

Код МРНТИ 52.31.01:52.13.07

Б.Р. Ракишев, *А.А. Орынбай, А.Е. Алибаев, Т.С. Ибырханов

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева» (г. Алматы, Казахстан)

АНАЛИТИКА ДЛЯ ЦИФРОВОГО УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ ДРОБЛЕНИЯ ПОРОД В ПОДЗЕМНЫХ ВЫРАБОТКАХ

Аннотация. В статье описан аналитический метод определения гранулометрического состава взорванной горной массы при шпуровой отбойке пород в горизонтальной подземной выработке. Он базируется на учете размеров зон интенсивного дробления пород вокруг шпурового заряда и содержания естественных отдельностей в массиве пород. Радиусы зон интенсивного дробления рассчитываются по заданным физико-механическим свойствам взрываемых пород и физико-химическим характеристикам применяемых взрывчатых веществ (ВВ). Разработана компьютерная программа автоматизированного определения грансостава взорванной горной массы, взаимоувязывающего влияние физико-технических свойств взрываемых пород, физико-химических характеристик применяемого ВВ и параметров расположения зарядов в массиве пород. С помощью этой программы проведены расчеты прогнозируемого гранулометрического состава пород при различных параметрах буровзрывных работ на месторождении Акжал (ТОО «Nova цинк»).

Ключевые слова: месторождение Акжал, горная порода, развал, гранулометрический состав, буровзрывные работы, радиусы зон дробления, содержание естественных отдельностей, объемы интенсивного дробления.

Жерасты қазбаларындағы тау жыныстарын ұсақтау сапасын сандық басқаруға арналған аналитика

Аңдатпа. Бұл мақалада көлденең жерасты қазбаларында жарылыс ұңғымаларын жару кезінде жарылған тау жыныстарының массасының бөлшектердің өлшемдік таралуын анықтаудың аналитикалық әдісі сипатталған. Ол жарылыс ұңғысының зарядының айналасындағы қарқынды ұсақтау аймақтарының өлшемдеріне және тау массасындағы табиғи қосылыстардың мазмұнына негізделген. Интенсивті ұсақтау аймақтарының радиустары жарылған тау жынысының көрсетілген физикалық-механикалық қасиеттеріне және қолданылатын жарылғыш заттардың физикалық-химиялық сипаттамаларына негізделеді. Жарылған тау жыныстарының физикалық-техникалық қасиеттерінің, қолданылатын жарылғыш заттардың физикалық-химиялық сипаттамаларының және тау-кен массасындағы шпурлардың орналасу параметрлерінің әсерін өзара байланыстыра отырып, жарылған тау-кен массасының бөлшектердің өлшемдік таралуын автоматтандырылған түрде анықтауға арналған компьютерлік бағдарлама әзірленді. Бұл бағдарлама Акжал кен орнында («Nova Цинк» ЖШС) әртүрлі бұрғылау және жару параметрлері бойынша тау жыныстарының болжамды бөлшектердің мөлшерін есептеу үшін пайдаланылды.

Түйінді сөздер: Акжал кен орны, тау жынысы, опырылым, гранулометриялық құрам, бұрғылау-жару жұмыстары, ұсақтау аймақтарының радиустары, табиғи бөлінулердің мөлшері, қарқынды ұсақтау көлемдері.

Analytics for digital quality control of rock crushing in underground minings

Abstract. This article describes an analytical method for determining the grain size distribution of blasted rock mass during blasthole blasting in horizontal underground workings. It is based on taking into account the size of the zones of intense rock fragmentation around the blasthole charge and the content of natural joints in the rock mass. The radii of the zones of intense fragmentation are calculated based on the specified physical and mechanical properties of the blasted rock and the physical and chemical characteristics of the explosives used. A computer program for automated determination of the particle size distribution of blasted rock mass was developed, interrelating the influence of the physical and technical properties of the blasted rock, the physical and chemical characteristics of the explosive used, and the parameters of the charge placement within the rock mass. Using this program, calculations were made of the predicted particle size distribution of rocks under various drilling and blasting parameters at the Akzhal deposit (Nova Zinc LLC).

Key words: Akzhal deposit, rock, rock pile, particle size distribution, drilling and blasting, fragmentation zone radii, natural joint content, intensive fragmentation volumes.

Введение

Гранулометрический состав (ГС) взорванной горной массы (ВГМ) – ключевой индикатор качества буровзрывных работ (БВР) и управляемости взрыва. Именно он определяет эффективность выемочно-погрузочных работ, дробления и обогащения полезного ископаемого. Современный обзор по оценке качества дробления подчеркивает: несоответствие фактической фрагментации целевым параметрам ведет к росту удельных затрат и технологическим потерям, поэтому системная диагностика ГС ВГМ должна быть встроена в цикл подготовки и анализа БВР.

Для обеспечения более надежного прогноза требуется учитывать реальные физико-механические свойства пород, физико-химические характеристики взрывчатых веществ (ВВ), а также конкретные параметры и условия проведения БВР. Такой учет позволяет минимизировать ошибки и неопределенности, возникающие при использовании алгоритмов проектирования, построенных только на математических или нейросетевых методах.

Отличительной особенностью предлагаемого в настоящем исследовании подхода является применение аналитических методов для расчета параметров расположения зарядов и определения зон дробления при прогнозировании ГС для свинцово-цинкового месторождения Акжал. Эти методы положены в основу теоретического обоснования закономерностей формирования ГС.

Объектом исследования выступает месторождение Акжал, массив горных пород в условиях горизонтальной горной выработки, представленный совокупностью естественных отдельностей различной формы и размеров, соединенных между собой цементацией или плотным контактом.

Современное состояние прогнозирования и определения гранулометрического состава взорванной горной массы

Для описания ГС применяют кривые Розина-Раммлера, Kuz-Ram и логнормальную модель (удобную для оперативной параметризации по d_{50} , σ) [1–4]. Новые теоретические и полуэмпирические подходы взаимоувязывают физико-механические свойства, структуру массива, характеристики ВВ и геометрию сетки с радиусами зон разрушения и ожидаемым распределением фракций [5–7].

Современный обзор по взрываемости массива пород подчеркивает, что без экспресс-оценки геолого-геотехнических характеристик добиться предсказуемого ГС сложно [8]. Согласно работам авторов, усовершенствованный метод рассчитывает радиусы зон интенсивного дробления вокруг скважинных зарядов по физико-механическим свойствам пород и характеристикам ВВ, учитывает естественную отдельность массива и влияние волн, отраженных от свободных поверхностей, через коэффициент

дополнительного дробления; на этой основе впервые предложена аналитика распределения по классам крупности. Пример параметрической «сборки» распределения по классам представлен в номенклатуре входов (линия сопротивления, шаги сетки, длины зарядов/перебура), что удобно для включения в инженерный расчет [9].

Физико-механические характеристики пород Акжалского месторождения

Свинцово-цинковое месторождение Акжал относится к стратиформному промышленному типу, отвечающему совмещенным гидротермально-осадочной и гидротермально-метасоматической стадиям формирования.

При этом, по комплексу признаков обе стадии отчетливо просматриваются в пределах Восточного участка месторождения. В пределах же рассматриваемого Центрального участка о наличии ранней гидротермально-осадочной стадии можно судить лишь по косвенным признакам (литологический и структурно-литологический контроль оруденения); в гидротермальную стадию здесь оруденение практически полностью перераспределено, в том числе, распространяясь в ближайшей эндоконтактной зоне малых интрузивных тел.

Промышленное оруденение, в основном, локализовано в пачке массивных известняков, узкой лентой протягивающейся в субширотном направлении на 5–5,5 км. Ширина рудовмещающей «ленты» (полосы) изменяется от 50–100 до 300–350 м.

Анализ данных по трещиноватости (блочности) массивов горных пород Акжалского месторождения показывает, что массив характеризуется определенной совокупностью естественных отдельностей, содержащихся в нем и склеенных между собой природным цементом. Различное сочетание этих элементов и представляет их

гранулометрический состав в массиве и устанавливается непосредственными замерами на обнажениях горных выработок. При этом естественные отдельности по крупности подразделяются на семь фракций: менее 0,2 м, в пределах от 0,21 до 0,4, от 0,41 до 0,6, от 0,61 до 0,80, от 0,81 до 1,0, от 1,01 до 1,2 и более 1,21 м. При шпуровой отбойке эти семь классов распределены в следующем порядке: менее 0,15 м, в пределах от 0,16 до 0,3, от 0,31 до 0,45, от 0,46 до 0,60, от 0,61 до 0,75, от 0,76 до 0,9 и более 0,9 м. Процентное содержание перечисленных классов естественных отдельностей в массиве пород показано в таблице 1. По найденному грансоставу естественных отдельностей в конкретных массивах вычисляется их средний размер. По этому параметру осуществляется классификация массивов пород по блочности или трещиноватости [10].

На Акжалском месторождении мелкоблочные массивы представлены интенсивно дробленным бугристым известняком. Среднеблочные массивы представлены вторичными кварцитами, диорит-порфирами. Крупноблочные массивы представлены известняком мраморизованным. Весьма крупноблочные массивы представлены крупнозернистым и скарированным известняком.

К основным свойствам горных пород, характеризующим их поведение при динамических нагрузках, как известно, относятся: плотность, скорости распространения продольной и поперечной волн, модуль упругости, коэффициент Пуассона и пределы прочности на сжатие, растяжение и сдвиг. Эти константы пород устанавливаются стандартными методами на образцах правильной и полуправильной формы. Модуль упругости легко вычисляется по формулам теории упругости при подстановке в них конкретных значений плотности, скорости продольной волны и коэффициента Пуассона [10].

Таблица 1

Реальный (числитель) и виртуальный (знаменатель) гранулометрический состав естественных отдельностей в массивах пород

Кесте 1

Шын мәніндегі (жөзсарғы) және виртуалды (төменгі) табиғи бөлшектердің жыныс массивтеріндегі гранулометриялық құрамы

Table 1

Real (numerator) and Virtual (denominator) Granulometric Composition of Natural Particles in Rock Masses

Классы массивов по блочности	Массивы по блочности (средний диаметр отдельности, м)	Содержание в массиве (%) отдельностей размером (м)						
		< 0,15	0,16–0,30	0,31–0,45	0,46–0,60	0,61–0,75	0,76–0,90	> 0,91
I	Мелкоблочные ($d_c = 0,1\text{ м}$)	63,97 63,97	17,43 18,39	4,75 4,12	1,30 1,08	0,35 0,27	0,10 0,07	0,03 0,015
II	Среднеблочные ($d_c = 0,3\text{ м}$)	36,03 36,03	23,39 28,05	15,18 14,78	9,85 9,03	6,39 5,41	4,15 3,04	2,69 1,35
III	Крупноблочные ($d_c = 0,5\text{ м}$)	16,09 16,09	15,64 23,36	15,19 17,85	14,76 15,52	14,34 13,27	13,94 10,65	13,54 6,77
IV	Весьма крупноблочные ($d_c = 0,7\text{ м}$)	6,71 6,71	8,50 17,71	10,78 16,4	13,66 16,98	17,31 17,59	21,94 17,41	27,81 13,90

Упругие и прочностные свойства горных пород месторождения Акжал определены с использованием известных методик. Физико-механические свойства пород:

порода «Скарнированный известняк», плотность породы $\rho = 2840 \text{ кг/м}^3$, скорость звука в породе $c = 4250 \text{ м/с}$, $\sigma_{сж} = 210 \text{ МПа}$, $\sigma_p = 19 \text{ МПа}$, $\nu = 0,30$;

порода «Крупнозернистый известняк», плотность породы $\rho = 2820 \text{ кг/м}^3$, скорость звука в породе $c = 4350 \text{ м/с}$, $\sigma_{сж} = 175,6 \text{ МПа}$, $\sigma_p = 16,2 \text{ МПа}$, $\nu = 0,30$;

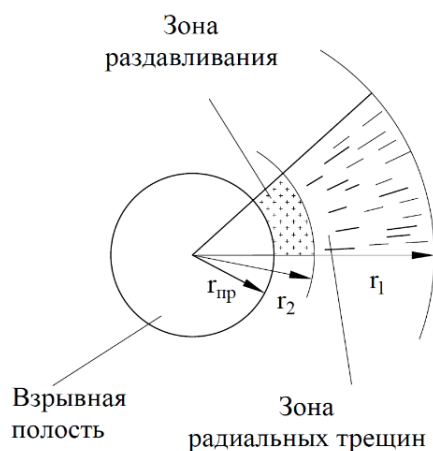
порода «Мраморизованный известняк», плотность породы $\rho = 2820 \text{ кг/м}^3$, скорость звука в породе $c = 3820 \text{ м/с}$, $\sigma_{сж} = 158,9 \text{ МПа}$, $\sigma_p = 12,3 \text{ МПа}$, $\nu = 0,30$;

порода «Диорит порфириит», плотность породы $\rho = 2720 \text{ кг/м}^3$, скорость звука в породе $c = 5700 \text{ м/с}$, $\sigma_{сж} = 107,9 \text{ МПа}$, $\sigma_p = 10,3 \text{ МПа}$, $\nu = 0,28$.

Ключевые результаты взрыва зарядов ВВ в отбиваемом слое пород

Разрушение горных пород действием взрыва заряда ВВ зависит от конкретного сочетания многочисленных влияющих факторов. В общем случае оно протекает в соответствии с гипотезой Г.И. Покровского, получившей дальнейшее развитие в работах Б.Р. Ракишева [5, 7, 9, 10].

К ключевым результатам разрушения горных пород взрывом заряда ВВ относятся предельный радиус взрывной полости, прочность пород в условиях всестороннего взрывного нагружения, радиус зоны мелкого дробления, радиус зоны радиальных трещин и принцип рационального размещения зарядов в отбиваемом слое пород (рис.1) [9, 10].



$r_{пр}$ – предельный радиус взрывной полости,
 r_2 – радиус зоны мелкого дробления, r_1 – радиус зоны трещинообразования

Рис. 1. Структура зон разрушения вокруг взрывной полости.

Сурет 1. Жарылыс қуыс айналасындағы қирау аймақтарының құрылымы.

Figure 1. The structure of the destruction zones around the explosive cavity.

Принцип рационального размещения зарядов ВВ во взрываеом массиве, предусматривающий наибольший охват отбиваемого слоя пород трещинами, образованными

действием взрыва при уступной отбойке, выражен равенствами [5, 9, 10]:

$$(1+k)^{1/2} \frac{\pi r_1}{2W} \approx 1, \frac{2r_1}{a} \approx 1, (1+k)^{1/2} \frac{h_3 + r_2}{h} \approx 1, \quad (1)$$

где r_2 – радиус зоны мелкого дробления, м;

r_1 – радиус зоны радиальных трещин, м;

k – коэффициент, учитывающий доли разрушения массива пород как от действия отраженных волн, так и вспучивающего действия взрыва и $k = 1$;

W – линия сопротивления по подошве уступа (ЛСПП), м;

a – расстояние между скважинами в ряду, м;

h_3 – высота цилиндрического заряда в скважине без перебура, м;

h – высота взрываеомого блока, м.

Поскольку первые две стадии взрыва при уступной и безуступной отбойке протекают одинаково [9, 10], выражения (1) справедливы и для цилиндрических зарядов, расположенных в подземных горизонтальных выработках различного назначения.

Аналитическое определение рациональных параметров расположения зарядов в горизонтальной подземной выработке

Основными параметрами размещения зарядов ВВ в горизонтальной подземной выработке являются: толщина (длина) отбиваемого слоя h , его ширина A , высота B ; диаметр шпура (скважины) $d_{ш}$, d_c , длина шпура $l_{ш}$, расстояния между врубовыми шпурами a_6 , $a_{ок}$, a_{62} , a_{63} , расстояния между центральным врубовым шпуrom и последующими шпурами во врубе r_{61} , r_{62} , r_{63} , расстояние между отбойными шпурами $a_{от}$, расстояние между оконтуривающими шпурами и проектным контуром выработки b , расстояние между оконтуривающими шпурами $a_{ок}$, длина заряда l_1 в шпуре, длина заряда без перебура h_3 , длина незаряженной части шпура (недозаряда) l_2 , длина перебура $l_{п}$, вместимость 1 пог. м шпура $p_{ш}$, масса заряда m в шпуре, схема, время замедления между разновременными взрываеомыми группами зарядов ВВ τ . Конечный результат взрыва: удельный расход ВВ q_p , выход горной массы с 1 пог. м. шпура g , коэффициент использования шпура (КИШ); объем бурения V_b , площадь забоя на один шпур S_z , гранулометрический состав взорванной горной массы $[p'(x), p'(x), \dots, p'(x_n)]$ и развал взорванной горной массы.

Линия наименьшего сопротивления (ЛНС) – кратчайшее расстояние от оси заряда, помещенного в шпуре до ближайшей свободной W' , определяется из первого соотношения выражений (1) с учетом того, что $k = 1$, $W' = W' \cdot \sin \alpha$. Поскольку угол откоса уступа в среднем $\alpha = 63^\circ$, то $W' = 0,9 \cdot W$.

Таким образом, ЛНС при шпуровой отбойке равняется:

$$W' \approx 2 \cdot r_1. \quad (2)$$

С учетом найденного ЛНС и принципа рационального размещения зарядов параметры БВР рассчитываются в соответствии с описанной методикой авторов в работе [5, 9, 10].

Алгоритм определения количества врубовых, отбойных и оконтуривающих шпуров сводится к следующим действиям [6].

Первыми определяются шпуры, расположенные горизонтально вдоль основания выработки с учетом принятого расстояния между шпурами a . Их количество можно вычислить по следующей формуле:

$$n_a = (A - 2 \cdot r_2) / a. \quad (3)$$

Далее определяются шпуры, расположенные вертикально вдоль боковых стенок выработки. Их количество рассчитывается из следующего выражения:

$$n_b = ((B^2 - A^2 / 4) - 2 \cdot r_2) / a. \quad (4)$$

Отсюда общее количество оконтуривающих шпуров будет равно:

$$N_{ок} = n_a \cdot 2 + (n_b - 2) \cdot 2. \quad (5)$$

В случае, если количество шпуров в основании выработки не превышает 5 шт., т. е. $n_a < 5$, то количество врубовых шпуров принимается равным 7, т. е. $N_{вр} = 7$. Это происходит вследствие того, что в выработку такого размера можно вместить лишь двухрядный вруб.

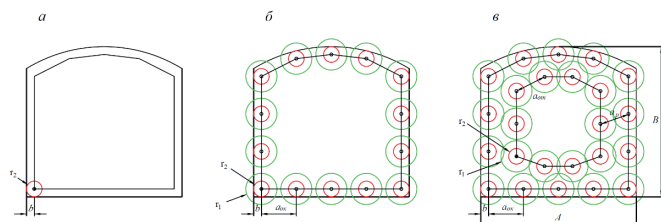


Рис. 2. Схемы расположения оконтуривающих и отбойных шпуров.

Сурет 2. Контур және жарылыс шпурларының схемасы.

Figure 2. Layout of contour and blast boreholes.

Количество отбойных шпуров соответственно вычисляется из принципа заполнения пустого пространства по выражению:

$$N_{от} = (n_a - 2) \cdot 2 + (n_b - 3) \cdot 2. \quad (6)$$

Если же количество шпуров в горизонтальной плоскости более или равно 5, т. е. $n_a \geq 5$, то количество врубовых шпуров принимается равным 10, т. е. $N_{вр} = 10$. В данном случае в выработку такого размера возможно поместить трехрядный вруб. Тогда количество отбойных шпуров вычисляется по следующей формуле:

$$N_{от} = (n_a - 1) \cdot 2 + (n_b - 3) \cdot 2. \quad (7)$$

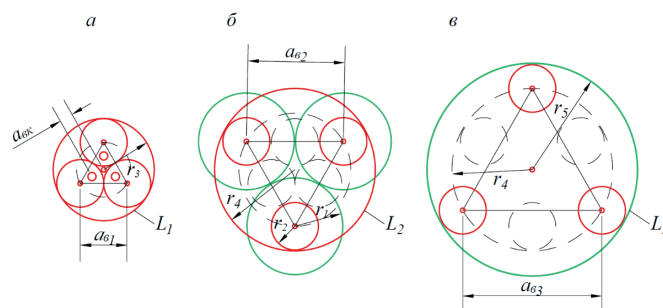
Масса заряда в шпуре:

$$Q = p_{ш} l, \quad (8)$$

где $p_{ш}$ – вместимость 1 пог. м шпура.

Для обеспечения требуемого качества взрыва в горной выработке возникает необходимость в создании некоторой

искусственной свободной поверхности внутри взрываемого слоя пород. Это достигается инициализацией врубовых зарядов в определенном порядке в начале взрывной отбойки. Шпуры, расположенные на окружности радиусами r_3 , r_4 , r_5 (рис. 3), называются врубовыми. Число шпуров на каждой окружности составляет три. Образованный взрывом этих зарядов цилиндрический объем пород мелкого дробления в горизонтальной выработке представляет собой цилиндрический вруб.



r_2 – радиус зоны мелкого дробления вокруг шпурового заряда, r_3 – радиус зоны трещинообразования вокруг шпурового заряда, r_4 – радиус зоны мелкого дробления первой группы (б), r_5 – то же второй группы врубовых шпуровых зарядов, L_1 , L_2 , L_3 – след виртуальной свободной поверхности цилиндрического вруба с радиусом соответственно r_3 , r_4 , r_5

Рис. 3. Основные размеры элементов цилиндрического вруба: а – первой, б – второй, в – третьей группы врубовых шпуров.

Сурет 3. Цилиндрлік кесу элементтерінің негізгі өлшемдері: а – бірінші, б – екінші, в – үшінші кесу саңылауларының тобы.

Figure 3. The main dimensions of the elements of a cylindrical cut: a – first, b – second, c – third group of cutting holes.

Аналитическое определение гранулометрического состава взорванной горной массы при шпуровой отбойке

Производительность горнотранспортного оборудования при проходке туннелей предопределяется качеством взорванных горных пород. Оно характеризуется кусковатостью пород и распределением кусков по размерам в развале, т. е. гранулометрическим составом взорванных пород.

Гранулометрический состав взорванных пород сильно зависит от физико-механических свойств пород в массиве, трещиноватости (блочности) массива пород, физико-химических характеристик применяемого ВВ, параметров расположения зарядов во взрываемом слое массива пород.

Далее рассмотрим методику расчета гранулометрического состава взорванных пород, учитывающего влияние радиусов трещинообразования и мелкого дробления.

Для врубовых зарядов, т. е. врубовой полости радиус зоны интенсивного дробления будет равен радиусу цилиндрического вруба, т. е. (см. рис. 3 б):

$$r_4 = r_3 + r_2, \quad (9)$$

где r_2 – радиус зоны мелкого дробления вокруг шпурового заряда;

r_3 – радиус зоны мелкого дробления во врубе, м.

Для двухрядного вруба:

$$r_3 = \frac{4}{\sqrt{3}} r_2 \approx 2,3 r_2. \quad (10)$$

Объем интенсивно раздробленной породы во врубовой полости:

$$V''_в(x_1) = \pi r_4^2 (h_3 + h_c), \quad (11)$$

где $V''_в(x_1)$ – объем пород первого (x_1) класса крупности в зоне интенсивного дробления врубовой полости;

h_3 – высота заряда;

h_c – высота интенсивно раздробленного слоя пород под колонкой заряда, равная радиусу зоны мелкого дробления.

Объем интенсивно раздробленной породы вокруг отбойных шпуров:

$$V''_{от}(x_1) = \pi r_1^2 (h_3 + h_c) N_{от}, \quad (12)$$

где $N_{от}$ – количество отбойных шпуров, шт.

Объем интенсивно раздробленной породы вокруг оконтуривающих шпуров:

$$V''_{ок}(x_1) = \pi r_1^2 (h_3 + h_c) N_{ок} - \frac{r_1^2}{2} (\beta - \sin \beta) (h_3 + h_c) (N_{ок} - N_y) - r_1^2 (\beta - \sin \beta) (h_3 + h_c) N_y, \quad (13)$$

где $N_{ок}$ – количество оконтуривающих шпуров, шт.;

N_y – количество оконтуривающих шпуров в углах сечения выработки;

$N_y = 4$ шт.;

β – угол сегмента зоны радиальных трещин оконтуривающей скважины, выходящей за контур сечения выработки;

$\beta = 2 \arccos(r_2 \cdot r_1)$, рад.

Весь объем интенсивно раздробленной породы (первого класса) в горизонтальной горной выработке при рациональном расположении шпуровых зарядов составит:

$$V''(x_1) = V''_в(x_1) + V''_{от}(x_1) + V''_{ок}(x_1). \quad (14)$$

При вычислении объема пород рассматриваемого класса крупности во всем взрываемом слое к нему необходимо присоединить соответствующие естественные отдельности, содержащиеся в остальной части взрываемого слоя. Таким образом, объем первого класса крупности во всей взорванной породе определяется по формуле:

$$V'(x_1) = V''(x_1) + p(x_1)[V - V''(x_1)], \quad (15)$$

где V – объем породы взрываемого слоя массива;

$V'(x_1)$ – весь объем породы 1-го класса после взрыва;

$p(x_1)$ – содержание отдельностей 1-го класса в массиве, в долях единицы.

Последующие классы пород по крупности (более 0,15 м) образуются вследствие расчленения пород взрывающегося блока на естественные отдельности во второй стадии взрыва и их дробления за счет соударения кусков пород при перемещении во второй и третьей стадиях взрыва [5, 7, 9, 10]. В целом перераспределение кусков пород массива во второй и третьей стадиях взрыва можно представить в виде [9, 10]:

$$\begin{aligned} q(x_1) &= p(x_1), \quad q(x_7) = \frac{1}{2} p(x_7), \\ q(x_2) &= p(x_2) + \frac{1}{6} p(x_3) + \frac{1}{10} p(x_4) + \\ &+ \frac{1}{12} p(x_5) + \frac{1}{12} p(x_6) + \frac{1}{10} p(x_7), \\ q(x_3) &= \frac{5}{6} p(x_3) + \frac{1}{10} p(x_4) + \frac{1}{12} p(x_5) + \\ &+ \frac{1}{12} p(x_6) + \frac{1}{10} p(x_7), \\ q(x_4) &= \frac{4}{5} p(x_4) + \frac{1}{12} p(x_5) + \\ &+ \frac{1}{12} p(x_6) + \frac{1}{10} p(x_7), \\ q(x_5) &= \frac{3}{4} p(x_5) + \frac{1}{12} p(x_6) + \frac{1}{10} p(x_7), \\ q(x_6) &= \frac{2}{3} p(x_6) + \frac{1}{10} p(x_7), \end{aligned} \quad (16)$$

здесь $p(x_1), p(x_2), \dots, p(x_7)$ – реальное содержание кусков 1, 2, ..., 7-го классов в массиве, в процентах;

$q(x_1), q(x_2), \dots, q(x_7)$ – перераспределенное содержание отдельностей 1, 2, ..., 7-го классов в массиве, в процентах.

Зависимости (16) можно назвать виртуальным содержанием естественных отдельностей в массиве пород. Численные значения содержания реальных и виртуальных отдельностей приведены в таблице 1.

Согласно принятой концепции, объемы раздробленных пород всех классов прямо пропорциональны произведению их виртуального содержания в массиве на разность объемов взрывающегося слоя и интенсивно раздробленной породы. Иначе говоря, для объемов искоемых классов ($i \geq 2$) имеем:

$$V'(x_i) = q(x_i)[V - V''(x_1)], \quad (17)$$

где $V''(x_i)$ – объем интенсивно раздробленной породы i -го класса ($i \geq 2$);

$V'(x_i)$ – весь объем породы i -го класса после взрыва;

$q(x_i)$ – виртуальное содержание отдельностей i -го класса в массиве, в долях единицы.

Для того чтобы вычислить гранулометрический состав взорванной породы, достаточно разделить полученные объемы (15) и (17) на объем отбиваемого слоя [10]. Тогда содержание отдельных фракций в объеме взрывающегося слоя устанавливается соотношением:

Таблица 2

Расчетный гранулометрический состав взорванной горной массы, в подготовительной выработке, скарнированный известняк

Кесте 2

Жарылған тау-кен массасының есептелген гранулометриялық құрамы, дайындық кенжары, скарнирленген әктас

Table 2

The calculated particle size composition of the blasted rock mass, in the preparatory mine, rounded limestone

Классы массивов по блочности	Массивы по блочности	Содержание во взорванной массе (%) кусков размером (м)						
		< 0,15	0,16–0,30	0,31–0,45	0,46–0,60	0,61–0,75	0,76–0,90	> 0,91
I	Мелкоблочные	88,26	5,68	1,44	0,42	0,11	0,03	0,01
II	Среднеблочные	79,16	7,62	4,95	3,21	2,08	1,35	0,88
III	Крупноблочные	72,66	5,09	4,95	4,81	4,67	4,54	4,41
IV	Весьма крупноблочные	69,61	2,77	3,51	4,45	5,64	7,15	9,06

$$p'(x_j) = \frac{V'(x_j)}{V}, \quad (18)$$

где $p'(x_j)$ – содержание j -й фракции во взорванной горной массе, в процентах.

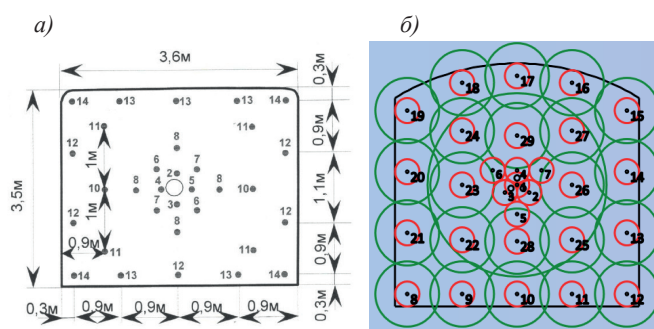
Система значений $p'(x_j)$, как известно, представляет собой гранулометрический состав взорванной горной массы. Таким образом, по выражению (18) при заданных физико-механических, структурных свойствах пород, детонационных, энергетических характеристиках ВВ, параметрах и способе взрывания гранулометрический состав взрывающейся руды и породы рассчитывается заблаговременно.

Разработанный теоретический подход к определению гранулометрического состава взорванных горных пород базируется на действительном механизме разрушения реального массива пород взрывом цилиндрического заряда и этим принципиально отличается от известных в литературе [1–10].

Как видно из выражений (17), гранулометрический состав взорванных горных пород сильно зависит от содержания естественных отдельностей в массиве пород. Поэтому установление классов блочности массивов пород или категорий взрываемости пород на рудниках является исключительно важной задачей.

На основе разработанных аналитических методов определения технологических характеристик взорванной горной массы была создана система автоматизированного проектирования рациональных параметров буровзрывных работ и прогнозирования их результатов «KAZBLAST UNDER» в среде Microsoft Visual Studio 2022. С применением данной программы был составлен паспорт БВР для рудников месторождения Акжал. Физико-механические свойства пород и характеристики ВВ: порода «Скарнированный известняк», плотность породы $\rho = 2840 \text{ кг/м}^3$, скорость звука в породе $c = 4250 \text{ м/с}$, $\sigma_{сж} = 210 \text{ МПа}$, $\sigma_p = 19 \text{ МПа}$, $\nu = 0,30$, $\rho_{вв} = 1000 \text{ кг/м}^3$, $D = 3500 \text{ м/с}$. Сечение выработки $12,02 \text{ м}^2$ с шириной $3,6 \text{ м}$ и высотой $3,5 \text{ м}$. Схемы размещения шпуров по утвержденному Паспорту БВР и по разработанной программе показаны на рис. 4.

Расчетные параметры и результаты БВР приведены в таблицах 2–3.



а) согласно утвержденному паспорту БВР;
б) по разработанной программе

Рис. 4. Схемы расположения шпуровых зарядов в горизонтальной подготовительной выработках.
Сурет 4. Көлденең дайындық кенжарының жарылыс шпур зарядтарының схемасы.
Figure 4. Layout of blasthole charges in horizontal development workings.

Результаты проведенных опытных взрывов и сравнение с расчетными параметрами доказывают пригодность предложенного метода рационального расположения шпуровых зарядов ВВ в горизонтальной подземной подготовительной выработке. Так возможно достичь снижения количество шпуров с 32 шт. до 29 шт. в проходке сечением $12,02 \text{ м}^2$. А также с новым подходом к расчету параметров БВР снижается использование ВВ на шпур, как итог снижается общее количество ВВ. Это позволяет снизить удельный расход до 40%. Увеличение количества компенсационных скважин с 2 до 3-х позволяет компенсировать уменьшение количества врубковых шпуров.

Полученные расчетные ГС взорванной горной массы для массивов пород различной блочности указывает на идентичность ГС при типовом и предлагаемом паспорте БВР. Данный факт позволяет утверждать на правомерность нового подхода к определению гранулометриче-

Таблица 3

Результаты опытных БВР по утвержденному Паспорту БВР и автоматизированного расчета параметров БВР

Кесте 3

Бекітілген БЖЖ паспортты және БЖЖ параметрлерін автоматтандырылған есептеу бойынша тәжірибелік БЖЖ нәтижелері

Table 3

The results of experimental D&B according to the approved D&B passport and automated calculation of D&B parameters

Параметры БВР	1	2
Прочностная характеристика породы, МПа	830,21	
Начальное давление ПВ, МПа	1531	
Относительный предельный радиус полости	1,17	
Радиус шпура, м	0,0225	
Предельный радиус полости, м	0,03	
Радиус зоны мелкого дробления, м	0,18	
Радиус зоны радиальных трещин, м	0,47	
Количество шпуров, шт	32	29
Количество скважин (76 мм), шт	2	3
Количество врубовых шпуров, шт	12	7
Расстояние между центральным врубовым шпуром и компенсационными скважинами, м	0,15	0,11
Расстояние от центрального врубового шпура до первой группы врубовых шпуров, м	0,3	0,21
Расстояние от центрального врубового шпура до второй группы врубовых шпуров, м	0,63	0,42
Расстояние от центрального врубового шпура до третьей группы врубовых шпуров, м	0,9	0,61
Длина перебура врубовых шпура, м	0,28	0,18
Глубина врубовых шпуров и к. с., м	2,8	2,7
Длина заряда во врубовых шпурах, м	1,93	1,77
Количество отбойных шпуров, м	6	8
Расстояние между отбойными шпурами, м	1,0	0,93
Длина перебура отбойных шпуров, м	0,28	0,18
Глубина отбойных шпуров, м	2,8	2,7
Длина заряда в отбойных шпурах, м	1,93	1,77
Количество оконтуривающих шпуров, м	14	14
Расстояние между оконтуривающими шпурами, м	0,9–1,1	0,93
Длина перебура оконтуривающих шпуров, м	0,28	0,18
Длина заряда в оконтуривающих шпурах, м	1,93	1,77
Угол наклона оконтуривающих шпуров, град	5	3,89
Объем бурения, м	89,6	84,05
Длина недозаряда шпуров, м	0,2–1,0	0,93
Вместимость 1-го погонного метра шпура, кг	1,59	
Всего ВВ на цикл, кг	132,8	87,34
Гранулированное ВВ, кг	126,4	81,54
врубовые, отбойные и оконтуривающие – 5,08 кг на один шпур	126,4	81,54
патронированное ВВ, кг	6,4	5,8
Количество НЭСИ на забой, шт	32	29
Время замедления, мс	25	100
Объем отбойки, м ³	28,3	30,29
Выход горной массы с одного шпура м ³ /м	0,32	0,36
Удельный расход ВВ, кг/м ³	4,46	2,88
Площадь забоя на один шпур, м ²	0,39	0,41

Примечание: типовые (1) и расчетные (2) параметры БВР

ского состава взорванных пород шпуровыми зарядами в горизонтальных подземных выработках и рациональных параметров БВР согласно предложенной методике.

Заключение

В результате проведенных исследований:

1. Разработан аналитический метод определения рациональных параметров БВР в забоях горизонтальных подземных проходческих выработках.

2. Разработан аналитический метод определения гранулометрического состава взорванной горной массы при шпуровой отбойке в подземных горизонтальных проходческих выработках. Он базируется на учете размеров зон интенсивного дробления пород вокруг шпуровых зарядов и виртуального содержания естественных отдельностей в массиве пород, сформированного в результате соударения кусков пород при перемещении во второй и третьей стадиях развития взрыва. Установлены закономерности формирования виртуального содержания естественных отдельностей.

3. На основе описанных методов определения рационального расположения зарядов ВВ и гранулометрическо-

го состава взорванной горной массы при шпуровой отбойке в подземных горизонтальных проходческих выработках разработана компьютерная программа автоматизированного проектирования параметров и результатов БВР в подземных горизонтальных выработках KAZBLAST UNDER.

4. Полученные расчетные параметры БВР указывают на возможность снижения издержек при проведении БВР по сравнению с типовым паспортом и проведенными опытными взрывами. В результате можно достичь уменьшения удельного расхода ВВ, снижения объема бурения без снижения качества взорванной горной массы согласно расчету результатов БВР по программе KAZBLAST UNDER.

Благодарность

Статья подготовлена в рамках программно-целевого финансирования Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан 2023/BR21881939 «Разработка ресурсосберегающих энергогенерирующих технологий для горно-металлургического комплекса и создание инновационного инженерингового центра».

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Дремин А.В., Великанов В.С. К вопросу о гранулометрическом составе взорванных скальных пород // Горная промышленность. 2023. № 4. С. 73–78 (на русском языке)
2. Симонов П.С. Особенности определения размера среднего куска и выхода негабарита при взрывных работах на карьерах // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017. № 4. С. 320–327 (на русском языке)
3. Жулио де К.С., Андревити да К.С., Суэлен С.Р. Анализ прогноза взрывных пород и результатов фрагментации горных пород с использованием программного обеспечения с разделенным рабочим столом // Технологии в металлургии, материалопроизводстве и горнодобывающей промышленности. 2018. № 15 (1). С. 22–30 (на английском языке)
4. Анализ дробления с использованием цифровой обработки изображений и эмпирической модели (Kiz-Ram): сравнительное исследование / Саадун А. [и др.] // Записки Горного института. 2022. Т. 257. С. 822–832 (на английском языке)
5. Компьютерное проектирование рациональных параметров расположения зарядов взрывных скважин в горизонтальной подземной выработке / Ракишев Б.Р. [и др.] // Горные технологии: труды учреждений горного дела и металлургии. 2022. № 131 (1). С. 25–37 (на английском языке)
6. Обоснование геометрии среза цилиндрического входа в подземной шахтной галерее / Ракишев Б.Р. [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. № 12. С. 31–46 (на русском языке)
7. Ракишев Б.Р. Формирование гранулометрического состава взорванных пород при уступной отбойке // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2020. № 1. С. 41–53 (на русском языке)
8. Салми Е.Ф., Селлерс Э.Дж. Обзор методов учета геологических и геотехнических характеристик массивов горных пород при оценке взрывоспособности для проектирования селективных взрывных работ // Инженерная геология. 2021. № 281. С. 1–37 (на английском языке)
9. Гранулометрический состав взорванных пород при проходке тоннелей и его автоматическое определение / Ракишев Б.Р. [и др.] // Тоннелестроение и технологии подземного космоса. 2024. № 148. С. 105773 (на английском языке)
10. Ракишев Б.Р. Автоматизированное проектирование и производство массовых взрывов на карьерах: Алматы: Гылым, 2016. 340 с. (на русском языке)

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Дремин А.В., Великанов В.С. Жарылған тау жыныстарының гранулометриялық құрамы туралы сұрақ // Тау-кен өнеркәсібі. 2023. № 4. Б. 73–78 (орыс тілінде)
2. Симонов П.С. Карьерлердегі жарылыс операциялары кезінде орташа бөлшектің мөлшерін және шамадан тыс өнімділікті анықтау ерекшеліктері // Тау-кен ақпараттық-талдау бюллетені. 2017. № 4. Б. 320–327 (орыс тілінде)

3. Жулио де К.С., Андревити да К.С., Суэлен С.Р. Бөлінген жұмыс үстелі бағдарламалық құралын пайдалана отырып, жарылыс ұңғымаларын болжау және тау жыныстарының фрагментация нәтижелерін талдау // *Металлургиядағы, материалдар өндірісіндегі және тау-кен өндірісіндегі технологиялар*. 2018. № 15 (1). Б. 22–30 (ағылшын тілінде)
4. Сандық кескінді өңдеу және эмпирикалық модель (KuzRam) көмегімен фрагментация талдауы. Салыстырмалы зерттеу / Саадун А. [және т. б.] // *Тау-кен институтының журналы*. 2022. Т. 257. Б. 822–832 (ағылшын тілінде)
5. Көлденең жер асты игеруде жарылыс зарядтарын орналастырудың рационалды параметрлерін компьютердің көмегімен жобалау / Ракишев Б.Р. [және т. б.] // *Тау-кен өндіру технологиясы: тау-кен металлургия институттарының операциялары*. 2022. № 131 (1). Б. 25–37 (ағылшын тілінде)
6. Көлденең жер асты шахтасындағы цилиндрлік кесудің параметрлерін негіздеу / Ракишев Б.Р. [және т. б.] // *Тау-кен ақпараттық-талдау бюллетені*. 2021. (12). Б. 31–46 (орыс тілінде)
7. Ракишев Б.Р. Стендтің сынуы кезінде жарылыс тау жыныстарының гранулометриялық құрамын қалыптастыру // *Минералды ресурстарды игерудің физикалық-техникалық мәселелері*. 2020. № 1. Б. 41–53 (орыс тілінде)
8. Салми Е.Ф., Селлерс Э.Дж. Таңдамалы жарылысты жобалау үшін жарылыс қабілеттілігін бағалауда тау жыныстарының геологиялық және геотехникалық сипаттамаларын енгізу әдістеріне шолу // *Инженерлік геология*. 2021. № 281. Б. 1–37 (ағылшын тілінде)
9. Туннельді айдау кезіндегі жарылған тау жыныстарының бөлшектер мөлшерінің құрамы және оны автоматтандырылған анықтау / Ракишев Б.Р. [және т. б.] // *Туннельдеу және жерасты ғарыштық технологиясы*. 2024. № 148. Б. 105773 (ағылшын тілінде)
10. Ракишев Б.Р. Карьерлердегі жаппай жарылыстарды компьютерлік жобалау және өндіру: Алматы: Ғылым, 2016. 340 б. (орыс тілінде)

REFERENCES

1. Dremine A.V., Velikanov V.S. K voprosu o granulometricheskom sostave vzorvannykh skal'nykh porod [Setting a multi-criteria problem to analyze and forecast particle size distribution of blasted rock], *Gornaya promyshlennost'* [Mining Industry]. 2023. No. 4. 73–78 pp. (in Russian)
2. Simonov P.S. Osobennosti opredeleniya razmera srednego kuska i vykhoda negabarita pri vzryvnykh rabotakh na kar'erakh [Features of determining average dimension and yield of oversizes under blasting in open pit mines], *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'* [Mining informational and analytical bulletin]. 2017. No. 4. 320–327 pp. (in Russian)
3. Julio de C.S., Andreviti da C.S., Suellen S.R. Analysis of the forecast of explosive rocks and the results of rock fragmentation using software with a split desktop // *Technologies in metallurgy, material production and mining industry*. 2018. No. 15 (1). 22–30 pp. (in English)
4. Fragmentation analysis using digital image processing and an empirical model (KuzRam): A comparative study / Saadoun A. [et al.] // *Journal of Mining Institute*. 2022. V. 257. 822–832 pp. (in English)
5. Computer-aided design of rational parameters for the location of blasthole charges in horizontal underground development / Rakishev B.R. [et al.] // *Mining Technology. Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy*. 2022. No. 131 (1). 25–37 pp. (in English)
6. Obosnovanie geometrii sreza tsilindricheskogo vkhoda v podzemnoi shakhtnoi galeree [Justification of cylindrical entry cut geometry in underground mine gallery, Substantiation of the parameters of a cylindrical cut in a horizontal underground mine], Rakishev B.R. [et al.], *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'* [Mining Informational and Analytical Bulletin]. 2021. No. 12. 31–46 pp. (in Russian)
7. Rakishev B.R. Formirovanie granulometricheskogo sostava vzorvannykh porod pri ustupnoi otboike [Formation of the granulometric composition of blasted rocks during bench breakage], *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh* [Physical and Technical Problems of Mineral Resource Development]. 2020. No. 1. 41–53 pp. (in Russian)
8. Salmi E.F., Sellers E.J. A review of the methods to incorporate the geological and geotechnical characteristics of rock masses in blastability assessments for selective blast design // *Engineering Geology*. 2021. No. 281. 1–37 pp. (in English)
9. Particle size composition of blasted rocks in tunnel driving and its automated determination / Rakishev B.R. [et al.] // *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2024. No. 148. 105773 p. (in English)
10. Rakishev B.R. Avtomatizirovannoe proektirovanie i proizvodstvo massovykh vzryvov na kar'erakh [Computer-aided design and production of mass explosions in quarries], *Almaty: Gylym*, 2016. 340 p. (in Russian)

Сведения об авторах:

Ракишев Б.Р., академик НАН РК, докт. техн. наук., профессор кафедры «Горное дело» НАО «Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева» (г. Алматы, Казахстан), b.rakishev@satbayev.university; <https://orcid.org/0000-0001-5445-070X>

Орынбай А.А., Ph.D, ВНС кафедры «Горное дело» НАО «Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева» (г. Алматы, Казахстан), a.orynbay@au.kz; <https://orcid.org/0000-0002-3720-7625>

Алибаев А.Е., МНС кафедры «Горное дело», НАО «Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева» (г. Алматы, Казахстан), azamatalibaev@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-6747-6148>

Ибырханов Т.С., докторант, МНС кафедры «Горное дело», НАО «Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева» (г. Алматы, Казахстан), ibir.tem@mail.ru; <https://orcid.org/0009-0001-6344-8270>

Авторлар туралы мәліметтер:

Ракишев Б.Р., академик НАН РК, техника ғылымдарының докторы, НАО «Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті» «Тау-кен ісі» кафедрасының профессоры (Алматы қ., Қазақстан)

Орынбай А.А., Ph.D, «Тау-кен ісі» кафедрасының ЖФҚ, КеАҚ «Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті» (Алматы қ., Қазақстан)

Алибаев А.Е., «Тау-кен ісі» кафедрасының КФҚ, докторанты, КеАҚ «Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті» (Алматы қ., Қазақстан)

Ибырханов Т.С., «Тау-кен ісі» кафедрасының КФҚ, докторанты, КеАҚ «Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті» (Алматы қ., Қазақстан)

Information about the authors:

Rakishev B.R., Academician of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Mining Department of the NJSC «Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpaev» (Almaty, Kazakhstan)

Orynbay A.A., Ph.D, LR of the Mining Department of the NJSC «Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpaev» (Almaty, Kazakhstan)

Alibayev A.Ye., JR, doctoral student of the Mining Department of the NJSC «Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpaev» (Almaty, Kazakhstan)

Ibyrkhanov T.S., JR, doctoral student of the Mining Department of the NJSC «Kazakh National Research Technical University named after K.I. Satpaev» (Almaty, Kazakhstan)



26-я Китайская международная выставка нефтегазового и нефтехимического оборудования и технологий

26-28 марта, 2026

Китайский Международный Выставочный Центр (Зал Шуньши), Пекин

81

Стран и регионов

180,000+

Профессиональных посетителей

2,000+

Экспонентов

52

из Fortune Global 500

18

Международных павильонов

120,000m²

Выставочной площади

Среди участников выставки



Zhenwei International Exhibition Group, Beijing Zhenwei Exhibition Co., Ltd.

Адрес: Zhenwei Exhibition Building, Building III13, International Enterprise Avenue,

Yard 1, Jinghai 5th Road, Tongzhou District, Beijing

Тел: +86 10 5617 6968/6962

Факс: +86 10 5617 6998

Почта: cipre@zhenweexpo.com



Регистрация посетителей



WhatsApp

f cippezw

ⓧ cippe_zw

in cippe China