

**ГЕОМЕХАНІКА**

УДК 622.235.535

**О. А. Вовк**, д. т. н., доц., **Н. А. Шевчук**, к. т. н., доц. (НТУУ «КПІ»)**ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ СЕЙСМОБЕЗОПАСНОСТИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ОБЪЕКТОВ****O. Vovk, N. Shevchuk** (National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»)**INVESTIGATION OF SURFACE WAVES PARAMETERS FOR SEISMIC SAFETY INCREASING OF SURFACE OBJECTS**

*В статті розглянуто особливості руху поверхневих хвиль, виконано аналіз існуючих методик знаходження часових характеристик та закономірностей їх зміни в процесі руху R-хвилі вздовж вільної поверхні. Коригування критичних нормативних показників сейсмобезпеки поверхневих об'єктів враховує співвідношення періоду коливань в R-хвилі до періоду власних коливань об'єкту, що охороняється, що виражається через відповідний коефіцієнт.*

**Ключові слова:** R-хвилі, сейсмобезпека, заряд, поверхня, гіповідстань, коливання.

*В статье рассмотрены особенности движения поверхностных волн, выполнен анализ имеющихся методик нахождения временных характеристик и закономерностей их изменения в процессе движения R-волны вдоль свободной поверхности. Корректировка критических нормативных показателей сейсмобезопасности поверхностных объектов учитывает отношение периода колебаний в R-волне к периоду собственных колебаний защищаемого объекта, что выражается через соответствующий коэффициент.*

**Ключевые слова:** R-волны, сейсмобезопасность, заряд, поверхность, гипорасстояние, колебания.

*The article describes the features of surface waves motion as well as the analysis of existing methods for finding the timing and patterns of change in motion R-waves along the free surface. In particular, for the adjustment of critical standard performance for surface objects seismic safety we should consider the ratio of the period of oscillations in the R-wave to the period of oscillation of the object to be protected, which is expressed as a coefficient. Time – frequency performance under different formulas in R-wave were calculated and compared with each other and with values in R-wave depending on two main factors: the weight of the charge and the reduced distance, the results of which are shown in this paper. Indirectly, it was found that the at any epicentral distance surface wave is significantly seismic unsafety than the body wave, which in any hypocentral distances at different points on the surface may not exceed the period of oscillation in the above point with reduced radius equal to one.*

**Keywords:** R-waves, seismosafety, charge, surface, hypodistance, oscillation.

**Введение.** Разработка угольных месторождений сопровождается рядом негативных последствий, важнейшими из которых могут быть названы сдвигание горных пород и просадка над выработанными пустотами, загрязнение атмосферы, подземных и поверхностных вод с нарушением режимов водных потоков и т.п. Эти процессы представляют ещё большую

опасность, если они происходят в сочетании с динамическими воздействиями антропогенного происхождения, в первую очередь сейсмическими колебаниями, вызванными взрывными работами или горными ударами. Последнее является одним из наиболее значимых негативных событий, сопутствующих процессу разработки угольных пластов. Они часто приводят к катастрофическим последствиям, сопровождаются человеческими жертвами, разрушениями, и повреждениями подземных и поверхностных объектов, нарушают на длительный период технологический процесс на подготовительных и очистных работах. Вероятность подобных геодинамических проявлений и их энергетические характеристики, включая сейсмическую составляющую, с глубиной резко возрастает, поскольку зависят от масштабов накопления упругой энергии, а они в свою очередь функционально определяются степенью метаморфизма (крепостью пород) и уровнем литологических напряжений, пропорциональных глубине.

При изучении закономерностей движения сейсмических волн аналитическими методами приемлемый результат возможно получить лишь рассматривая этот процесс в однородной упругом неограниченном пространстве с использованием положения теории упругости о линейности функции «напряжение–деформация», принимая закон затухания в виде

функции геометрической расходимости  $f_{pax}(r) = \left(\frac{r_u}{r_p}\right)^{\frac{x-1}{2}}$ . Однако, в реальных

условиях геологические среды, в которых распространяются сейсмические волны, не являются ни абсолютно упругими, ни однородными. Они имеют слоистую структуру в виде пластов скальных пород с различными физико–механическими (в том числе упругими и диссипативными) характеристиками, в верхней части, как правило, покрытыми наносными нескальными грунтами. Волновая картина в последних представляет особый интерес, поскольку они являются местом расположения поверхностных объектов, подверженных воздействию этих сейсмических колебаний. Сейсмический сигнал на границах раздела отдельных слоев подвержен изменениям, величина которых тем больше, чем больше разница свойств соседних слоев. Поэтому, при составлении алгоритма движения требуется учитывать согласно законам сейсмической геометрии поправки на преломление волн на скоростной границе «скала – наносы».

**Литературный обзор.** Из числа различных типов волн, возникающих на границе сейсмического очага, наибольший интерес представляют две разновидности объемных волн: продольные (P) и поперечные (S), и их преобразование по достижению свободной поверхности вдоль нее волны нового типа (поверхностной) – более энергонасыщенной. Так, по данным некоторых авторов [1], она несет до 68 % сейсмической энергии, в то время как продольная всего 7 %, т.е. почти в 10 раз меньше, и на долю поперечной приходится четвертая часть. Однако, это относится к случаям массовых многорядных взрывов зарядов на относительно небольших глубинах. При иных

условиях возбуждения колебаний [2] эти соотношения будут другими, однако, поверхностная волна остается главным носителем энергетического потенциала в сравнении с объемными разновидностями волнового спектра, в первую очередь за счёт превалирующего низкочастотного диапазона колебаний частиц [3].

Сейсмические волны любой разновидности характеризуются рядом параметров и отличительных признаков, важнейшими среди которых можно назвать динамические характеристики (смещение, скорость, ускорение частиц среды, частотный спектр, фазовая скорость  $V_0$ , скорость продольной  $V_p$ , поперечной  $V_s$ , поверхностной  $V_R$  волн, период колебаний  $T_p, T_s, T_R$ ), силовые параметры (радиальное напряжение  $\sigma_r$ , удельный импульс), удельная энергия, интенсивность (средняя плотность потока энергии  $I_{cp}$ ) и др. [4].

При анализе параметров сейсмических волн широко используют принцип геометрического и энергетического подобия, выражая закон их движения через приведенную массу заряда  $Q_{np} = \frac{Q_{\text{вв}}^{1/3}}{r}$  или приведенное расстояние  $\frac{r}{Q_{\text{вв}}^{1/3}}$ , которые позволяют установить связь между параметрами источника колебаний и среды в функции расстояния [5]. До сих пор, в качестве основного критерия, на основе которого разработаны нормативы сейсмобезопасности поверхностных зданий и сооружений, используется показатель допустимой массовой скорости  $u_{\text{дон}}$  [6, 7]. Более полная и достоверная картина может быть получена при рассмотрении силовых составляющих сейсмических колебаний в явном виде [8], а не опосредствовано через массовую скорость, т. к. разрушения и деформации защищаемых объектов являются следствием импульсных нагрузок, вызывающих запредельные напряжения и деформации в элементах конструкций (или грунтах оснований фундаментов), а процесс деформирования и разрушения материалов и конструкций является инерционным и наступает в том случае, когда приложение усилия длится какое-то определенное время, достаточное для накопления критических параметров деформаций [9]. Достижение их (при прочих равных условиях) зависит и от ответной реакции сооружения – релаксации, которая может быть заменена показателем периода собственных колебаний  $T_0$  [10, 11].

В результате исследований последних лет, выполненных в Институте гидромеханики НАН Украины, установлено [12], что в зависимости от соотношения временных характеристик системы «грунт – сооружение»  $m = \frac{T_R}{T_0}$ , нормативные безопасные показатели массовой скорости (ускорение) следует корректировать умножением на коэффициент  $K_m$ , который может иметь значение значительно больше или меньше единицы для поверхностных объектов в зависимости от величины собственных колебаний  $T_0$  при одних и тех же значениях  $T_R$  [13]. Таким образом, видимый период колебаний в

поверхностной волне выступает как один из наиболее важных ее характеристик.

**Цель работы** – рассмотреть особенности движения поверхностных волн, проанализировать имеющиеся методики нахождения временных параметров и закономерностей их изменений в процессе движения R–волны вдоль свободной поверхности для повышения прогнозных оценок сейсмостойчивости объектов горнодобывающей инфраструктуры. Для достижения цели в работе были сформулированы следующие задачи: исследовать параметры движения поверхностных волн вдоль свободной поверхности; определить влияние частотно – временных параметров R–волн на критические нормативные показатели сейсмобезопасности; дать достоверную оценку временных параметров R–волны у защищаемого объекта; исследовать показатели периода колебаний в R–волне при различных значениях приведенных расстояний и веса заряда; установить вид профиля R–волны вдоль свободной поверхности.

**Результаты исследований.** Повышение прогнозных оценок сейсмостойкости объектов горнодобывающей инфраструктуры. Исследование параметров движения поверхностных волн вдоль свободной поверхности.

Анализируя экспериментальные материалы по регистрации сейсмических колебаний датчиками, установленными на поверхности, видно, что первым вступлением является продольная волна P, за ней проходит очень сложный цуг волн, образованный продольной поперечной волнами, их отражениями, как от границы наносов и скальных пород, так и от дневной поверхности. Наиболее благоприятными для возбуждения вблизи свободной поверхности этих колебаний является именно слой грунта, лежащего на скальном основании, (что имеет место в подавляющем большинстве случаев ведения взрывных работ и залегания угольных пластов, разработка которых сопровождается горными ударами–источниками сейсмических колебаний, достигающих свободной поверхности).

Суммарные колебательные движения частиц поверхностной волны происходят по сложной эллипсообразной (в плоскости x-y) траектории. Эти волны отличаются и другими характерными признаками, в частности:

1. максимальное смещение и скорость обратно пропорциональны расстоянию  $r$  в степени 0,5 по сравнению с P – волнами, затухающими по закону  $r^{(1-1,7)}$ , т.е. они затухают значительно медленнее;
2. период колебаний  $T_R$  в 2 – 3 раза больше периода P – волны;
3. скорость движения вдоль поверхности  $V_R$  существенно меньше скорости  $V_p$  и составляет  $(0,9 – 0,92)V_s$ ;
4. период в 2-3 раза больше этого показателя в P – волне;
5. период  $T_R$  по мере удаления от эпицентра увеличивается на величину

$$r_{np}^n.$$

Сложность волновой картины в приповерхностном слое не дает возможности выйти на сколько-нибудь адекватные аналитические построения, фиксирующие главные параметры на фронте волны, их взаимодействия между

собой и параметрами среды и изменения в процессе движения. Отмеченные обстоятельства вынуждают специалистов прибегать к эмпирическим инструментам исследования для получения требуемой информации, что в полной мере относится и к получению частотно-временных характеристик, как функции энергетического показателя очага и эпицентрального расстояния до исследуемого пункта на свободной поверхности. Физико-механические характеристики среды интегрально учитываются введением коэффициента пропорциональности. Результаты экспериментальных исследований степени влияния частотно-временных характеристик системы «грунт–сооружение» позволяют конкретизировать реальную роль временного показателя R–волны на степень сейсмобезопасности поверхностных зданий по общепринятому динамическому критерию.

В табл. 1 приведены, в качестве примера, расчетные данные по величине допустимых, по сравнению с данными нормативной шкалы для III класса, сооружений по массовой скорости от 7 до 0,5 см/с. Реально допустимые значения  $u_{дон}^{ep}$  рассчитывались по формуле:

$$u_{дон}^{ep} = u_0 \frac{c}{B_{зд(m)}}, \quad (1)$$

$$\text{где: } B_{зд(m)} = \left[ \left( 1 - \frac{T^2}{T_0^2} \right)^2 + \frac{4\lambda^2}{\Pi^2 + \lambda^2} \cdot \frac{T^2}{T_0^2} \right]^{-0,5}, \quad (2)$$

$$C = \frac{T_0^2}{T_{сем}^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\lambda_{сем}}}, \quad \text{где:} \quad (3)$$

$T_{сем}$  и  $\lambda_{сем}$  – показатели стандартного сейсмометра (0,25 с и 0,5 с соответственно);  $\lambda$  – коэффициент демпфирования здания.

Таблица 1. Допустимые ускорения  $a_{дон}^{ep}$  для зданий III класса при  $\lambda = 0,3$  и допустимых массовых скоростях 0,5–7 см/с для трех значений периода собственных колебаний сооружений 0,2 – 0,4 с

	$U_0$ , см/с по норматива вм для зданий III категорий	$a_{дон}^{ep}$ мм/с <sup>2</sup> при $\lambda = 0,3$ и значениях $m_\tau$ и $T_R$									Диапазон изменений коэффицие нта $K_m = \frac{a_{m\tau}}{a_n}$
		m	0,125	0,16	0,25	0,31	0,33	0,416	0,44	0,5	
$T_0$ , с; $f_0$ , Гц	$T_R$ при $T_0 = 0,2$		0,025	0,032	0,05	0,062	0,066	0,083	0,088	0,1	
	$T_R$ при $T_0 = 0,3$		0,0375	0,048	0,075	0,093	0,099	0,125	0,132	0,15	
	$T_R$ при $T_0 = 0,4$		0,05	0,064	0,1	0,124	0,132	0,166	0,176	0,2	

0,2 с; 5Гц	7	-	$\frac{1758}{1103}$	$\frac{1374}{844}$	$\frac{879,2}{521,2}$	$\frac{709,0}{403,1}$	$\frac{666,0}{379}$	$\frac{529,6}{277}$	$\frac{499,5}{257}$	$\frac{439,6}{211}$	0,63-0,48
	5	-	$\frac{1256}{787,9}$	$\frac{981,3}{602,9}$	$\frac{628}{372,3}$	$\frac{506,5}{287,9}$	$\frac{475,8}{270,7}$	$\frac{378,3}{197,9}$	$\frac{356,8}{183,6}$	$\frac{314}{150,7}$	
	3	-	$\frac{753,6}{472,7}$	$\frac{588,8}{361,7}$	$\frac{376,8}{223,4}$	$\frac{303,9}{172,8}$	$\frac{285,5}{162,4}$	$\frac{227}{118,7}$	$\frac{214,1}{110,1}$	$\frac{188,4}{90,4}$	
	2	-	$\frac{502,4}{315,1}$	$\frac{392,5}{241,1}$	$\frac{251,2}{148,9}$	$\frac{202,6}{115,2}$	$\frac{190,3}{108,3}$	$\frac{151,3}{79,1}$	$\frac{142,7}{73,4}$	$\frac{125,6}{60,3}$	
	1,0	-	$\frac{251,2}{157,6}$	$\frac{196,3}{120,6}$	$\frac{125,6}{74,5}$	$\frac{101,3}{57,6}$	$\frac{95,2}{54,1}$	$\frac{75,7}{39,6}$	$\frac{71,4}{36,7}$	$\frac{62,8}{30,1}$	
0,3 с; 3,3Гц	7	-	$\frac{1172}{1660}$	$\frac{915,8}{1268}$	$\frac{586,1}{789}$	$\frac{472,7}{607,7}$	$\frac{444}{567}$	$\frac{351,7}{416,5}$	$\frac{333}{387}$	$\frac{293}{318}$	1,42-1,08
	5	-	$\frac{837,3}{1185,7}$	$\frac{654,2}{905,7}$	$\frac{418,7}{563,6}$	$\frac{337,6}{434,1}$	$\frac{317,2}{405}$	$\frac{251,2}{297,5}$	$\frac{237,9}{276,4}$	$\frac{209,3}{227,1}$	
	3	-	$\frac{502,4}{711,4}$	$\frac{392,5}{543,4}$	$\frac{251,2}{338,1}$	$\frac{202,6}{260,4}$	$\frac{190,3}{243}$	$\frac{180,8}{178,5}$	$\frac{142,7}{165,9}$	$\frac{125,6}{136,3}$	
	2	-	$\frac{334,9}{474,3}$	$\frac{261,7}{362,3}$	$\frac{167,5}{225,4}$	$\frac{135,1}{173,6}$	$\frac{126,9}{162}$	$\frac{100,1}{119}$	$\frac{95,2}{110,6}$	$\frac{83,7}{90,9}$	
	1,0	-	$\frac{167,5}{237,1}$	$\frac{130,8}{181,1}$	$\frac{125,6}{112,7}$	$\frac{66,7}{86,8}$	$\frac{63,4}{81,0}$	$\frac{50,2}{59,5}$	$\frac{47,6}{55,3}$	$\frac{41,9}{45,4}$	
0,4 с 2,5 Гц	7	-	$\frac{879,2}{2211}$	$\frac{686,9}{1691}$	$\frac{439,6}{1051}$	$\frac{354,5}{810}$	$\frac{333}{753}$	$\frac{264,8}{556}$	$\frac{249,8}{518}$	$\frac{298}{423}$	2,51-1,92
	5	-	$\frac{628,0}{1579,3}$	$\frac{490,6}{1207,9}$	$\frac{314}{750,7}$	$\frac{253,2}{578,6}$	$\frac{237,9}{537,9}$	$\frac{209,1}{397,1}$	$\frac{178,4}{370}$	$\frac{157,0}{302,1}$	
	3	-	$\frac{376,8}{947,6}$	$\frac{294,4}{724,7}$	$\frac{188,4}{450,4}$	$\frac{151,9}{347,1}$	$\frac{142,7}{322,7}$	$\frac{113,5}{238,3}$	$\frac{107}{222}$	$\frac{94,2}{181,3}$	
	2	-	$\frac{251,2}{631,7}$	$\frac{196,3}{483,1}$	$\frac{125,6}{300,3}$	$\frac{101,3}{231,4}$	$\frac{95,2}{215,1}$	$\frac{75,7}{158,9}$	$\frac{71,4}{148}$	$\frac{62,8}{120,9}$	
	1,0	-	$\frac{125,6}{315,9}$	$\frac{98,1}{241,6}$	$\frac{62,8}{150,1}$	$\frac{50,6}{115,7}$	$\frac{47,6}{107,6}$	$\frac{37,8}{79,4}$	$\frac{35,7}{74}$	$\frac{31,4}{60,4}$	



*Примечание:* 1. В числителе расчётные параметры ускорения ( $a_{дон}^{zp}$ ), в знаменателе нормативные  $a_H$ ; 2. Поправочный коэффициент  $K_m^a$  представляет собой отношение расчётных значений к нормативным.

Отношение  $\frac{C}{B_{з\partial(m)}}$ , по сути, представляет собой величину поправочного коэффициента  $K_m^a$  к нормативным показателям допустимой массовой скорости  $u_0$ . Допустимые ускорения  $a_{дон}^{zp}$  подсчитывались по известному соотношению:

$$a_{дон}^{zp} = \frac{2\pi_{доп}^{zp}}{T}. \quad (4)$$

Из данных табл. 1 следует, что допускаемое ускорение для поверхностных объектов  $a_{дон}^{zp}$  изменяется в зависимости от периода собственных колебаний  $T_0$  при разных показателях  $m_r$ . Так при увеличении  $T_0$  в 2 раза (с 0,2 до 0,4 с) допускаемое ускорение может быть принято в 2 раза большим (при постоянном  $m_r$ ), а с изменением  $m_a$  с 0,125 до 0,5 должно быть уменьшено в 5,23 раза. В резонансной области ( $m_r \rightarrow 1$ ) по нормативным показателям  $a_H$  должно быть уменьшено в 8 раз, в то время как расчётная величина  $a_p^{zp}$  в этом случае уменьшается более чем в 40 раз, а их соотношение примерно в 5 раз. Таким образом, уровень реальных динамических воздействий сейсмоколебаний (D) с учётом амплитудно–частотной компоненты выраженной через поправочный коэффициент  $K_a^m (D = a_H \cdot K_a^m)$  может отличаться от принятых нормативов в сторону увеличения ( $D > 1$ ) до 2,5 раз, либо уменьшения ( $D < 1$ ) от 1,6 раза (при  $T_0 = 0,2$   $m_a = 0,125$  и  $T = 0,025$ ) до 8 раз в области резонансных колебаний.

В процессе формирования R – волны принимает участие как продольная волна, распространяющаяся вдоль свободной поверхности, так и вертикальная составляющая поперечной волны. На определенном эпицентральной расстоянии влияние последней становится превалирующим, о чём свидетельствует характер движения частиц в R – волне по эллипсообразной траектории с вертикально ориентированной большой осью. Одной из задач является нахождение начальной координаты движения R–волны, т.е. расстояние от эпицентра до пункта, где завершается ее формирование по основному признаку – соотношению большой оси эллипсообразной траектории к малой равному 1,4. Это эпицентральное расстояние зависит от глубины нахождения источника (H), свойств среды, распространения волн и их динамических характеристик  $V_p, V_s, V_R$ , и определяется следующим образом, считая, что формирование происходит на эпицентральной отрезке  $r_R - r_0$  (начало и завершение процесса). Расстояние до начала зарождения R – волны равно:

$$r_R = \frac{V_s H}{(V_p^2 - V_R^2)^{1/2}}. \quad (5)$$

Скорость поверхностной волны принимается равной  $(0,9-0,92)V_s$ , либо рассчитывается по формуле:

$$V_R = \frac{0,87+1,11\nu}{1+\nu} \sqrt{\frac{G}{\rho}}. \quad (6)$$

Скорости продольной и поперечной волны находятся по известным из теории упругости формулам в виде функций модуля упругости  $E$ , модуля сдвига  $G$ , плотности породы  $\rho$  и коэффициента Пуассона  $\nu$ .

Эпицентральное расстояние  $r_R^1$  для расчёта временных параметров волны  $R$  принимаем равным:

$$r_R^1 = r_R + \frac{R_3 - r_R}{2}. \quad (7)$$

Специалистами в разное время предложены многие эмпирические соотношения для нахождения периода колебаний  $T_R$  в виде функций  $T_R = f(Q_{\text{вв}}^{1/5})$ ,  $T_R = f(Q_{\text{вв}}^{1/3}, r_{\text{пр}}^{n_R})$ . Так, например, для оценки периода  $T_R$  предложено соотношение  $T_R = 0,06 Q_{\text{вв}}^{1/5}$ , несколько наиболее часто используемых эмпирических расчётных формул различных авторов для наиболее сейсмоопасных случаев движения волн по наносам, приведены в табл. 2. Анализируя соотношения, приведенные в табл. 2, и сопоставляя с другими литературными данными, видим различные методические подходы к оценке временных характеристик  $R$  – волн. В отдельных случаях (например, в формуле (1), табл. 2) в качестве этого показателя, по сути, принимается  $z$  – составляющая периода и не учитывается изменения периода с расстоянием, что следует из вышеприведенного функционального соотношения  $T_R = f(Q_{\text{вв}}^{1/5})$  – где, кроме того, и  $Q_{\text{вв}}$  принимается в степени  $1/5$ , а не  $1/6$ , как в формуле (1).

Таблица 2. Экспериментальные зависимости для определения периода колебаний в поверхностных волнах при взрывании сосредоточенных и линейных зарядов

№ п/п	Тип грунта	Характеристика источника	Формула для определения $T_R = f(Q_{\text{вв}}^{1/3}, r_{\text{пр}}^{n_R})$	Значение коэффициента пропорциональности
1	Лёссов, суглинки, глина [1]	Заряды сосредоточенные массой $10^2 - 10^3$ кг	$T_R = K_R \sqrt[6]{Q_{\text{вв}}} \cdot r_{\text{пр}}^{n_R}$	$K_R$ - глина 0,08, лёссов. Суглинок $n_R = 0,11 - 0,06$ ; для лёссов и глин
2	Лёссовидный суглинок [3]	Заряды сосредоточенные массой $20 - 10^4$ кг	$T_R = 0,06 Q_{\text{вв}}^{0,13} \cdot r_{\text{пр}}^{11}$	



Продолжение табл. 2

№ п/п	Тип грунта	Характеристика источника	Формула для определения $T_R = f(Q_{\text{вс}}^{1/3}, r_{\text{пр}}^{n_R})$	Значение коэффициента пропорциональности
3	Лессовидные суглинки	Заряды сосредоточенные, приведенная глубина заложения $H_{np} \geq 3,5$	$T_R^Z = 0,081 Q_{\text{вс}}^{1/6} \cdot r_{\text{пр}}^{0,1}$ $T_R^X = 0,056 Q_{\text{вс}}^{1/6} \cdot r_{\text{пр}}^{0,15}$	
4	Глина, суглинок	Вертикальный удлиненный заряд длиной $l$ , цилиндричностью $S=100$	$T_R^{Z,X} = K_T^R \cdot Q_{\text{ноз}}^{1/6} (0,015l_3 + 1) r_{\text{пр}}^{n_R}$ $r_{\text{пр}} = \frac{r}{\sqrt[3]{Q_{\text{ппо}} \cdot l}}$	для $T_R^Z$ $K_T^R = 0,95$ , $n_R = 0,10$ для $T_R^X$ $K_T^R = 0,065$ , $n_R = 0,15$
5	Глины	Для периода колебаний в объемной волне на границе очага	$T_P = 0,04 Q_{\text{вс}}^{1/6}$	

В формуле (2) табл. 2 при одинаковом значении коэффициента пропорциональности (0,06) и показателя  $n_R=0,11 Q_{\text{вс}}$  принимается в степени 0,13, а не 0,2.

Следует учитывать определенную условность расчётов. Нельзя считать удовлетворительным также суждение о неизменности профиля R – волны с расстоянием, который рассматривается в виде эллипса с соотношением осей 1,4.

Однако можно предположить, что, как форма эллипса, так и его положение, начиная с координаты  $r_R$  (начало формирования) будут непрерывно изменяться, достигая отмеченной конфигурации лишь по завершению формирования. Затем процесс трансформации профиля будет изменяться в обратном порядке, по мере увеличения аргумента  $r_{\text{пр}}^{n_R}$ . При сопоставлении формул (1) и (5) видно, что период колебаний продольной волны в глинах в 2 раза меньше  $T_R$ , что согласуется с имеющимися экспериментальными данными о  $2^x-3^x$  – кратном увеличении  $T_R$  по сравнению с периодом колебаний в P – волне. Такие сравнения целесообразно выполнять в расчётном пункте на расстоянии  $r'_R$ , который нами условно обозначается как  $r_{\text{пр}}=1$ . По мере удаления от этого пункта период  $T_R$  возрастает и сопоставление его с показателем для объемных волн на свободной границе становится некорректным. Анализ формул (1) и (3) показывает, помимо фактического, равенства периода  $T_R$  по формуле (1) с  $z$  – составляющей  $T_R^Z$  по формуле 3 (разница всего порядка 1%) на то, что соотношение  $T_R^Z : T_R^X$  в пункте  $r_{\text{пр}}=1$ ,

составляет 1,45 и косвенно подтверждает порядок соотношения осей в эллипсообразной конфигурации траектории при  $r_{np} = 1$ .

**Оценка частотно-временных характеристик поверхностных волн при взрывании в различных породах.**

На рис. 1 приведены графики зависимости периода колебаний в R – волне при взрывании в лёссах сосредоточенных зарядов весом от 20 до 10000 кг в функции эпицентрального расстояния. Полученные данные по результатам расчётов с использованием формул (1)–(3), табл. 2, в том числе и их геометрическая сумма, рассчитывались как координатные составляющие по x и z направлениям. Анализ данных позволяет сделать ряд выводов относительно оценки частотно – временных характеристик R – волн разными авторами из числа наиболее часто цитируемых. Можно считать достаточно обоснованным принятие периода в R – волне как функции массы заряда в степени  $1/6$ . Из сопоставления значений  $T_R$  по формуле (1) в глинах с показателями z – составляющей  $T_R^z$  согласно формуле (3) видим их совпадение по всему исследуемому диапазону весов заряда и приведенных расстояний. Аналогичное равенство наблюдается при сопоставлении данных  $T_R$  по формуле (1) для суглинков с подсчётами по x – составляющей третьей формулы. Таким образом, рассмотрев три функциональные зависимости  $T_R(Q_{66}^{0,13}; Q_{66}^{0,1667}; Q_{66}^{0,2})$  нельзя считать ни одну из формул достаточно информативной по разным причинам: формула (1) из-за неопределенности реального направления по отношению к поверхности и защищаемого объекта; в формуле 2 функциональная зависимость принята в виде, отличающемся от  $Q_{66}^{1/6}$ , а в последнем случае ( $T_R = f(Q_{66}^{0,2})$ ) не учитывается фактор влияния приведенного расстояния  $r_{np}^{nR}$ .

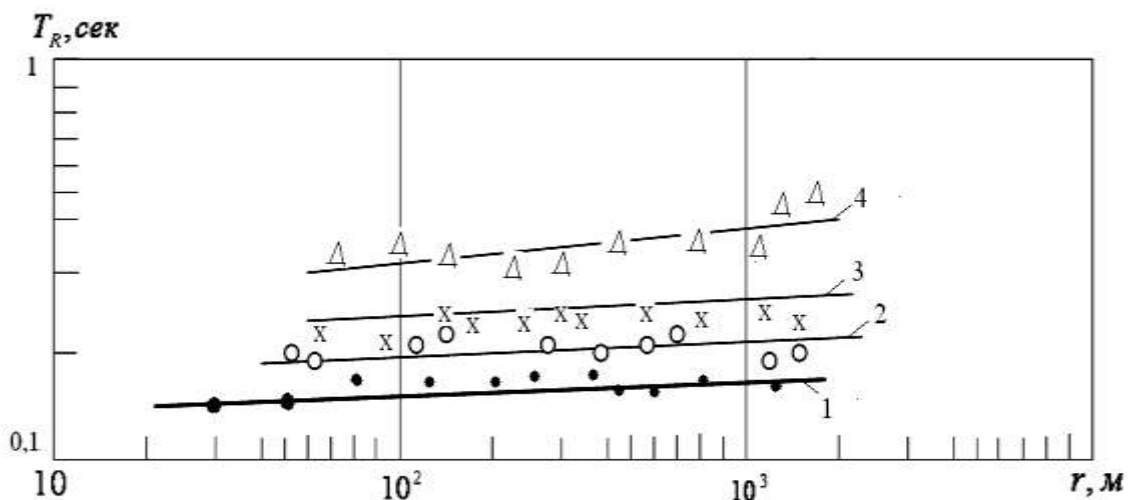


Рис. 1. Графики зависимости  $T_R = f(r)$  для волны R при взрывах в лёссах зарядов различной мощности:

1 –  $a = 20$  кг; 2 –  $a = 160$  кг; 3 –  $a = 1$  т; 4 –  $a = 10$  т

Суммарное значение  $T_R^c$  по сравнению с подсчитанным по формуле (1) для глин независимо от веса заряда на расстоянии  $r_{np}=1$  больше в 1,23 раза, а при  $r_{np}=200$  в 2,32 раза. По сравнению с данными для продольной волны  $T_R^c$  больше в 2,46 раза на приведенном расстоянии  $r_{np}=1$ , и в 4,64 раза при  $r_{np}=200$  и любом весе заряда. Таким образом, на любом эпицентрально приведенном расстоянии поверхностная волна значительно более сейсмоопасная, чем объемная, которая на любых гипоцентральных расстояниях в различных пунктах, на поверхности не может превышать величины периода колебаний в пункте при  $r_{np}=1$ .

### Выводы

В результате проведенных исследований было установлено, что:

1. Частотно – временные параметры поверхностных волн существенно влияют на критические нормативные показатели сейсмобезопасности, которые в зависимости от величины коэффициента  $m$  (отношение периода колебаний в R–волне к периоду собственных колебаний защищаемого объекта) должны корректироваться в сторону увеличения или уменьшения (табл. 1).

2. Для более достоверной оценки временных параметров поверхностной волны у защищаемого объекта следует использовать суммарный показатель  $T_R^c$ , который более чем на 20% превышает этот показатель, полученный с использованием формулы (1) табл. 2.

3. Суммарный показатель периода колебаний в R–волне возрастает в диапазоне значений приведенных расстояний 1 – 200 в 1,88 раза при любом исследованном весе заряда.

4. На приведенном расстоянии  $r_{np}=200$  суммарный период  $T_R^c$  в 4,64 раза больше значений, полученных с использованием формулы (1) табл. 2.

5. Соотношение  $z$  и  $x$  составляющих изменяется с 1,45 при  $r_{np}=1$  до 1,11 при  $r_{np}=200$ , т.е. в 1,3 раза. Это косвенно подтверждает факт непостоянства профиля R–волны вдоль свободной поверхности в направлении уменьшения соотношения осей эллипсообразной траектории движения частиц.

### Список использованных источников

1. Вовк О. А. Временные характеристики сейсмически волн при взрывах одиночных и групповых зарядов различной конструкции / О. А. Вовк // Прикладная гидромеханика. – 2004. – Т. 6 (78), № 3. – С. 9–21.

2. Вовк О. О. Вплив підземних гірничих робіт на стан довкілля / О. О. Вовк, В. М. Ісаєнко, В. Г. Кравець, О. О. Вовк. – К.: Вид-во НПУ ім. М.П. Драгоманова. – 2011. – 543 с.

3. Рулев Б. Г., Харин Д. А. О направлении сейсмическом действии рассредоточенных однородных зарядов // В сб. Взрывное дело, 64/21

«Сейсмика и воронки выброса при подземных взрывах» М.: Недра, 1968. – с. 211 – 231.

4. Рулев Б. Г. Динамические характеристики сейсмических волн при подземных взрывах // В сб. взрывное дело № 64/21 «Сейсмика и воронки выброса при подземных взрывах». – М.: Недра. – 1968. – с. 109-158.

5. Родионов В. Н. Механический эффект подземного взрыва / Родионов В.Н., Адушкин В.В., Костюченко В.Н., Николаевский В.Н., Ромашов А.Н., Цветков В.М. - М.: Недра, 1971. – 224 с.

6. Жукова Н. И. Обоснование сейсмотехнических параметров взрыва в скальных породах с покрывающими грунтами / Жукова Н.И., Воробьев В.Д., Крючков А.И. // Вісник Національного технічного університету України «Київський Політехнічний інститут». Серія «Гірництво». – Зб. наукових праць. – Київ: НТУУ «КПІ»: ЗАТ «Техновібух», 2011. – Випуск 20. – с. 32 – 44.

7. Бойко В. В. Оценка сейсмотехнической безопасности сооружений при воздействии на них взрывных волн с учётом их спектральных характеристик / Бойко В.В., Кузьменко А.А., Хлевнюк Т.В. // Вісник Національного технічного університету України «Київський Політехнічний інститут». Серія «Гірництво»: Сборник научных трудов. – К.: НТУУ «КПИ». – 2007. – Випуск 15. – с. 36 – 41.

8. Chudek M. O propagacji energii sejsmicznej przy procesach dynamicznych / M.Chudek, A. Kuzmenko, O.Vovk // Zeszyty naukowe politechniki Śląskie: Sbornik naukovych prac. –Seria: Gornictwo. – z.258.– 2004. – S.59-69

9. Вовк О. А. Частотно–временные характеристики поверхностных сейсмических волн / О.А. Вовк, А.А. Бузыло, В.В. Вапничная // Известия Тульского ГУ «Науки о земле».–2011. –Вып.1. – С.234-239

10. Ремез Н. С. Вопросы прогнозирования и снижения опасности возникновения и развития динамических процессов в угольной промышленности / Н.С. Ремез, О.А. Вовк, В.В. Вапничная // БНТУ: Сб.научных трудов. – 2013. – Т.1. – С. 132-140.

11. Ремез Н. С. Частотно–временные параметры сейсмических волн в слоистых средах / Н.С. Ремез, О.А. Вовк, В.В. Вапничная // Горный информационно–аналитический бюллетень: Освоение подземного пространства мегаполисов. –2013. – Вып. №7. –С. 152–166.

12. Лямзина Г. А. Влияние грунтов на интенсивность сейсмических колебаний / Г.А. Лямзина, Т.Г. Иванов // Вопросы инженерной экологии. – 1993. – Вып. 15. – С. 80–89.

13. Садовский М. А. О размере зоны необратимого деформирования при взрыве в блочной среде / М.А. Садовский, В.В. Адушкин, А.А. Спивак // – В сб. Механическое действие взрыва. – 1994. – Вып. 4. – С. 323 – 329.

*Статья поступила в редакцию 18.11.2014 г.*