

УДК 550.344.52

**МОДИФИЦИРОВАННАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ПИКОВОЙ СКОРОСТИ КОЛЕБАНИЙ
В СЕЙСМИЧЕСКОЙ ВОЛНЕ ОТ РАССТОЯНИЯ ДО ВЗРЫВА**

А. Тосун

*Университет Девятого сентября, Бергамское профессиональное училище,
E-mail: abdurrahman.tosun@deu.edu.tr, Бука-Бергама-Измир, Турция*

Для оценки пиковой скорости колебаний в сейсмической волне при взрыве широко используется зависимость, предложенная Дювалем и Фогельсоном. Однако она не обеспечивает высокую точность оценки. В ходе проведения тестовых взрывов на четырех различных месторождениях измерены значения пиковой скорости колебаний в сейсмических волнах. Для каждого взрыва рассчитаны пиковые значения колебаний согласно зависимости Дювала и Фогельсона. Предложено новое соотношение, позволяющее определить пиковые значения с большей точностью, чем по указанной зависимости.

Взрывные работы, экологическая геофизика, сейсмографы, сейсмические колебания

DOI: 10.15372/FTPRPI20200307

Взрывные работы приводят к нежелательным экологическим последствиям. Наиболее опасными являются поверхностные колебания, которые вызывают разрушения строений вследствие высоких энергетических уровней сейсмического воздействия. Интенсивность колебаний измеряется путем регистрации таких параметров, как смещение поверхности, скорость и ускорение колебаний, частота волны. Факторы, влияющие на эти характеристики, делятся на контролируемые и неконтролируемые.

Неконтролируемые факторы (геологические и механические характеристики массива пород) оказывают значительное влияние на поверхностные колебания. В однородных массивах твердых пород волны колебаний распространяются равномерно в каждом направлении, в то время как в регионах со сложной геологической структурой и большими тектоническими напряжениями по разным направлениям они имеют различные значения. В массиве твердых пород сейсмические волны распространяются быстрее. Твердые породы обладают упругими характеристиками, чем объясняется высокая частота распространяющихся в них колебаний, а также то, что при увеличении расстояния интенсивность их снижается медленно. В условиях пористой структуры горного массива волны распространяются медленно и быстро затухают. С точки зрения контроля колебаний его проще проводить в твердых породах, так как в пористых породах имеются препятствия, которые вынуждают затухать колебания с разной скоростью [1].

Контролируемые факторы можно оценить тремя параметрами: максимальное количество ВВ, взрываемое в интервале задержки, расстояние от точки взрыва до точки измерения пиковой скорости колебаний частиц (ПСЧ), время задержки. Наиболее важный параметр — макси-

мальное количество ВВ, используемое в интервале задержки. Его необходимо учитывать для оценки колебаний, сгенерированных в реальных условиях. Вторым по важности параметром является расстояние от точки взрыва до точки измерения ПСЧ, который напрямую влияет на чувствительность измерений колебаний, вызванных взрывом. С увеличением расстояния от точки взрыва волны поверхностных колебаний затухают. При этом массив пород выступает в качестве фильтра для высокочастотных волн; энергетическая составляющая низкочастотных волн повышается при увеличении расстояния от точки взрыва. Третий параметр, влияющий на колебания, — время задержки, которое является временем между последовательной детонацией взрывных скважин. Система задержки позволяет избежать одновременную детонацию всех взрывных скважин. Количество ВВ и расстояние от точки взрыва до точки измерения оказывают определяющее влияние на пиковые скорости частиц. Корректная оценка ПСЧ перед взрывом чрезвычайно важна, так как обеспечивает приемлемые результаты взрывных работ по дроблению породы при минимальном воздействии на окружающую среду.

Предложено большое количество зависимостей, позволяющих выполнить корректную оценку ПСЧ [2–8]. Наиболее широко используется зависимость, разработанная Дювалем и Фогельсоном. В ней значение пиковой скорости находится через масштабное расстояние, которое рассчитывается на основе максимального количества ВВ, детонирующего одновременно, и расстояния от точки взрыва до точки измерения ПСЧ. При этом устанавливается соотношение между ПСЧ, полученными путем измерения, и масштабными расстояниями.

Масштабное расстояние вычисляется по формуле

$$SD = \frac{R}{\sqrt{Q}}, \quad (1)$$

где R — расстояние от точки взрыва до точки измерения ПСЧ, м; Q — максимальное количество ВВ, детонирующего одновременно, кг.

Соотношение между масштабными расстояниями и пиковыми скоростями частиц имеет следующий вид [4]:

$$V = K \left(\frac{R}{\sqrt{Q}} \right)^{-\beta}, \quad (2)$$

здесь V — пиковая скорость частиц при колебаниях, мм/с; K — коэффициент волнового поля; β — коэффициент затухания поля.

Коэффициенты K и β характеризуют неконтролируемые параметры взрывных работ и могут различаться в зависимости от условий на площадке взрыва. Таким параметрам посвящен ряд работ [9, 10]. В [11–13] представлены результаты исследования, направленные на оценку масштабного расстояния. Однако в них не рассмотрена в достаточном объеме значимость расстояния R , необходимая для оценки масштабного расстояния.

В [14] показано, что расстояние R существенно влияет на пиковую скорость частиц [17]. Данное расстояние включает в себя две составляющие: расстояния v и h (рис. 1), где v — вертикальная компонента вектора R , h — горизонтальная. Расстояния v и h определяются так:

$$v = y_1 - y_2 \quad (3)$$

$$h = x_1 - x_2, \quad (4)$$

x_1, y_1 — координаты точки взрыва, x_2, y_2 — координата точки измерения ПСЧ.

В процессе взрывных работ расстояния v и h могут значительно варьировать. Часто расстояние v принимает малые значения, а расстояние h — большие, хотя в процессе взрывных работ может произойти обратная ситуация. Соотношение расстояний h/v влияет на значения ПСЧ. Например, если соотношение расстояний $h/v < 1$, то горизонтальное расстояние распространения энергии взрыва до точки измерения меньше, чем вертикальное. В этом случае вертикальное расстояние является более значимым. В обратном случае горизонтальное расстояние будет более значимым для определения ПСЧ. Таким образом, расстояние R , предлагаемое для определения ПСЧ, не отражает влияния расстояний v и h [12].

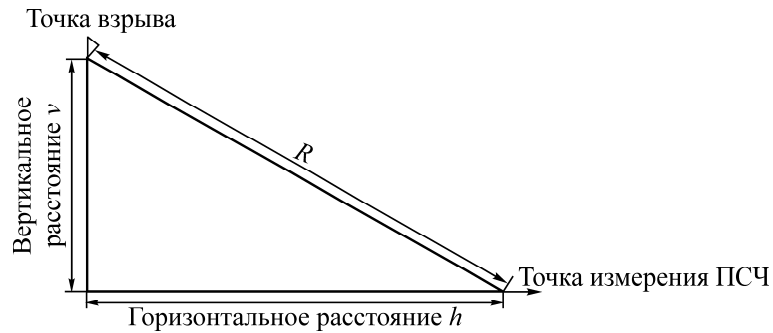


Рис. 1. Расстояния между точкой взрыва и точкой измерения ПСЧ [14]

В настоящей работе проведены взрывные испытания на четырех известняковых карьерах Турции (Орханели, Кан, Борнова 1 и Борнова 2), которые имеют разные характеристики массива пород. В ходе испытаний измерена пиковая скорость частиц с помощью сейсмометров, определены расстояния R , v и h и максимальное количество ВВ, детонирующего одновременно. Рассчитаны масштабные расстояния по формуле (1) и выполнен анализ корреляций между значениями ПСЧ и масштабными расстояниями для каждого карьера отдельно. Кроме того, определены отношения расстояний h/v для каждого испытания. Эти отношения разделены на группы по следующим значениям: 0–0.70; 0.70–2.25; 2.25–3.00; 3.0–7.0; свыше 7.0. Предложено новое выражение для расчета масштабного расстояния, основанное на этих группах. Для каждого испытания определены масштабные расстояния по новому выражению, после чего снова проведен анализ корреляций между значениями ПСЧ и масштабным расстоянием для каждого карьера отдельно. Результаты анализа показали, что предлагаемое выражение для расчета масштабных расстояний более корректно по сравнению с уравнением, разработанным Дювалем и Фогельсоном.

ПОЛЕВЫЕ ИСПЫТАНИЯ

Взрывные испытания с целью измерения пиковой скорости частиц проведены на четырех карьерах [15]. В каждом карьере измерения ПСЧ выполнены в одном направлении. Во втором карьере использовано пять сейсмометров, в остальных — по три сейсмометра. Всего осуществлено 16 взрывных испытаний: 6 — на первом карьере, 1 — на втором, 4 — на третьем и 5 — на четвертом (табл. 1).

На территории полевых испытаний с помощью GPS-устройства с высокой точностью определены координаты точек взрывов и точек измерения ПСЧ. Затем рассчитаны расстояния от точек взрыва до точек измерения ПСЧ по формуле

$$R = [(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2]^{0.5}. \quad (5)$$

ТАБЛИЦА 1. Информация о проведении полевых испытаний на карьерах Турции

Номер карьера	Расположение карьера	Количество проведенных взрывов	Количество измеренных ПСЧ
1	Орханели	6	18
2	Кан	1	5
3	Борнова 1	4	12
4	Борнова 2	5	14

Полученные расстояния R представлены в табл. 2, 3. В ходе каждого испытания с высокой точностью фиксировалось максимальное количество ВВ, детонирующего одновременно. Во всех испытаниях в качестве запала использовался динамит на основе нитроглицерина, а в качестве ВВ, обеспечивающего требуемое разрушение, применялся АСДТ. Для каждого испытания рассчитаны масштабные расстояния по зависимости Дюваля – Фогельсона (1).

ОЦЕНКА ПИКОВОЙ СКОРОСТИ ЧАСТИЦ

Для каждого испытания определено значение отношения расстояний h/v . Пиковую скорость частиц в общем виде можно выразить следующим образом: $V = K(R/\sqrt{Q})^{-\beta}$. Для уточнения результата введен коэффициент k , тогда выражение для пиковой скорости приобретает вид

$$V = K \left(k \frac{R}{\sqrt{Q}} \right)^{-\beta} \tag{6}$$

Значения коэффициентов K , k и β определялись по данным экспериментов. Затем с помощью компьютерной программы вычислялись значения коэффициентов, которые дают значения ПСЧ, близкие к полученным на первом карьере. Определение коэффициентов проводилось в программе Forcse 2.0, ключевой особенностью которой является то, что соотношение расстояний h/v связано с коэффициентом k .

Новое соотношение для расчета масштабных расстояний предполагает ограничения, относящиеся к параметрам (табл. 2). Коэффициенты k в этом соотношении вычислены по результатам испытаний на первом карьере и оказались равными 0.9; 0.7; 1.3; 0.4 и 1.6. В зависимости от значения h/v выбирается коэффициент k . Такие же коэффициенты k , соответствующие значениям h/v , применялись для других карьеров при обработке данных экспериментальных взрывов.

ТАБЛИЦА 2. Интервалы изменения параметра h/v и предлагаемые соотношения для расчета масштабного расстояния

Ограничения h/v	$0 < h/v < 0.7$	$0.7 < h/v < 2.25$	$2.25 < h/v < 3.00$	$3.00 < h/v < 7.00$	$h/v > 7.00$
Предлагаемые соотношения расчета масштабного расстояния $k(R/\sqrt{Q})$	$0.9 \frac{R}{\sqrt{Q}}$	$0.7 \frac{R}{\sqrt{Q}}$	$1.3 \frac{R}{\sqrt{Q}}$	$0.4 \frac{R}{\sqrt{Q}}$	$1.6 \frac{R}{\sqrt{Q}}$

Максимальные количества ВВ, детонирующего одновременно в интервале задержки, и масштабные расстояния представлены в табл. 3. Там же приведены значения ПСЧ. Из-за полевых условий не была измерена ПСЧ первым сейсмометром на четвертом испытании в четвертом карьере.

По полученным данным выполнен анализ корреляций между рассчитанными значениями масштабного расстояния обоими методами и значениями ПСЧ (рис. 2). На первом карьере при использовании предлагаемого соотношения коэффициент детерминации R^2 увеличился с 0.7861 до 0.8729 по сравнению с формулой (1), на втором карьере — с 0.6648 до 0.932, на третьем — с 0.7705 до 0.8532. На четвертом карьере коэффициент детерминации увеличился с 0.8090 до 0.9272.

ТАБЛИЦА 3. Масштабные расстояния, определенные для рассматриваемых карьеров

Номер взрыва	Номер геофона	Максимальное количество ВВ, детонирующее одновременно, кг	Расстояние между точкой взрыва и точкой размещения геофона, м	Масштабное расстояние (формула (1)), м	ПСЧ, мм/с	Масштабное расстояние (предлагаемое уравнение), м	h , м	v , м	h / v
Первого									
1	1	60	164.20	21.20	5.372	14.84	111	121	0.917
	2		383.11	49.46	0.684	79.13	383	9	42.556
	3		212.72	27.46	4.801	10.98	207	49	4.224
2	1	60	179.64	23.19	4.879	16.23	115	138	0.833
	2		379.08	48.94	1.426	78.30	379	8	47.375
	3		213.41	27.55	4.212	11.02	211	32	6.594
3	1	67	407.87	49.83	1.909	34.88	366	180	2.033
	2		233.41	28.52	3.268	19.96	161	169	0.953
	3		247.25	30.21	2.236	39.27	227	98	2.316
4	1	67	453.81	55.44	1.497	72.07	429	148	2.899
	2		262.57	32.08	2.386	22.45	224	137	1.635
	3		317.80	38.83	2.286	27.18	290	130	2.231
5	1	65	315.16	39.09	2.868	27.36	288	128	2.250
	2		143.45	17.79	4.985	12.45	83	117	0.709
	3		211.43	26.22	3.957	18.36	149	150	0.993
6	1	65	344.82	42.77	1.596	55.60	324	118	2.746
	2		160.03	19.85	5.611	13.89	119	107	1.112
	3		244.59	30.34	3.612	21.24	185	160	1.156
Второго									
1	1	187.5	758.64	55.40	1.459	49.86	401	644	0.623
	2		664.49	48.53	3.515	33.97	390	538	0.725
	3		511.89	37.38	4.992	33.65	95	503	0.189
	4		648.36	47.35	2.083	42.61	42	647	0.065
	5		652.49	47.65	3.795	33.36	510	407	1.253
Третьего									
1	1	50	657.74	93.02	0.684	120.92	612	241	2.539
	2		658.35	93.10	0.952	65.17	470	461	1.020
	3		858.51	121.41	0.775	84.99	695	504	1.379
2	1	50	526.91	74.52	1.226	52.16	456	264	1.727
	2		576.93	81.59	0.975	73.43	314	484	0.649
	3		753.82	106.61	0.98	74.62	539	527	1.023
3	1	55	558.36	75.29	0.898	67.76	20	558	0.036
	2		763.13	102.90	0.712	92.61	198	737	0.269
	3		198.29	26.74	2.352	10.69	194	41	4.732
4	1	55	640.41	86.35	0.942	77.72	66	637	0.104
	2		823.65	111.06	0.445	99.95	112	816	0.137
	3		161.44	21.77	1.985	15.24	108	120	0.900
Четвертого									
1	1	55	257.39	34.71	0.917	45.12	238	98	2.429
	2		576.17	77.69	0.359	101.00	530	226	2.345
	3		1045.71	141.00	0.234	98.70	955	426	2.242
2	1	55	213.59	28.80	1.718	25.92	105	186	0.565
	2		506.17	68.25	1.122	47.78	397	314	1.264
	3		969.47	130.72	0.315	91.51	822	514	1.599
3	1	55	303.03	40.86	1.547	36.77	35	301	0.116
	2		500.09	67.43	0.923	60.69	257	429	0.599
	3		927.77	125.10	0.342	87.57	682	629	1.084
4	1	60	105.38	13.60	—	9.52	73	76	0.961
	2		418.14	53.98	1.555	37.79	365	204	1.789
	3		887.31	114.55	0.399	80.19	790	404	1.955
5	1	60	196.00	25.30	2.052	22.77	1	196	0.005
	2		436.84	56.40	1.366	39.48	293	324	0.904
	3		888.88	114.75	0.41	80.33	718	524	1.370

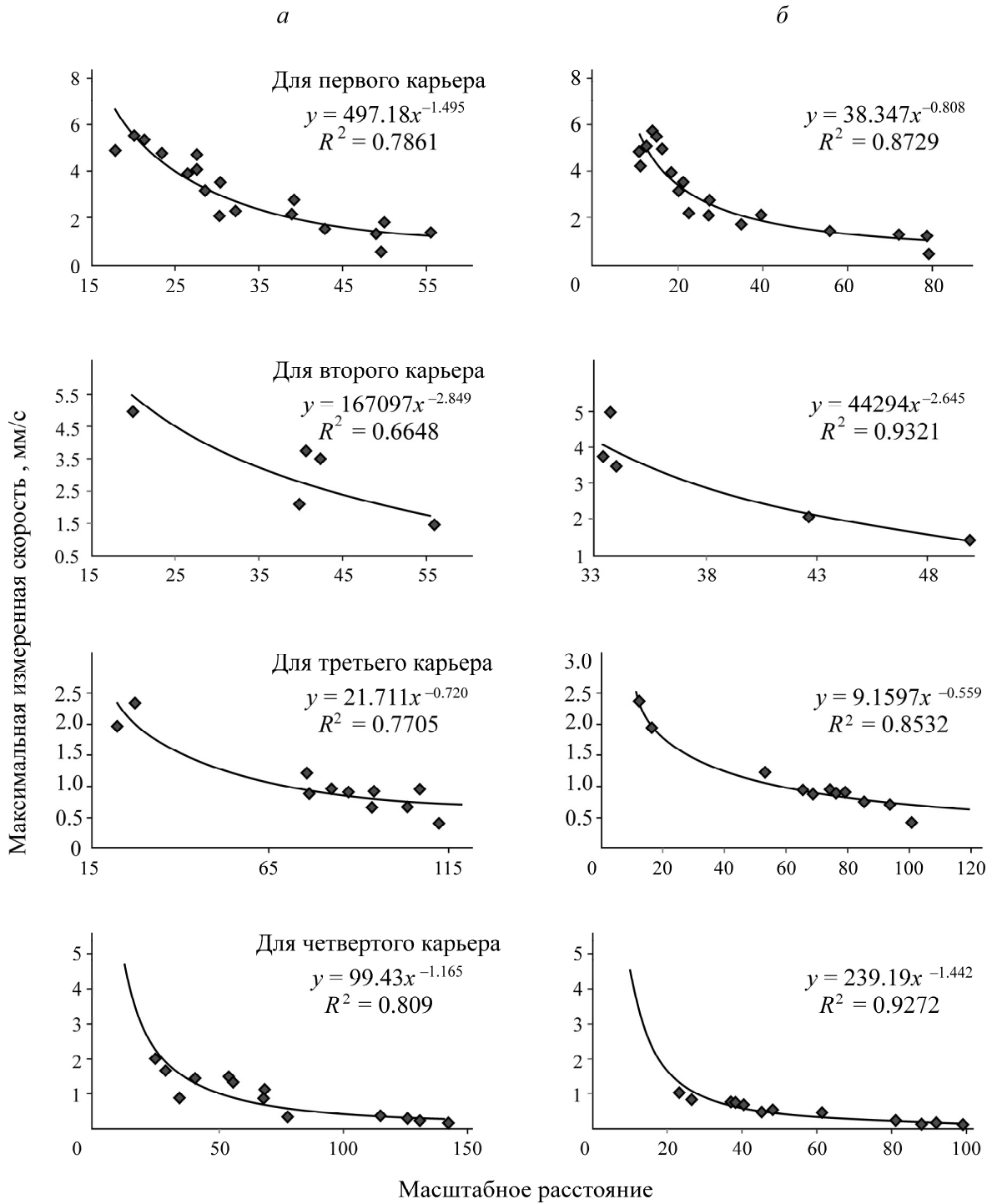


Рис. 2. Зависимость между измеренной ПСЧ и масштабным расстоянием, рассчитанным для карьера: а — по формуле (1); б — согласно табл. 2

Видно, что с помощью соотношения (6) выполнена оценка пиковой скорости частиц с более высокой точностью. Следовательно, используя данное соотношение, можно эффективно контролировать параметры ВВ и масштабные расстояния для более качественного проектирования взрывных работ с наименьшим воздействием на окружающую среду. Отметим, что границы интервалов изменения параметра h/v необходимо определять с большей точностью путем проведения взрывных испытаний в разных местах карьера.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Рассмотрена взаимосвязь между значениями ПСЧ, вызванными взрывными работами, и масштабным расстоянием путем проведения взрывных испытаний на четырех карьерах с различными характеристиками породного массива. Используемая для расчета величина R имеет две составляющие: вертикальное расстояние v и горизонтальное h , которые необходимы при расчете масштабного расстояния. При этом важным параметром является отношение h/v . Такие отношения определены по данным полевых испытаний для каждого участка исследований. Полученные отношения разделены на группы со следующими граничными значениями: 0–0.7; 0.7–2.25; 2.25–3.0; 3.0–7.0; свыше 7.0, и для выделенных интервалов значений h/v рассчитаны фиксированные коэффициенты k . Предлагаемая зависимость, разработанная с использованием фиксированных коэффициентов, повысила корреляцию между ПСЧ и масштабным расстоянием (рис. 2).

ВЫВОДЫ

На основании проведенных испытаний на четырех карьерах с различными характеристиками массива выявлено, что предлагаемое соотношение, учитывающее вертикальную и горизонтальную составляющие, обеспечивает большую корреляцию между пиковой скоростью частиц и масштабным расстоянием по сравнению с формулой, разработанной Дювалем и Фогельсоном.

Автор выражает благодарность руководству Отдела научно-исследовательских проектов Университета Девятого сентября за финансовую поддержку данного исследования, а также признателен профессору Гузин Гулсев Юар Алдасу за предоставление исходных данных для первого и второго карьеров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ak H. Patlatma Kaynaklı Yer Sarsıntılarının Yönel Değişiminin Araştırılması, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Eskişehir, 2006, 261 sayfa.
2. Ambraseys N. R. and Hendron A. J. Dynamic behavior of rock masses, Rock Mech., In: Stagg and Zeinkiewicz (eds.), Eng. Practice, John Wiley and Sons Inc., London, 1968. — P. 203–227.
3. Dowding C. H. Blast vibration monitoring and control, Prentice-Hall, 1985. — 297 p.
4. Duvall W. I. and Fogelson, Review of criteria for estimating damage to residences from blasting vibrations, U.S. Bureau of Mines, 1962, RI 5868.
5. Ghosh A. K. and Samaddar A. B. Design of surface mine blast, Min. Eng. J. Inst. Eng., 1984, (I). — P. 52–57.
6. Langefors and Khilström. The modern technique of blasting, 3rd Ed, Halsted Press, 1978, Sweeden.
7. Roy P. Prediction and control of ground vibrations due to blasting, Colliery Guardian, 1991, 239(7). — P. 210–215.
8. Singh T. N., Amit P., Saurabh P., and Singh P. K. Prediction of explosive charge for efficient mining operation, Rock Eng. Problems and approaches in Underground Construction, 2002, South Korea. — P. 777–785.
9. Ak H. and Konuk A. The effect of discontinuity frequency on ground vibrations produced from bench blasting a case study, Soil Dynamics and Earthquake Eng., 2008, No. 28. — P. 686–694.
10. Kuzu C., Fisne A., and Ercelebi S. G. Operational and geological parameters in the assessing blast induced airblast-overpressure in quarries, Appl. Acoustics, 2009, No. 70. — P. 404–411.

11. **Hajihassani M., Armaghani D. J., Marto A., and Mohamad E. T.** Ground vibration prediction in quarry blasting through an artificial neural network optimized by imperialist competitive algorithm, *Bul. of Eng. Geol. and Env.*, 2014, Sept., 4 online first articles.
12. **Singh T. N. and Singh V.** An intelligent approach to prediction and control ground vibration in mines, *Geotech. and Geol. Eng.*, 2005, No.23. — P. 249–262.
13. **Toraño J., Rodrguez R., Diego I., Rivas, J. M., Casal M'a., D.** FEM models including randomness and its application to the blasting vibrations prediction, *Computers and Geotechnics*, 2006, No. 33. — P. 15–28.
14. **Tosun A.** Effect of the horizontal and vertical components belongs to distance between the blasting point and the measurement point on peak particle velocity, *Bul. of the Earth Sci. Appl. and Res. Centre of Hacettepe University*, 2016, 37 (1). — P. 19–26.
15. **Uyar G. G., zelik Y., and Snmez H.** TK-EL an linyit aık ocađı Őevlerindeki duraylilik mekanizmalarinin belirlenmesi ve Őev tasarımlarina ynelik ar-ge daniŐmanlik projesi, İkinci AŐama Aralık 2015 Raporu.

Поступила в редакцию 06/II 2020

После доработки 15/IV 2020

Принята к публикации 29/XII 2020