

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТНОЙ СЕТКИ ВЗОРВАННОГО БЛОКА МАССИВА ПОРОД

Б.Р. Ракишев¹, З.Б. Ракишева², А.А. Орынбай¹

¹ Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева (Satbayev University), Алматы, Казахстан, e-mail: b.rakishev@mail.ru

² Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан

Аннотация: Даны определения понятий «координатная сетка взрываемого блока», «координатная сетка взорванного блока уступа». Описан автоматизированный метод определения узловых точек координатной сетки взорванного блока. Он базируется на учете зависимостей, связывающих начальные параметры взрываемого блока массива пород, такие, как его высота и сетка скважин с конечным расположением зафиксированных точек взорванного блока массива пород. Определяющими факторами координатной сетки взорванного блока массива пород являются характерные высота и ширина развала, которые зависят от физико-механических свойств взрываемых пород, физико-химических характеристик применяемого ВВ и параметров расположения зарядов в массиве пород. Значительное влияние на положение узловых точек координатной сетки взорванного блока оказывает коэффициент разрыхления пород по горизонтальным и наклонным слоям. Выявлена тенденция увеличения этого показателя от тыловой части развала к его периферии как в горизонтальном направлении, так и по вертикали. На основе совместного учета всех факторов, влияющих на формирование развала пород, впервые разработан аналитический метод определения узловых точек и самой координатной сетки взорванного блока. Создана компьютерная программа автоматизированного определения координатной сетки взорванного блока, учитывающая влияние физико-механических свойств взрываемых пород, физико-химических характеристик применяемого ВВ и параметров расположения зарядов в массиве пород на координаты узловых точек искомой сетки. С помощью этой программы оперативно и достаточно точно могут быть найдены положения узловых точек координатной сетки взорванного блока при различных параметрах и условиях взрывания массивов пород. Установленная таким образом координатная сетка взорванных блоков служит инструментом для определения местоположения различных элементов массива пород в развале взорванных пород.

Ключевые слова: координатная сетка взорванного блока, узловые точки, высота и ширина развала пород, горизонтальные и наклонные слои пород, коэффициент разрыхления пород, автоматизированное определение координатной сетки.

Благодарность: Работа выполнена в рамках целевой программы 2018/BR05235618 «Модернизация технологий и производств в горнодобывающей и горноперерабатывающей отраслях Республики Казахстан» при финансовой поддержке Министерства науки и образовании РК в 2018–2020 гг.

Для цитирования: Ракишев Б.Р., Ракишева З.Б., Орынбай А.А. Автоматизированное определение координатной сетки взорванного блока массива пород // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 8. – С. 40–51. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-8-0-40-51.

Computer-aided creation of coordinate grid for blasted rock block

B.R. Rakishev¹, Z.B. Rakisheva², A.A. Orynbay¹

¹ K.I. Satpayev Kazakh National Research Technical University (Satbayev University),
Almaty, Kazakhstan, e-mail: b.rakishev@mail.ru

² Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

Abstract: The notions of ‘coordinate grid of blast block’ and ‘coordinate grid of blasted block’ are defined. The computer-aided determination of the coordinate grid points for a blasted rock block is described. The starting point is using relationships of the initial parameters of a blast rock block such as height and the final pattern of the determined points in the blasted rock block. The governing factors of a blasted block coordinate grid are the broken-rock disintegration height and width dependent on physical and mechanical properties of rocks, physicochemical characteristics of explosives and on blasting pattern design. Considerable influence on arrangement of the blasted block coordinate grid points is exerted by the degree of fragmentation of rocks in horizontal and inclined layers. It is found that the degree of fragmentation tends to increase from the rear to the periphery of the broken rock pile, both horizontally and vertically. Based on the integration of all determinants of a broken rock pile after blasting, the analytical method is newly developed to determine the points and create the coordinate grid of a blasted block. The new computer program for the automatic creation of a blasted block coordinate grid takes into account the influences exerted by physical and mechanical properties of rocks, physicochemical characteristics of explosives and blasting pattern design. The program allows fast and sufficiently accurate position fixing of a blasted block coordinate grid points at different parameters and conditions of blasting. The resultant coordinate grids of blasted blocks are the tool for locating different elements inside broken-rock disintegration.

Key words: blasted block coordinate grid, grid points, broken-rock disintegration height and width, horizontal and inclined rock layers, degree of disintegration, computer-aided creation of coordinate grid.

Acknowledgements: The study was supported by the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan in 2018–2020 within the framework of Target Program 2018/BR05235618: Technological and Production Modernization in the Mining and Processing Industry in the Republic of Kazakhstan.

For citation: Rakishev B. R., Rakisheva Z. B., Orynbay A. A. Computer-aided creation of coordinate grid for blasted rock block. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020;(8):40-51. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-8-0-40-51.

Введение

Прогнозирование размещения разнородных пород уступа в развале взорванных пород имеет исключительно важное значение в горном деле. Оно актуально при отработке сложно-структурных скальных руд, при отгрузке пород различной кусковатости из различных зон развала. Установление внутренней

структуры взорванных пород позволит обоснованно выбрать рациональные технологии буровзрывных, выемочно-погрузочных работ и повысит эффективность открытой разработки многокомпонентных, сложно-структурных месторождений.

Формирование развала взорванных пород подчиняется закономерностям,

вытекающим из модели поэтапного разрушения массива горных пород взрывом зарядов взрывчатого вещества (ВВ) [1, 2]. Согласно этой модели, основное разрушение скальных горных пород происходит в первой стадии взрыва под действием волн напряжений, возбуждаемых в среде взрывом заряда ВВ, и самих газообразных продуктов взрыва.

На втором этапе (во второй стадии) взрыва вследствие влияния свободной поверхности нарушается осесимметричное развитие взрывной полости и зон разрушения. Оставшиеся во взрывной полости продукты взрыва доразрушают отбиваемую часть массива и сообщают ей механическое движение в сторону свободной поверхности. Вся раздробленная, выброшенная продуктами взрыва горная масса в пространстве занимает положение, определяемое конкретным значением начальной скорости отбиваемой части уступа. Она зависит от физико-механических свойств пород взрывающегося блока, физико-химических характеристик применяемого ВВ и параметров расположения зарядов ВВ во взрывающемся массиве.

На третьем этапе (в третьей стадии) взрыва совершается оседание выброшенных пород раздробленной части уступа в поле силы тяжести и образуется развал взорванной горной массы. Фиксированные элементы взрывающегося блока в развале занимают положения, предопределяемые исходными данными конкретного массового взрыва. Такой подход к механизму разрушения горных пород взрывом находит применение в работах ученых ближнего [3–13] и дальнего зарубежья [14–20].

Формирование развала горных пород подробно рассмотрены в работах [2, 3]. Для аналитического определения местоположения отдельных элементов взрывающегося блока уступа в развале введены понятия «координатная сетка

взрывающегося блока», «координатная сетка взорванного блока». Разработан аналитический метод определения узловых точек и самой координатной сетки взорванного блока.

Геометрические характеристики элементов взорванного блока уступа

Для создания координатных сеток взрывающийся блок целесообразно разбить на определенное число частей виртуальными плоскостями, проведенными параллельно откосу уступа и горизонту. Например, при однорядном расположении скважин взрывающийся блок указанными плоскостями достаточно разбить на 16 равных частей (элементов) (см. рис. 1, а). При двухрядном расположении скважин взрывающийся блок разбивается на 24 части (элемента), т.е. к рассмотренному случаю добавляются два наклонных равновеликих слоя толщиной, равной половине расстояния между рядами скважин и т.д. (см. рис. 2, а).

Следы горизонтальных разбивающих плоскостей в разрезе уступа представляют собой горизонтальные оконтуривающие линии элементов уступа. В их число входят также следы кровли и подошвы уступа. Аналогично следы наклонных разбивающих плоскостей представляют собой наклонные оконтуривающие линии рассматриваемых элементов уступа. Они включают в свой состав линию откоса уступа и линию отрыва взрывающегося блока от массива пород (см. рис. 1, а, 2, а).

Ранее проведенными исследованиями [2, 3] выявлены закономерности размещения фиксированных элементов взрывающегося блока в развале и установлены положения оконтуривающих линий при различных способах взрывания. Из их анализа следует, что размещение рассматриваемых элементов уступа в развале полностью определя-

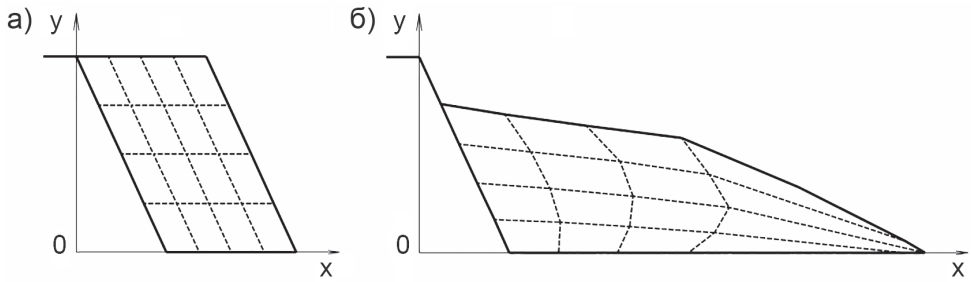


Рис. 1. Схема размещения элементов уступа во взрываемом (а) и взорванном блоках (б) при однорядном взрывании

Fig. 1. Arrangement of elements of bench in blast block (a) and blasted block (b) in blasting in single row of boreholes

ются положением их оконтуривающих линий во взорванной горной массе.

Совокупность взаимно пересекающихся горизонтальных и наклонных оконтуривающих линий элементов взрываемого блока в разрезе названа координатной сеткой взрываемого блока (см. рис. 1, а, 2, а). Совокупность взаимно пересекающихся деформированных го-

ризонтических и наклонных оконтуривающих линий элементов уступа в развале названа координатной сеткой взорванного блока (см. рис. 1, б, 2, б, 2, в).

К геометрическим характеристикам элементов взорванного блока относятся их площади, оконтуривающие линии, коэффициенты разрыхления элементов по горизонтальным и наклонным слоям

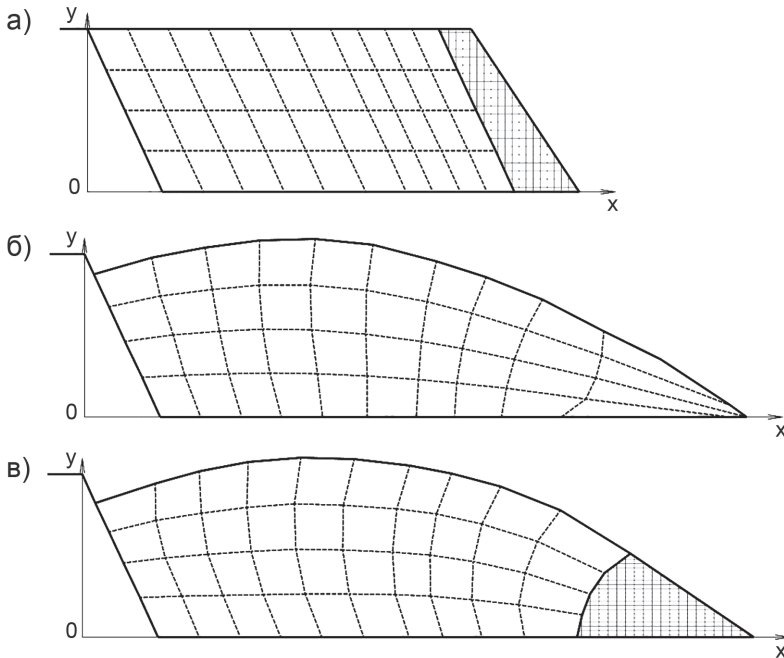


Рис. 2. Схема размещения элементов уступа во взрываемом (а) и взорванных блоках при четырехрядном КВЗ на свободную поверхность (б) и с подпорной стенкой (в)

Fig. 2. Arrangement of elements of bench in blast block (a) and blasted block in short-delay blasting in four rows of boreholes with free surface (b) and with retention wall (c)

Таблица 1

Площади и коэффициенты разрыхления пород в слоях взорванного блока при однорядном взрывании

Areas and degrees of rock fragmentation in layers of blasted blocks in blasting in single row

S_{11}^*	S_{12}^*	S_{13}^*	S_{14}^*	S_{21}^*	S_{22}^*	S_{23}^*	S_{24}^*
10,59	21,33	32,15	44,85	25,03	50,47	76,94	107,68
S_{31}^*	S_{32}^*	S_{33}^*	S_{34}^*	S_{41}^*	S_{42}^*	S_{43}^*	S_{44}^*
39,75	81,82	125,14	175,04	54,72	113,83	174,96	244,18
k_{p11}^*	k_{p12}^*	k_{p13}^*	k_{p14}^*	k_{p21}^*	k_{p22}^*	k_{p23}^*	k_{p24}^*
1,13	1,14	1,14	1,20	1,33	1,35	1,37	1,44
k_{p31}^*	k_{p32}^*	k_{p33}^*	k_{p34}^*	k_{p41}^*	k_{p42}^*	k_{p43}^*	k_{p44}^*
1,41	1,45	1,48	1,56	1,46	1,52	1,56	1,63

и координаты узловых точек координатной сетки взорванного блока. Они представлены на рис. 1, б, 2, б, 2, в.

На основе работ [2, 3], ниже приведены примеры расчетного определения указанных характеристик элементов взорванного блока для диорит-порфиров

Сарбайского карьера. Характеристики пород: $\rho_0 = 2830 \text{ кг/м}^3$, $c = 5100 \text{ м/с}$, $\sigma_{\text{сж}} = 190 \text{ МПа}$, $\sigma_p = 16 \text{ МПа}$, $\nu = 0,24$. Параметры расположения зарядов: высота уступа $h = 15,0 \text{ м}$, линия сопротивления по подошве уступа $W = 10,0 \text{ м}$, расстояние между скважинами $a = 7,5 \text{ м}$,

Таблица 2

Площади и коэффициенты разрыхления пород в слоях взорванного блока при четырехрядном КВЗ на свободную поверхность

Areas and degrees of rock fragmentation in layers of blasted blocks in short-delay blasting in four rows with free surface

S_{11}^*	S_{12}^*	S_{13}^*	S_{14}^*	S_{15}^*	S_{16}^*	S_{17}^*	S_{18}^*	S_{19}^*	$S_{1,10}^*$
14,54	29,86	45,41	61,10	77,03	93,74	106,13	118,71	131,58	145,07
S_{21}^*	S_{22}^*	S_{23}^*	S_{24}^*	S_{25}^*	S_{26}^*	S_{27}^*	S_{28}^*	S_{29}^*	$S_{2,10}^*$
29,96	60,96	93,18	126,68	161,39	198,40	225,37	253,17	282,14	312,78
S_{31}^*	S_{32}^*	S_{33}^*	S_{34}^*	S_{35}^*	S_{36}^*	S_{37}^*	S_{38}^*	S_{39}^*	$S_{3,10}^*$
46,99	94,49	145,35	197,55	252,42	309,88	352,04	396,33	442,74	491,90
S_{41}^*	S_{42}^*	S_{43}^*	S_{44}^*	S_{45}^*	S_{46}^*	S_{47}^*	S_{48}^*	S_{49}^*	$S_{4,10}^*$
64,37	130,75	198,92	271,68	347,75	426,57	484,92	545,93	610,02	678,96
k_{p11}^*	k_{p12}^*	k_{p13}^*	k_{p14}^*	k_{p15}^*	k_{p16}^*	k_{p17}^*	k_{p18}^*	k_{p19}^*	$k_{p1,10}^*$
1,03	1,06	1,08	1,09	1,10	1,11	1,13	1,15	1,17	1,19
k_{p21}^*	k_{p22}^*	k_{p23}^*	k_{p24}^*	k_{p25}^*	k_{p26}^*	k_{p27}^*	k_{p28}^*	k_{p29}^*	$k_{p2,10}^*$
1,07	1,08	1,10	1,13	1,15	1,18	1,20	1,23	1,25	1,28
k_{p31}^*	k_{p32}^*	k_{p33}^*	k_{p34}^*	k_{p35}^*	k_{p36}^*	k_{p37}^*	k_{p38}^*	k_{p39}^*	$k_{p3,10}^*$
1,11	1,12	1,15	1,17	1,20	1,22	1,25	1,28	1,31	1,35
k_{p41}^*	k_{p42}^*	k_{p43}^*	k_{p44}^*	k_{p45}^*	k_{p46}^*	k_{p47}^*	k_{p48}^*	k_{p49}^*	$k_{p4,10}^*$
1,14	1,16	1,18	1,21	1,24	1,26	1,29	1,32	1,36	1,39

Таблица 3

Площади и коэффициенты разрыхления пород в слоях взорванного блока при четырехрядном КЗВ с подпорной стенкой
Areas and degrees of rock fragmentation in layers of blasted blocks in short-delay blasting in four rows with retention wall

S_{11}^*	S_{12}^*	S_{13}^*	S_{14}^*	S_{15}^*	S_{16}^*	S_{17}^*	S_{18}^*	S_{19}^*	$S_{1,10}^*$
14,13	28,72	43,40	58,76	74,63	90,88	103,67	116,90	129,23	142,96
S_{21}^*	S_{22}^*	S_{23}^*	S_{24}^*	S_{25}^*	S_{26}^*	S_{27}^*	S_{28}^*	S_{29}^*	$S_{2,10}^*$
28,39	57,51	87,48	119,46	152,55	186,29	212,42	240,05	268,85	298,26
S_{31}^*	S_{32}^*	S_{33}^*	S_{34}^*	S_{35}^*	S_{36}^*	S_{37}^*	S_{38}^*	S_{39}^*	$S_{3,10}^*$
42,94	87,43	134,03	184,29	236,26	289,55	329,74	372,81	418,68	465,82
S_{41}^*	S_{42}^*	S_{43}^*	S_{44}^*	S_{45}^*	S_{46}^*	S_{47}^*	S_{48}^*	S_{49}^*	$S_{4,10}^*$
58,39	118,71	183,41	252,50	324,61	399,44	455,04	515,08	579,55	647,29
k_{p11}^*	k_{p12}^*	k_{p13}^*	k_{p14}^*	k_{p15}^*	k_{p16}^*	k_{p17}^*	k_{p18}^*	k_{p19}^*	$k_{p1,10}^*$
1,00	1,02	1,03	1,04	1,06	1,08	1,11	1,13	1,15	1,17
k_{p21}^*	k_{p22}^*	k_{p23}^*	k_{p24}^*	k_{p25}^*	k_{p26}^*	k_{p27}^*	k_{p28}^*	k_{p29}^*	$k_{p2,10}^*$
1,01	1,02	1,04	1,06	1,08	1,10	1,13	1,16	1,19	1,22
k_{p31}^*	k_{p32}^*	k_{p33}^*	k_{p34}^*	k_{p35}^*	k_{p36}^*	k_{p37}^*	k_{p38}^*	k_{p39}^*	$k_{p3,10}^*$
1,02	1,04	1,06	1,09	1,12	1,14	1,17	1,21	1,24	1,27
k_{p41}^*	k_{p42}^*	k_{p43}^*	k_{p44}^*	k_{p45}^*	k_{p46}^*	k_{p47}^*	k_{p48}^*	k_{p49}^*	$k_{p4,10}^*$
1,04	1,06	1,09	1,12	1,15	1,18	1,21	1,25	1,29	1,33

между рядами скважин $a_p = 7,5$ м, длина перебура $l_n = 2,0$ м, длина забойки $l_z = 7,0$ м, масса скважинного заряда $Q = 450$ кг. Расположение скважин однорядное, четырехрядное. Взрывание короткозамедленное (КЗВ) на свободную плоскость и с подпорной стенкой. Ширина отброшенной части развала 22,0 м. Ширина подпорной стенки по верху $B_{nc} = 3,0$ м, по низу $B_{nc} = 6,0$ м. Ширина подпорной стенки по низу входит в состав ширины отброшенной части развала. Удельный расход ВВ при однорядном взрывании $q = 0,4$ кг/м³, четырехрядном взрывании $q = 0,49$ кг/м³.

Схемы размещения элементов взорванного уступа при различных условиях взрывания в масштабе 1:468,75 приведены на рис. 1, б, 2, б, 2, в. Площади и коэффициенты разрыхления пород в зонах взорванного блока вычислены

с использованием программы AutoCad. В данном случае слоями взорванного блока, соответствующими искомым точкам координатной сетки, являются зоны массива или развала породы, ограниченные откосом уступа в тыльной части, нижней площадкой уступа и оконтуривающими линиями, которым принадлежат искомые точки. Они сведены в табл. 1–3. Нумерация слоев по вертикали γ ($\gamma = 1, 2 \dots 4$) ведется снизу вверх, а по горизонтали δ ($\delta = 1, 2 \dots 10$) слева на право. Этому порядку соответствуют индексы рассматриваемых характеристик элементов взорванного блока ($S_{1,1}^*, S_{1,2}^*, \dots, S_{4,10}^*; k_{p1,1}^*, k_{p1,2}^*, \dots, k_{p4,10}^*$). Площади приведены в м².

Найденные значения $S_{\gamma\delta}^*, k_{\gamma\delta}^*$ служат исходными данными для аналитического определения узловых точек координатной сетки взорванного блока уступа.

Аналитическое определение положения узловых точек координатной сетки взорванного блока

Как видно из рис. 1, а, 2, а, координаты узловых точек координатной сетки взорванного блока могут быть определены по следующим формулам:

$$x_{ij} = k^x_{ij}(\epsilon_\lambda + m_j), y_{ij} = k^y_{ij} * l_i, \quad (1)$$

где x_{ij}, y_{ij} — координаты узловых точек координатной сетки, т.е. точек пересечения i -й и j -й оконтуривающих линий элементов взорванного блока уступа, i ($i = 1, 2 \dots 5$), j ($j = 1, 2 \dots 11$); k^x_{ij}, k^y_{ij} — коэффициенты пропорциональности изменения координат узловых точек соответственно по горизонтальному и вертикальному направлениям; $\epsilon_\lambda, m_j, l_i$ — константы уравнения.

Константа ϵ_λ одинакова для однорядного и многорядного расположения скважин и определяется по зависимости:

$$\epsilon_\lambda = (h - l_i) \cdot \text{ctg}\alpha. \quad (2)$$

Здесь индексы ϵ_λ обозначают номера узловых точек на линии отрыва пород от массива снизу вверх ($\lambda = 1, 2 \dots 5$), h — высота уступа, α — угол откоса уступа, l_i — ордината i -й оконтуривающей горизонтальной линии взрываемого блока.

$$l_1 = 0; l_2 = h/4; l_3 = h/2; l_4 = 3h/4; l_5 = h. \quad (3)$$

Константа m_j — расстояние (по горизонтали) между рассматриваемой оконтуривающей наклонной линией и линией отрыва пород от массива во взрываемом блоке.

При однорядном взрывании:

$$m_1 = 0; m_2 = W/4; m_3 = W/2; m_4 = 3W/4; m_5 = W; \quad (4)$$

при четырехрядном КЗВ:

$$m_1 = 0; m_2 = a_p/2; m_3 = a_p; m_4 = 3a_p/2; m_5 = 2a_p; m_6 = 5a_p/2; m_7 = 3a_p;$$

$$m_8 = 3a_p + W/4; m_9 = 3a_p + W/2; m_{10} = 3a_p + 3W/4; m_{11} = 3a_p + W. \quad (5)$$

Численные значения коэффициентов k^x_{ij}, k^y_{ij} найдены по эмпирическим значениям x_{ij}, y_{ij} при заданных $\epsilon_\lambda, m_j, l_i$.

Аналитическое определение коэффициентов пропорциональности изменения координат узловых точек координатной сетки взорванного блока

Для теоретического обобщения полученных экспериментальных результатов коэффициенты пропорциональности изменения координат узловых точек необходимо связать с интегральной характеристикой состояния развала — с коэффициентом разрыхления пород в слоях развала, соответствующих точкам координатной сетки и с соотношением, учитывающим длину отброшенной части развала B_o , константы l_i, m_j , т.е. с параметрами:

$$p^x_{\gamma\delta} = k^*_{p(\gamma\delta)} \sqrt{\frac{B_o}{m_j}}, p^y_{\gamma\delta} = k^*_{p(\gamma\delta)} \sqrt{\frac{B_o}{l_i}}, \quad (6)$$

где $\gamma = 1, 2, 3, 4, \delta = 1, 2 \dots 10, i = \gamma + 1, j = \delta + 1$.

По экспериментально установленным значениям были найдены аппроксимирующие полиномиальные уравнения для определения искомых коэффициентов пропорциональности точек координатной сетки развала пород [21]:

$$k^x_{ij} = a^x_i p^x_{\gamma\delta}{}^5 + b^x_i p^x_{\gamma\delta}{}^4 + c^x_i p^x_{\gamma\delta}{}^3 + d^x_i p^x_{\gamma\delta}{}^2 + e^x_i p^x_{\gamma\delta} + f^x_i, k^y_{ij} = a^y_j p^y_{\gamma\delta}{}^2 + b^y_j p^y_{\gamma\delta} + c^y_j, \quad (7)$$

где $a^x_i, b^x_i, c^x_i, d^x_i, e^x_i, f^x_i$ — константы первого уравнения (7), связанные с i -й горизонтальной оконтуривающей линией; a^y_j, b^y_j, c^y_j — константы второго уравнения (7), связанные с j -й наклон-

ной оконтуривающей линией; также стоит учесть, что индексы слоев и оконтуривающих линий нумеруются следующим образом: если $i = 1$, то $\gamma = i$, если же $i > 1$, то $\gamma = i - 1$; аналогично, если $j = 1$, то $\delta = j$, если же $j > 1$, то $\delta = j - 1$.

По известным значениям $p_{\gamma\delta}^x$, $r_{\gamma\delta}$ в слоях развала были найдены значения констант $a_i^x, b_i^x, c_i^x, d_i^x, e_i^x, f_i^x, a_j^y, b_j^y, c_j^y$ они представлены в табл. 4, 5.

По предложенной методике аналитического определения узловых точек и координатной сетки блока была создана компьютерная программа в среде Microsoft Visual Studio 2019 [22]. Она

позволяет проводить удобный и гибкий расчет координат узловых точек и построить профиль развала взорванных пород. По разработанной программе были смоделированы результаты массовых взрывов при заданных параметрах БВР на 15-метровом уступе. Примеры расчетов и автоматизированного построения профиля развала горных пород представлены на рис. 1, 2. Они подтверждают работоспособность разработанного аналитического метода определения координат узловых точек координатной сетки взорванного блока и автоматизированного прогнозирования

Таблица 4

Константы уравнений коэффициентов пропорциональности изменения координат узловых точек в горизонтальном направлении
Constants in equations of proportionality factors of horizontal change in coordinates of grid points

i	При однорядном взрывании					
	a_i^x	b_i^x	c_i^x	d_i^x	e_i^x	f_i^x
1	0,00	0,00	5,64	-7,76	4,42	0,26
2	0,00	0,00	23,56	-35,74	18,90	-1,91
3	0,00	0,00	15,45	-28,75	18,76	-2,34
4	0,00	0,00	19,63	-41,27	29,12	-4,60
5	0,00	0,00	-1,68	6,00	-5,75	4,23
i	При четырехрядном КЗВ на свободную поверхность					
	a_i^x	b_i^x	c_i^x	d_i^x	e_i^x	f_i^x
1	2,53	-10,87	18,66	-15,66	6,32	0,03
2	11,17	-48,79	83,02	-68,27	27,02	-3,06
3	6,94	-32,11	57,68	-49,75	20,45	-2,05
4	4,42	-21,94	42,48	-39,50	17,42	-1,62
5	-2,66	14,57	-30,98	32,41	-16,97	5,04
i	При четырехрядном КЗВ с подпорной стенкой					
	a_i^x	b_i^x	c_i^x	d_i^x	e_i^x	f_i^x
1	0,25	-0,89	1,59	-1,53	0,73	0,88
2	0,91	-3,51	5,47	-4,15	1,50	0,82
3	0,33	-1,02	1,23	-0,57	0,04	1,08
4	0,05	0,20	-0,99	1,64	-1,23	1,51
5	-2,24	13,12	-29,70	32,99	-18,17	5,35

Таблица 5

Константы уравнений коэффициентов пропорциональности изменения координат узловых точек в вертикальном направлении
Constants in equations of proportionality factors of vertical change in coordinates of grid points

j	При однорядном взрывании			При четырехрядном КЗВ		При четырехрядном КЗВ с подпорной стенкой	
	a_j^y	b_j^y	c_j^y	b_j^y	c_j^y	b_j^y	c_j^y
1	2,60	-2,15	1,11	-0,17	1,03	-0,32	1,10
2	2,81	-2,36	1,11	-0,09	1,07	-0,12	1,05
3	0,99	-0,98	0,74	-0,04	1,08	-0,0024	1,02
4	1,86	-3,00	1,62	0,03	1,06	0,07	1,01
5	0	4,30	-5,45	0,08	1,01	0,09	1,02
6	-	-	-	0,11	0,95	0,08	1,02
7	-	-	-	0,07	0,89	0,02	1,04
8	-	-	-	0,05	0,80	-0,0025	1,01
9	-	-	-	0,04	0,68	0,0045	0,92
10	-	-	-	0,13	0,38	-0,01	0,80
11	-	-	-	1,40	-1,26	-0,06	0,57

размещения различных элементов уступа во взорванной горной массе в различных условиях взрывания.

Заключение

- Для аналитического определения местоположения отдельных элементов взрывающего блока уступа в развале введены понятия «координатная сетка взрывающего блока», «координатная сетка взорванного блока».

- Совокупность взаимно пересекающихся горизонтальных и наклонных оконтуривающих линий элементов взрывающего блока в разрезе названа координатной сеткой взрывающего блока. Совокупность взаимно пересекающихся деформированных горизонтальных и наклонных оконтуривающих линий элементов уступа в развале названа координатной сеткой взорванного блока. Показаны примеры их построения.

- Разработан аналитический метод определения узловых точек и самой ко-

ординатной сетки взорванного блока. Он включает в свой состав вычисление координат этих точек по установленным зависимостям и автоматизированное построение профиля развала пород.

- Установлены зависимости коэффициентов пропорциональности изменения координат узловых точек координатной сетки взорванного блока от параметров, учитывающих коэффициент разрыхления пород в слоях, длину отброшенной части развала и константы уравнения координат узловых точек во взрывающем массиве.

- Разработана компьютерная программа автоматизированного определения узловых точек и координатной сетки развала горных пород. Полученные результаты служат надежным инструментом для оперативного определения размещения различных элементов уступа в развале: рудных включений различной конфигурации, различных зон дробления и т.д.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Покровский Г. И., Федоров И. С. Действие удара и взрыва в деформируемых средах. — М., 1957. — 276 с.
2. Ракишев Б. Р. Автоматизированное проектирование и производства массовых взрывов на карьерах. — Алматы: Ғылым, 2016. — 340 с.
3. Ракишев Б. Р., Шампикова А. Х., Казангапов А. Е. Горно-геологические характеристики взорванных сложноструктурных блоков // Взрывное дело. — 2018. — № 120-77. — С. 82–93.
4. Викторов С. Д., Франтов А. Е., Закалинский В. М. Теория — техника — технология взрывных работ с применением конверсионных ВВ в процессах горного производства. — М.: ИПКОН РАН, 2019. — 384 с.
5. Викторов С. Д. Взрывное разрушение массивов горных пород — основа прогресса в горном деле // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2015. — № 51. — С. 63–75.
6. Казаков Н. Н., Шляпин А. В. Определение тензорного напряженно-деформированного состояния горных пород при взрыве скважинного заряда // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2018. — № 51. — С. 112–126.
7. Парамонов Г. П., Ковалевский В. Н., Мысин А. В. Численное моделирование разрушения блока горной породы взрывом с учетом лабораторных экспериментов // Взрывное дело. — 2019. — № 122-79. — С. 19–33.
8. Яницкий Е. Б., Кобелко С. Г., Дунаев В. А., Рахманов Р. А. Компьютерное моделирование смещения горной массы и оценка разубоживания руды в результате массового взрыва при открытой разработке месторождений // Взрывное дело. — 2018. — № 120-77. — С. 94–108.
9. Тюпин В. Н., Анисимов В. Н. Разработка методов сохранения устойчивости открытых поверхностей трещиноватых горных массивов при проведении массовых взрывов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 4. — С. 53–62. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-04-0-53-62.
10. Халкечев Р. К. Нечеткая математическая модель изменения концентрации трещин в минерале под действием внешней нагрузки // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 6. — С. 97–105. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-06-0-97-105.
11. Сергунин М. П., Еременко В. А. Обучение нейронной сети предсказывать параметры сдвижения горных пород налегающей толщи на основании данных о трещиноватости массива на примере рудника «Заполярный» // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 10. — С. 106–116. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-10-0-106-116.
12. Бабелло В. А., Бейдин А. В., Овсейчук В. А., Смолич С. В. Оценка состояния горного массива на основе анализа горно-геологической обстановки и моделирования его напряженности // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 12. — С. 41–54. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-12-0-41-54.
13. Казаков Н. Н. Разрушение и дробление горных пород в карьерах // Взрывное дело. — 2018. — № 119-76. — С. 5–19.
14. An H. M., Hongyuan Liu, Haoyu Han, Xin Zheng, Wang X. G. Hybrid finite-discrete element modelling of dynamic fracture and resultant fragment casting and muck-piling by rock blast // Computers and Geotechnics. 2017. Vol. 81. Pp. 322–345.
15. Onederra I. A., Furtney J. K., Sellers E., Iverson S. Modelling blast induced damage from a fully coupled explosive charge // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2013. Vol. 58. Pp. 73–84.
16. Bakhshandeh Amnieh Hassan, Moein Bahadori Numerical analysis of the primer location effect on ground vibration caused by blasting // International Journal of Mining and Geo-Engineering. 2017. Vol. 51. No 1. Pp. 53–62. DOI: 10.22059/IJMGE.2017.62153.

17. Branko D., Detournay C., Cundall P.A. Application of particle and lattice codes to simulation of hydraulic fracturing // *Computational Particle Mechanics*. 2016. Vol. 3. No 2. Pp. 249 – 261.
18. Furtney J. K., Andrieux P., Hall A. K. Applications for numerical modeling of blast induced rock fracture / 50th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. American Rock Mechanics Association, 2016.
19. Zirui Mao, Guirong Liu, Yu Huang, Yangjuan Bao A conservative and consistent lagrangian gradient smoothing method for earthquake-induced landslide simulation // *Engineering Geology*. 2019. Vol. 260. Article 105226. DOI: 10.1016/j.enggeo.2019.105226.
20. Yingguo Hu, Wenbo Lu, Xinxia Wu, Meishan Liu, Peng Li Numerical and experimental investigation of blasting damage control of a high rock slope in a deep valley // *Engineering Geology*. 2018. Vol. 237. Pp. 12 – 20. DOI: 10.1016/j.enggeo.2018.01.003.
21. Лоран П. Ж. Аппроксимация и оптимизация. — М.: Мир, 1975. — С. 496.
22. Powers L., Snell M. Microsoft Visual Studio 2015 Unleashed, 3rd edition. Indianapolis, Imprint Sams, 2015. **MIAB**

REFERENCES

1. Pokrovskiy G. I., Fedorov I. S. *Deystvie udara i vzryva v deformiruemyykh sredakh* [The action of shock and explosion in deformable media], Moscow, 1957, 276 p.
2. Rakishev B. R. *Avtomatizirovannoe proektirovanie i proizvodstva massovykh vzryvov na kar'erakh* [Automated design and production of mass explosions in quarries], Almaty, Gylym, 2016, 340 p.
3. Rakishev B. R., Shampikova A. Kh., Kazangapov A. E. Mining and geological characteristics of blown up structural blocks. *Vzryvnoe delo*. 2018, no 120-77, pp. 82 – 93. [In Russ].
4. Viktorov S. D., Frantov A. E., Zakalinskiy V. M. *Teoriya – tekhnika – tekhnologiya vzryvnykh rabot s primeneniem konversionnykh VV v protsessakh gornogo proizvodstva* [Theory – technology – blasting technology using conversion explosives in mining processes], Moscow, IPKON RAN, 2019, 384 p.
5. Viktorov S. D. Explosive destruction of rock masses – the basis of progress in mining. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2015, no S1, pp. 63 – 75. [In Russ].
6. Kazakov N. N., Shlyapin A. V. Determination of tensor stress-strain state of rocks during explosion of a borehole charge. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2018, no S1, pp. 112 – 126. [In Russ].
7. Paramonov G. P., Kovalevskiy V. N., Mysin A. V. Numerical simulation of the destruction of a rock block by an explosion taking into account laboratory experiments. *Vzryvnoe delo*. 2019, no 122-79, pp. 19 – 33. [In Russ].
8. Yanitskiy E. B., Kobelko S. G., Dunaev V. A., Rakhmanov R. A. Computer simulation of rock mass displacement and evaluation of ore dilution as a result of a mass explosion in open pit mining. *Vzryvnoe delo*. 2018, no 120-77, pp. 94 – 108. [In Russ].
9. Tyupin V. N., Anisimov V. N. Methods of stability retention of exposed rock surfaces in fractured rock mass under large-scale blasting. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019;(4):53-62. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-04-0-53-62.
10. Khalkechev R. K. Fuzzy mathematical model of crack density variation in mineral under external loading. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019;(6):97-105. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-06-0-97-105.
11. Sergunin M. P., Eremenko V. A. Learning of neural network to predict overlying rock mass displacement parameters by the data on jointing in terms of the Zapolyarny Mine. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019;(10):106-116. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-10-0-106-116.
12. Babello V. A., Beydin A. V., Smolich S. V., Ovseychuk V. A. Assessment of rock mass behavior based on its geology analysis and stress state modeling. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2019;(12):41-54. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-12-0-41-54.

13. Kazakov N. N. The destruction and crushing of rocks in quarries. *Vzryvnoe delo*. 2018, no 119-76, pp. 5 – 19. [In Russ].

14. An H. M., Hongyuan Liu, Haoyu Han, Xin Zheng, Wang X. G. Hybrid finite-discrete element modelling of dynamic fracture and resultant fragment casting and muck-piling by rock blast. *Computers and Geotechnics*. 2017. Vol. 81. Pp. 322 – 345.

15. Onederra I. A., Furtney J. K., Sellers E., Iverson S. Modelling blast induced damage from a fully coupled explosive charge. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2013. Vol. 58. Pp. 73 – 84.

16. Bakhshandeh Amnieh Hassan, Moein Bahadori Numerical analysis of the primer location effect on ground vibration caused by blasting. *International Journal of Mining and Geo-Engineering*. 2017. Vol. 51. No 1. Pp. 53 – 62. DOI: 10.22059/IJMGE.2017.62153.

17. Branko D., Detournay C., Cundall P. A. Application of particle and lattice codes to simulation of hydraulic fracturing. *Computational Particle Mechanics*. 2016. Vol. 3. No 2. Pp. 249 – 261.

18. Furtney J. K., Andrieux P., Hall A. K. Applications for numerical modeling of blast induced rock fracture. *50th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*. American Rock Mechanics Association, 2016.

19. Zirui Mao, Guirong Liu, Yu Huang, Yangjuan Bao A conservative and consistent lagrangian gradient smoothing method for earthquake-induced landslide simulation. *Engineering Geology*. 2019. Vol. 260. Article 105226. DOI: 10.1016/j.enggeo.2019.105226.

20. Yingguo Hu, Wenbo Lu, Xinxia Wu, Meishan Liu, Peng Li Numerical and experimental investigation of blasting damage control of a high rock slope in a deep valley. *Engineering Geology*. 2018. Vol. 237. Pp. 12 – 20. DOI: 10.1016/j.enggeo.2018.01.003.

21. Laurent P. J. *Аппроксимация и оптимизация* [Approximation and optimization], Moscow, Mir, 1975, pp. 496.

22. Powers L., Snell M. *Microsoft Visual Studio 2015 Unleashed*, 3rd edition. Indianapolis, Imprint Sams, 2015.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Ракишев Баян Ракишевич*¹ – академик НАН РК,
д-р техн. наук, профессор, e-mail: b.rakishev@mail.ru,

Ракишева Зауре Баяновна – канд. физ.-мат. наук,
профессор, зав. кафедрой, Казахский национальный университет
имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан,

*Орынбай Асфандияр Айтказыулы*¹ – докторант PhD,
старший преподаватель,

¹ Казахский национальный исследовательский технический университет
имени К.И. Сатпаева (Satbayev University), Алматы, Казахстан.

Для контактов: Ракишев Б.Р., e-mail: b.rakishev@mail.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*B.R. Rakishev*¹, Academician of NAS of the Republic of Kazakhstan,
Dr. Sci. (Eng.), Professor, e-mail: b.rakishev@mail.ru,

Z.B. Rakisheva, Cand. Sci. (Phys. Mathem.), Professor, Head of Chair,
Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan,

*Orynbay Asfandiyar Aytqazyuly*¹, PhD Student, Senior Lecturer,
¹ K.I. Satpayev Kazakh National Research Technical University

(Satbayev University), Almaty, Kazakhstan.

Corresponding author: B.R.Rakishev, e-mail: b.rakishev@mail.ru.

Получена редакцией 21.02.2020; получена после рецензии 30.04.2020; принята к печати 20.07.2020.

Received by the editors 21.02.2020; received after the review 30.04.2020; accepted for printing 20.07.2020.