкого строительства рассматривают влияние сейсмических волн от землетрясений на сооружения [1–7]. Вместе с тем стоит отметить, что исследований, касающихся воздействия СВВ на природные и инженерные объекты, намного меньше, хотя интенсивность влияния СВВ на эти объекты значительно мощнее. Учитывая

тот фактор, что за последнее время существенно увеличилось количество техногенных воздействий, эта проблема является актуальной задачей для исследования.

Для изучения воздействия динамических нагрузок на сооружения используются теоретические, экспериментальные исследования, а также методы эвристического подхода, основанные на определении вероятности повреждения строений и сооружений [8]. Большинство ученых рассматривают скорость смещения грунта в качестве основного критерия оценки сейсмического действия взрыва [9–13]. Но, как показывает практика, решать задачи сейсмической безопасности необходимо с учетом выборочной реакции объекта на сейсмоколебания, то есть с учетом амплитудно-частотной характеристики колебания грунта и охраняемого объекта. В работе [14] показано, что интенсивность действия СВВ на сооружение, кроме основного критерия – скорости смещения грунта, зависит от соотношения периода колебаний грунта и периода собственных колебаний сооружения.

Цель работы – теоретическое исследование влияния амплитудно-частотной характеристики сейсмовзрывной волны на устойчивость системы грунтовое основание–фундамент–сооружение.

Материал и результаты исследований. В статье использован подход, предложенный в работе [15] для исследования действия сейсмического воздействия на грунтовое основание. Для грунта, моделируемого упруговязкой средой, введен комплекс безразмерных критериев подобия и проанализировано влияние параметров сейсмовзрывных колебаний на величину кинематических характеристик движения свободной поверхности грунтового массива.

Полагается, что горизонтальное и вертикальное воздействия передаются со стороны более жесткой породы. Вышележащий грунт характеризуется модулем упругости $E = 3G$ (G – модуль сдвига) и динамическим коэффициентом ньютоновской вязкости μ. Решения строятся для условий плоской задачи. Характерным линейным размером является расстояние от свободной поверхности до плоскости сейсмического воздействия h.

Компоненты тензора напряжения $p_{ij}(x_2, t)$, согласно принятой модели грунта, определяются зависимостями:

$$p_{ij} = \alpha_i \left(G \frac{\partial u_i}{\partial x_2} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_2 \partial t} \right), \qquad (1)$$

где $\alpha_i = 1$ при $i = 1$, $j = 2$; $\alpha_i = 3$ при $i = j = 2$; $u_1 = u_1(x_2, t)$ и $u_2 = u_2(x_2, t)$ – горизонтальное и вертикальное перемещения.

Подставляя (1) в дифференциальные уравнения движений грунта

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \frac{\partial p_{ij}}{\partial x_2}, \qquad (2)$$

получим

$$\frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \alpha_i (a^2 \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^3 u_i}{\partial x_2^2 \partial t}), \tag{3}$$

где $a^2 = G/\Gamma$; $\nu = \mu/\rho$ – кинематический коэффициент вязкости, ρ – плотность грунта.

Граничные условия для искомых функций $u_1(x_2,t_1)$ и $u_1(x_2,t_2)$ имеют вид:

при $x_2 = h \quad u_i(h,t_i) = \Delta_i \sin \omega_i t_i$, (4)

где ω_i – частоты горизонтальных (i = 1) и вертикальных (i = 2) колебаний слоя; Δ_i – амплитуды, соответствующие значениям сейсмических воздействий: $t_2 = t_1 + \Delta t$, $\omega_2(t_2 - t_1) = \varphi$ – сдвиг фаз горизонтальных и вертикальных колебаний слоя.

При $x_2 = 0$

$$p_{ij}(0,t) = 0, \; G\frac{\partial u_i}{\partial x_2} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_2 \partial y} = 0. \tag{5}$$

Общие решения уравнений (3) могут быть представлены в виде:

$$u_i = u_i(x_2, t_{i)} = R_i(x_2) e^{-i\omega_i t_i} . \tag{6}$$

Подставляя (6) в (3), после исключения сомножителей $e^{-i\omega_i t_i}$, получим для функций $R_i(x_2)$ обыкновенные однородные дифференциальные уравнения второго порядка:

$$\alpha_i(\nu\omega_i + ia^2)\frac{d^2 R_i}{dx_2^2} + i\omega_i^2 R_i = 0. \tag{7}$$

Составляя для (7) характеристические уравнения, получаем для их комплексных корней k_i и l_i выражения $k_i = m_i + n_i i$; $l_i = -(m_i + n_i i)$, где

$$m_i = \left\{ \frac{\left[(1+\psi_i{}^2)^{0.5} - \psi_i\right]}{2(1+\psi_i{}^2)} \cdot \frac{\omega_i}{\alpha_i \nu} \right\}^{0.5}, \tag{8}$$

$$n_i = -\left\{ \frac{\left[(1+\psi_i{}^2)^{0.5} + \psi_i\right]}{2(1+\psi_i{}^2)} \cdot \frac{\omega_i}{\alpha_i \nu} \right\}^{0.5}, \tag{9}$$

$\psi_i = \dfrac{a^2}{\nu\omega_i}$ – безразмерная величина, принимаемая в дальнейшем за первый критерий подобия задачи: $[m] \to [n] \ldots$ см$^{-1}$.

Решение уравнения (7) с учетом граничных условий (5) имеет вид:

$$R_i = R_i(x_2) = C_i(l_i e^{k_i x_2} + k_i e^{k_i x_2}), \tag{10}$$

где постоянные C_i являются комплексными величинами.

Представляя $e^{-i\omega_i t_i} = \cos\omega_i t_i - i\sin\omega_i t_i$, определим искомые функции $u_i(x_2,t_i)$ как действительные части полученных зависимостей. Используя граничные условия (4) и приравнивая коэффициенты при одинаковых тригонометрических функциях, получим:

$$u_i(x_2,t_i) = \frac{\Delta_i}{D_i}((A_h A_x + B_h B_x)\sin\omega_i t_i + (B_h A_x - A_h B_x)\cos\omega_i t_i), \tag{11}$$

$$A_x = chm_i x_2 \cdot \cos n_i x_2 ... A_h = chm_i h \cdot \cos n_i h,$$

$$B_x = shm_i x_2 \cdot \sin n_i x_2 ... B_h = shm_i h \cdot \sin n_i h,\ D_i = A_h^2 + B_h^2. \tag{12}$$

Величина горизонтального и вертикального перемещений грунта на свободной поверхности, согласно (12):

$$u_1(0,t_1) = \frac{\Delta_1}{D_1}(A_h \sin\omega_1 t_1 + B_h \cos\omega_1 t_1), \tag{13}$$

$$u_2(0,t_2) = \frac{\Delta_2}{D_2}(A_h \sin\omega_2 t_2 + B_h \cos\omega_2 t_2). \tag{14}$$

Из экспериментальных данных [14] следует, что наиболее характерные частоты колебаний при техногенных взрывах лежат в диапазоне от 15 до 92 Гц.

Для расчета были выбраны такие исходные данные: для горизонтальных колебаний T_1 = 0,15с, ω = 41,89 $с^{-1}$; для грунта ρ = $2\cdot10^{-3}$ гс·$с^2$·$см^{-4}$, $G = 2\cdot10^5$ гс·$см^{-2}$, μ = $55\cdot10^3$ гс·с·$см^{-2}$, $v = 27{,}5\cdot10^6$ $с^{-1}$·$см^2$. При этом $a = 10^4$ $с^{-1}$·см, $m_1 = 0{,}8\cdot10^{-4}$ $см^{-1}$, $n_1 = -0{,}9\cdot10^{-4}$ $см^{-1}$, $A_1 = -1358$, $B_1 = -614{,}254$, $D_1 = 2{,}22\cdot10^6$ и $\beta_1 = 0{,}14\pi = 0{,}425$. Для вертикальных колебаний $m_2 = 0{,}7\cdot10^{-4}$ $см^{-1}$, $n_2 = -0{,}7\cdot10^{-4}$ $см^{-1}$, $A_2 = 413{,}377$, $B_2 = -360{,}236$, $D_2 = 3{,}007\cdot10^5$, $\beta_2 = 0{,}23\pi = 0{,}717$. Рассматривался случай, когда сдвиг фаз горизонтальных и вертикальных колебаний грунта соответствует совпадению во времени их амплитудных значений на свободной поверхности. При этом $\varphi = \omega\Delta t = \beta_1 - \beta_2 = -0{,}292 = -0{,}09\pi$, $\Delta t = -0{,}007$ с.

На рис. 1 приведены расчетные зависимости горизонтальных и вертикальных перемещений при распространении поверхностной (*а*) и углубленной (*б*) СВВ.

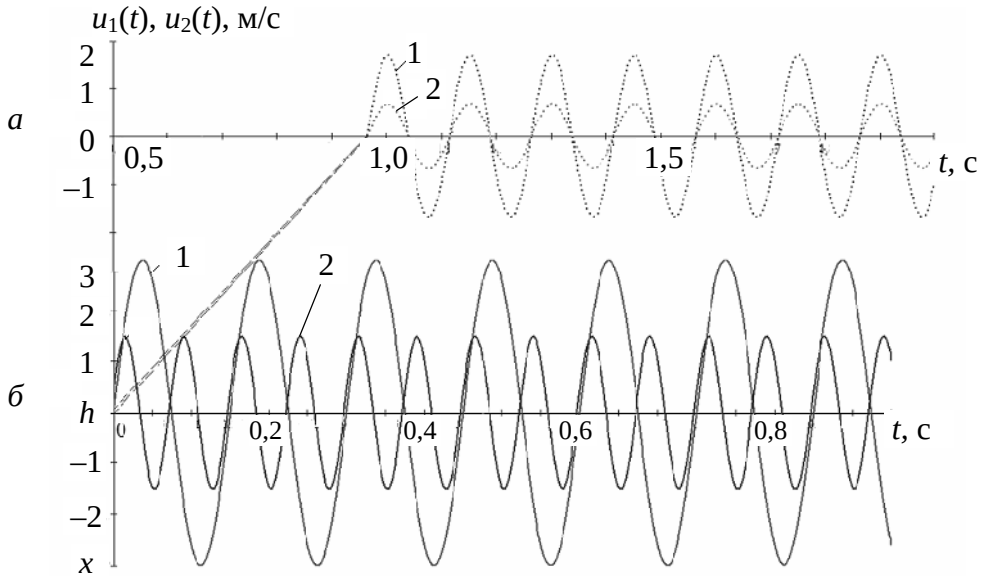

Рис. 1. Зависимости горизонтальных (кривая *1*) и вертикальных (кривая *2*) перемещений при распространении поверхностной (*а*) и углубленной (*б*) СВВ при периоде колебаний T = 15 Гц и массе наземного сооружения q = 0,0005 кгс·с^2·см$^{-3}$

Из анализа рисунка следует, что при достижении СВВ дневной поверхности происходит снижение ее амплитуды более чем в 2 раза и увеличение периода от 0,15 до 0,17 с. Интересной особенностью является то, что на поверхности отсутствуют сдвиг фаз горизонтальных и вертикальных смещений. Это может повлечь за собой увеличение результирующего смещения и негативно повлиять на сейсмостойкость охраняемого объекта.

Были проведены расчеты для различных периодов СВВ (рис. 2). Как и следовало ожидать, увеличение амплитудно-частотного спектра СВВ приводило к увеличению горизонтальных и вертикальных смещений на поверхности грунта.

При исследовании влияния глубины проведения взрывов установлено, что сейсмическое действие взрыва на меньшей глубине больше. Увеличение глубины заложения зарядов в 2 раза привело к снижению перемещения на порядок.

Проводились расчеты для различных масс охраняемого объекта (q изменялось в 100 раз), однако при этом, в отличие от воздействия сейсмических волн от землетрясений [15], значительное увеличение массы объекта практически не меняет амплитудно-частотного спектра колебаний. Это объясняется тем, что по сравнению с землетрясениями взрывы генерируют значительно более высокочастотные волны, при которых инерционные свойства охраняемого объекта не успевают проявиться.

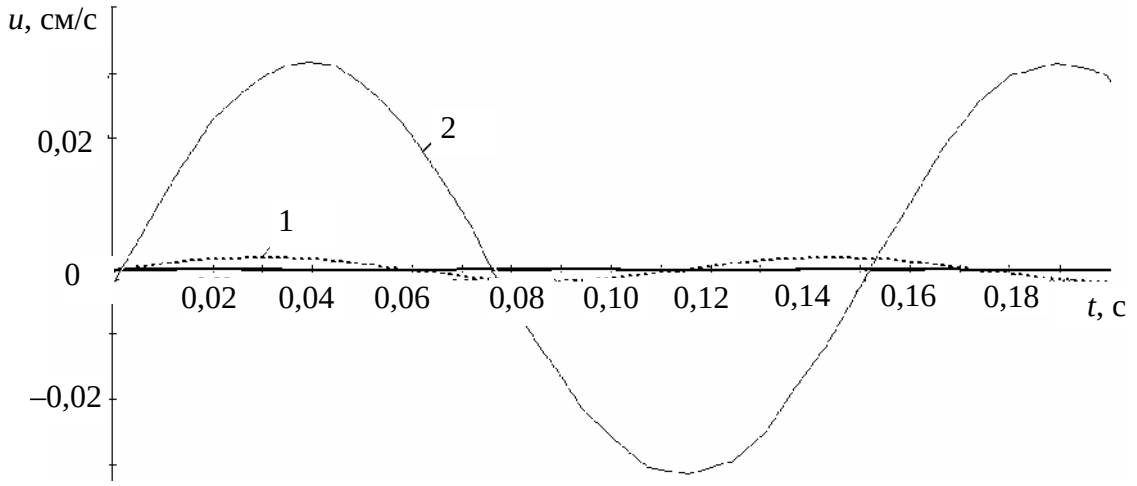

Рис. 2. Горизонтальные перемещения грунта при взрывах на глубине h = 50 м, приведенной массе наземного сооружения q = 0,0005 кгс·с^2·см$^{-3}$ и разных периодах колебаний: *1* – T = 0,11 с; *2* – T = 0,15 с

Выводы

Разработана методика расчета перемещений грунтового основания поверхностных охраняемых объектов. В результате исследования установлено, что амплитудно-частотный спектр колебаний при техногенных взрывах имеет значительное влияние на колебательный процесс охраняемых поверхностных объектов. Увеличение периода и амплитуды колебаний грунта приводит к значительному увеличению перемещений основания сооружения, а наложение горизонтальных и вертикальных перемещений может привести к значительному снижению его сейсмостойкости. Установлено, что колебания от взрывов, имеющие меньшие периоды колебаний по сравнению с землетрясениями, оказывают менее разрушительное влияние на сооружения.

Результаты данной работы могут быть использованы при расчете сейсмобезопасных параметров проведения взрывных работ вблизи охраняемых объектов. Направлением дальнейших исследований может быть разработка рекомендаций по определению параметров взрывных работ для конкретных грунтов и применения различных типов ВВ.

1. *Кауфман Б. Д.* Учет нагрузок / Б. Д. Кауфман, С. Г. Шульман // Сейсмические воздействия на гидротехнические и энергетические сооружения. – М.: Наука, 1980. – 256 с.

2. *Бирбраер А. Н.* Прочность и надежность конструкций АЭС при особых динамических воздействиях / А. Н. Бирбраер, С. Г. Шульман – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 304 с.

3. *Кириллов А. П.* Взаимодействие фундаментов сооружений электростанций с основанием при динамических нагрузках / А. П. Кириллов, В. В. Крылов, А. Е. Саргсян – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 354 с.

4. *Завриев К. С.* Основы теории сейсмостойкости зданий и сооружений / К. С. Завриев, А. Г.Назаров [и др.]. – М.: Стройиздат, 1970. – 280 с.

5. *Хачиян Э. Е.* Динамические модели сооружений в теории сейсмостойкости / Э. Е. Хачиян, В. А. Амбарцумян. – М.: Наука, 1981. – 204 с.

6. *Окамото Ш.* Сейсмостойкость инженерных сооружений /Окамото Ш. – М.: Стройиздат, 1980. – 342 с.

7. *Скавуццо Р.* Горизонтальные взаимодействия сооружений с сейсмическими волнами / Р. Скавуццо, Ж. Бейли, Д. Рафтопулос // Труды американского общества инженеров-механиков. Серия Е. Прикладная механика, 1971. – № 1. – С. 123–130.

8. *Черний В. Г.* Еврістичні оцінки ймовірності ушкодження будівель і споруд у складних грунтових умовах / В. Г. Черний // Галузеве машинобудування, будівництво: Зб. наук. праць. – Полтава: ПНТУ, 2003. – Вип. 12. – С. 241–247.

9. *Вовк А. А.* Сейсмическое действие взрыва рассредоточенного заряда / А. А. Вовк, А. А. Кузьменко // Прикладна гідромеханіка. – 2001. – Т. 3 (75), № 2. – С. 5–9.

10. *Богацкий В. Ф.* Охрана инженерных сооружений и окружающей среды от вредного действия промышленных взрывов / В. Ф. Богацкий, А. Г. Фридман. – М.: Недра, 1982. – 162 с.

11. *Миронов П. С.* Взрывы и сейсмобезопасность сооружений / Миронов П. С. – М.: Недра, 1973. – 168 с.

12. *Сафонов Л. В.* Сейсмический эффект взрыва скважинных зарядов /Л. В. Сафонов, Г. В. Кузнецов. – М.: Наука, 1967. – 102 с.

13. *Kuzmenko A. A., Dauetas A. A.*. Seismic effects of blasting in rock / A. A. Kuzmenko, V. D. Vozobev, I. I. Demisyuk. – Oxford IBH Pyblishing Co. Pvt. Ltg, 1993. – 169 p.

14. *Бойко В. В.* Особенности механизма образования источника сейсмоизлучения при взрывном разрушении анизотропных горных массивов / В. В. Бойко, Н. С. Ремез, Т. В. Хлевнюк // Вісник НТУ України «КПІ». Серія «Гірництво»: Зб. наук. праць. – 2002. – № 7. – С. 77–83.

15. *Гениев Г. А.* О критериях подобия в задаче о перемещениях поверхности грунтового массива, вызванных горизонтальными и вертикальными сейсмическими воздействиями / Гениев Г. А. // Сейсмостойкое строительство. – 1999. – № 5. – С. 26–28.