



Научная статья

Анализ дробления с использованием цифровой обработки изображений и эмпирической модели (KuzRam): сравнительное исследование

А.СААДУН^{1,2}, М.ФРЕДЖ^{1,2}✉, Р.БУКАРМ^{1,3}, Р.ХАДЖИ⁴¹ Университет Абдеррахмана Мира, Беджайя, Алжир² Университет Аннабы, Аннаба, Алжир³ Университет Беджайя, Беджайя, Алжир⁴ Университет Ферхата Аббаса, Сетиф, Алжир

Как цитировать эту статью: Саадун А., Фредж М., Букарм Р., Хаджи Р. Анализ дробления с использованием цифровой обработки изображений и эмпирической модели (KuzRam): сравнительное исследование // Записки Горного института. 2022. Т. 257. С. 822-832. DOI: 10.31897/PMI.2022.84

Аннотация. Дробление горной породы отражает степень контроля взрывных работ. Несмотря на точность скринингового анализа для определения распределения взорванных горных пород по размерам, этот метод остается сложным и длительным из-за большого объема взорванной породы. Метод цифровой обработки изображений может преодолеть ограничения точности и скорости. Используются эмпирическая модель KuzRam и численный метод (цифровая обработка изображений) с применением двух программ обработки изображений (WipFrag и Split-Desktop) для анализа распределения частиц по размерам пород, раздробленных взрывчатыми веществами в известняковом карьере Джебель-Меджунес. Цифровая обработка основана на анализе фотографии отвалов взорванной породы с использованием методов обработки изображений. Цель этой работы состоит в оценке и сравнении результатов, полученных для каждого взрыва с помощью двух методов, и выявления сходства и различия между ними. С помощью этих двух методов были проанализированы три различных взрыва с одинаковым проектированием. Результат модели KuzRam дал идеалистические результаты из-за неоднородности структуры горных пород, хотя эта модель может быть использована для первоначальной оценки проектирования взрыва. С целью повышения эффективности взрыва предложен новый коэффициент показателя фрагментации для сравнения полученного фрагмента с расчетным идеальным размером модели KuzRam путем учета проектных параметров взрыва и взрываемости. Оба способа обработки изображений дают близкие результаты с большей точностью для Split-Desktop. Применение метода поможет повысить эффективность и снизить затраты на дробление в рассматриваемом карьере.

Ключевые слова: взрывные работы; дробление породы; известняковый карьер; модель KuzRam; Split-Desktop; WipFrag; показатель фрагментации

Поступила: 05.07.2021

Принята: 21.07.2022

Онлайн: 01.11.2022

Опубликована: 10.11.2022

Введение. Процесс добычи полезных ископаемых открытым способом составляют несколько основных операций, такие как бурение, взрывные работы, погрузка, транспортировка и дробление [1, 2]. В качестве первичной операции буровзрывные работы оказывают значительное влияние на производительность и стоимость последующих этапов [3, 4]. Роль взрывных работ заключается в достижении оптимального дробления породы, что повышает эффективность дробления и позволяет экономить энергию [5, 6]. Размер взрываемой породы оптимизируется до геометрических размеров, не превышающих размер приемной впускной щели при первичном дроблении [7].

Дробление горных пород взрывом зависит главным образом от проектных параметров взрыва и свойств горной массы [8, 9]. Степень неоднородности горных пород приводит к различному распределению по размерам в развале взорванной горной массы. Контроль за этим распределением по размерам влияет на экономический результат добычи полезных ископаемых [10-13]. Дробление породы взрывчатыми веществами должно регулярно контролироваться, измеряться, анализироваться, проектироваться, планироваться и соответствующим образом модифицироваться для достижения эффективности процессов добычи полезных ископаемых [14, 15].

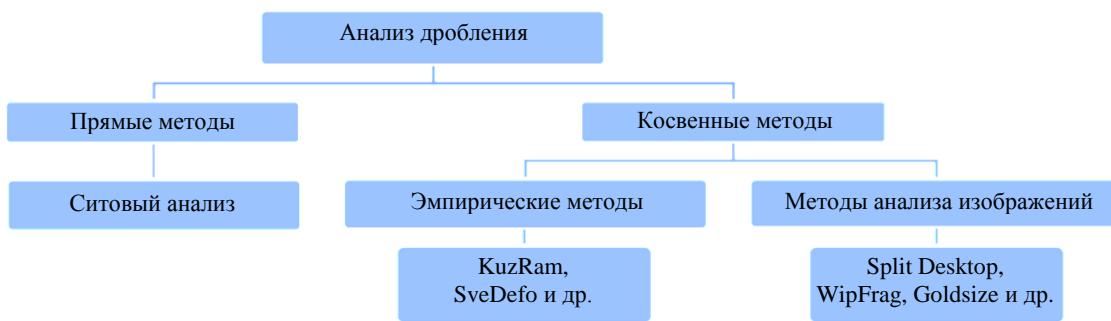


Рис.1. Блок-схема методов анализа дробления

Эффективность взрыва может быть оценена путем определения распределения фрагментации взрывной породы. Существует множество методов оценки распределения фрагментации взорванных горных пород [16], включая неконтролируемые методы, основанные на физико-механических свойствах горных пород, и контролируемые методы, зависящие от проектных факторов, таких как оценка распределения по размерам и прогнозирование раздробленных горных пород [17]. Контролируемые методы можно разделить на прямые и косвенные, как показано на рис.1. Прямым методом, который является более надежным для определения распределения раздробленных пород, является ситовый анализ. Хотя точность этого метода очень высока, сложность заключается главным образом в том, что для получения подходящего распределения раздробленных пород требуется больше времени и материальных затрат. Тем не менее, метод ситового анализа может быть частично использован и при некоторых экспериментальных взрывах малого объема [18, 19]. Косвенные же методы, включая эмпирические и методы анализа изображений, обеспечивают компромисс между точностью теста и количеством затраченного времени.

В некоторых эмпирических моделях, таких как уравнение Ларссона, формула SveDeFo, модель KuzRam и др., параметры взрывных работ рассматриваются для оценки распределения взорванной породы по размерам перед проведением взрывных работ [20]. Поэтому другим методом стало использование программ обработки изображений, которые были разработаны и позволили быстро и точно оценить распределение фрагментации [21, 22]. Некоторые из этих систем включают IPACS, Tucips, FragScan, CIAS, Gold Size, WipFrag, Split, Power Sieve и Fragalyst [23-25]. Системы Split-Desktop, WipFrag, FragScan и GoldSize являются наиболее популярными программными пакетами, основанными на обработке 2D-изображений для выполнения анализа распределения по размерам пород взрывного блока. В методе анализа изображений распределение раздробленных пород может быть точно определено с использованием изображений, полученных после взрывных работ.

Исследователи постоянно совершенствуют модели дробления горных пород взрывчатыми веществами, чтобы сравнить и проанализировать прогнозируемое распределение с полученным дроблением [26]. Общепризнана взаимосвязь между различными уровнями точности, скорости, эффективности и оптимизации эмпирических моделей, методов анализа изображений и численных моделей [27, 28].

Из-за ограничений результатов косвенных методов анализа несколько исследователей провели испытания, связанные с анализом размера кусков во взорванном развале горных пород [29, 30]. Для прогнозирования распределения кусков по размерам в развале взорванной горной массы были разработаны различные эмпирические и численные модели [31-33].

Цель данной работы – оценить и сравнить результаты, полученные для различных взрывов с помощью двух методов, и обсудить их сходства и различия.

Общие параметры. Цементная компания «Айн-Эль-Кебира» (SCAEK) (провинция Сетиф) является одним из наиболее важных цементных промышленных предприятий в Алжире. SCAEK расположена на северо-востоке Алжира на $36^{\circ}20'$ северной широты, $5^{\circ}27'$ восточной долготы и 1040 м над уровнем моря в 20 км к северо-востоку от города Сетиф (рис.2) [34]. Одним из основных факторов успеха этой компании является использование высококачественного и дешевого сырья, которое доступно в близлежащих регионах [35]. Этот сырье поставляется с месторождения

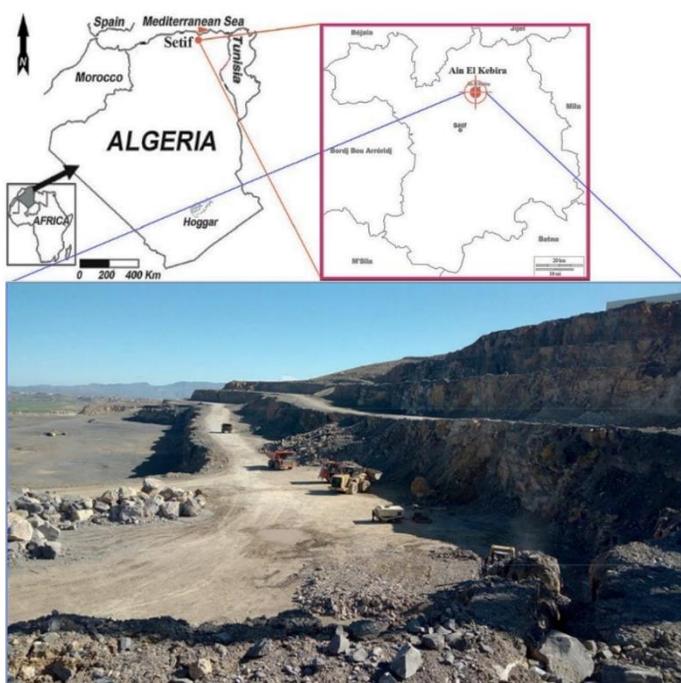


Рис.2. Известняковый карьер Джебель-Меджунес, Айн-Эль-Кебира, Сетиф

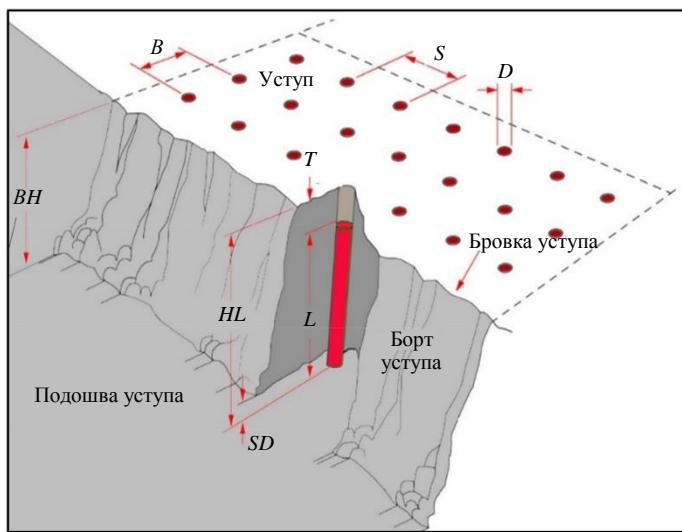


Рис.3. Проектные параметры взрыва в известняковом карьере Джебель-Меджунес

появлению нескольких косвенных методов оценки распределения по размерам

Анализ распределения частиц по размерам раздробленных пород в карьере Джебель-Меджунес проводится посредством эмпирической модели KuzRam и численного метода с помощью двух программ обработки изображений (WipFrag и Split-Desktop), как показано на рис.4.

Модель дробления KuzRam была получена Каннингемом (1983, 1987) на основе уравнений Розина – Раммлера (1933) и Кузнецова (1973) для расчета среднего размера и индекса однородности. Эта модель представляет собой эмпирическую зависимость, которая оценивает дробление взрыва путем учета проектных параметров и геометрии взрыва, характеристик взрывчатого вещества, количества используемого взрывчатого вещества и взываемости [41-43]. Параметры модели KuzRam:

Джебель-Меджунес, расположенного рядом с заводом. Это месторождение характеризуется очень выраженным рельефом, простирается более чем на 15 км с востока на запад, средней ширины в 7 км, достигает высоты 1461 м на пике. Известняковая порода среднетвердая, верхняя часть известняковой залежи сильно трещиновата, что создает проблемы засорения скважин при бурении и ухудшает качество развода, прочность пород на сжатие составляет 87 МПа, плотность 2,6 т/м³ [36].

Добыча известняка осуществляется пятью уступами буровзрывным методом. Карьер работает с уступами высотой 15 м и углом наклона 82°. Скважины, пройденные с применением ударного бурения, имеют диаметр 110 мм. В каждую скважину заряжается 79,15 кг мармита и приблизительно 45 кг ANFO, при этом общее количество взрывчатого вещества Q в скважине равно 124,15 кг при плотности заряда взрывчатого вещества K . Взрывные скважины расположены в шахматном порядке в три ряда. Проектные параметры взрыва представлены на рис.3, расчетные параметры: высота уступа BH – 15 м; линия наименьшего сопротивления при взрывах B – 4 м; расстояние S – 4 м; диаметр скважины D – 110 мм; перебор – 1,65 м; глубина забойки T – 2,70 м; длина забойки L – 14,1 м; длина скважины HL – 16,8 м; общее количество взрывчатого вещества Q – 124,15 кг; плотность заряда K – 0,48 кг/м³.

Материалы и методы. Необходимо постоянно контролировать, измерять, анализировать фрагментацию при взрыве и обновлять расчеты. В традиционных методах использовался ситовый анализ [37]. Стоимость этого метода привела к



- фрагменты среднего размера, м: $X_{50} = A [PF]^{-0,8} Me^{0,167} \left(\frac{115}{RWS_{ANFO}} \right)^{0,633}$;
- кривая распределения по размерам: $R(X) = 1 - e^{-\left(\frac{X}{X_c}\right)^n}$;
- индекс однородности: $n = \left(2,2 - 14 \frac{B}{D} \right) \left(\frac{1 + \left(\frac{S}{B} \right)^{0,5}}{2} \right) \left(1 - \frac{E_p}{B} \right) \left(\frac{L}{BH} \right)$,

где A – характеристика горных пород по взрываемости; PF – удельный расход, кг/м³; Me – масса заряда на скважину, кг; RWS_{ANFO} – удельный вес взрывчатого вещества к ANFO, %; E_p – отклонение скважины.

Программное обеспечение Split-Desktop – это программа для цифровой обработки изображений, результат нескольких лет исследований и разработок Университета Аризоны в 90-х годах. Существуют две версии этой программы, первая – автоматическая и непрерывная обработка, которая используется на конвейерной ленте, а вторая – программное обеспечение Split-Desktop, которое относится к автономной пользовательской версии программ Split, которые могут работать с сохраненными изображениями. Цифровые изображения могут быть получены с помощью цифровой камеры высокого разрешения. Как только изображения сделаны, они сохраняются на диске.

Программа для анализа изображений WipFrag использует метод анализа изображений раздробленной породы для прогнозирования распределения частиц по размерам в развале добытой породы. Она была разработана компанией Wipware Inc (Канада) [40]. Обрабатываются изображения из различных источников, таких как видеокамеры, стационарные камеры, фотографии или цифровые файлы. Более того, он использует автоматические алгоритмы для идентификации отдельных блоков и создания контурной сети. Изображения развала получаются в полевых условиях, соединяются с масштабирующим устройством для определения истинного размера. Отснятый развал загружается в систему WipFrag. Изображение разрушенных горных пород преобразуется в карту или сеть элементов, модифицируется в объемы и веса, а результаты отображаются в виде графиков. Надежность и скорость обнаружения контуров фрагментов позволяют осуществлять полностью автоматический удаленный мониторинг со скоростью в несколько секунд на изображение [24].

Чтобы реализовать распределение взрывных работ по размерам, были проведены три взрыва в разных зонах и с одинаковыми проектными параметрами взрывных работ. Первый взрыв был произведен в верхней части месторождения, где структура массива сильно нарушена. Другие взрывы (взрыв 2, взрыв 3) осуществлялись в нижней части месторождения, которая отличается высоким качеством породы. Были собраны данные по трем различным операциям взрывных работ, включающие линию наименьшего сопротивления при взрывании, расстояние между скважинами, удельный расход взрывчатого вещества, диаметр скважины, высоту уступа, длину скважины и глубину забойки. Кроме того, в лаборатории на основе стандартов Международного общества механики горных пород (ISRM) были измерены геомеханические свойства горных пород, такие как прочность при одноосновном сжатии, плотность и модуль Юнга.

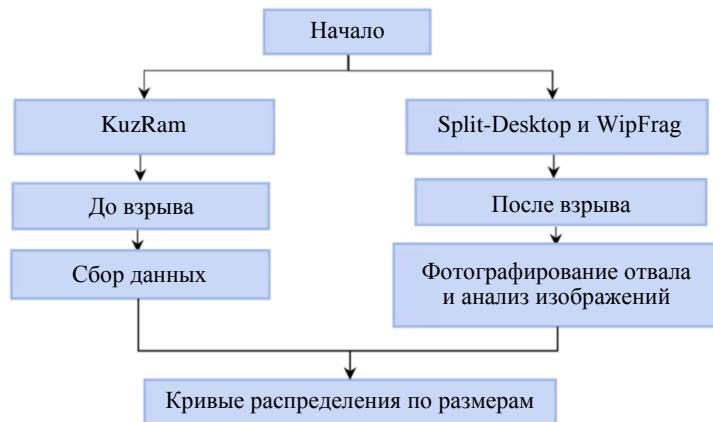


Рис.4. Этапы анализа дробления

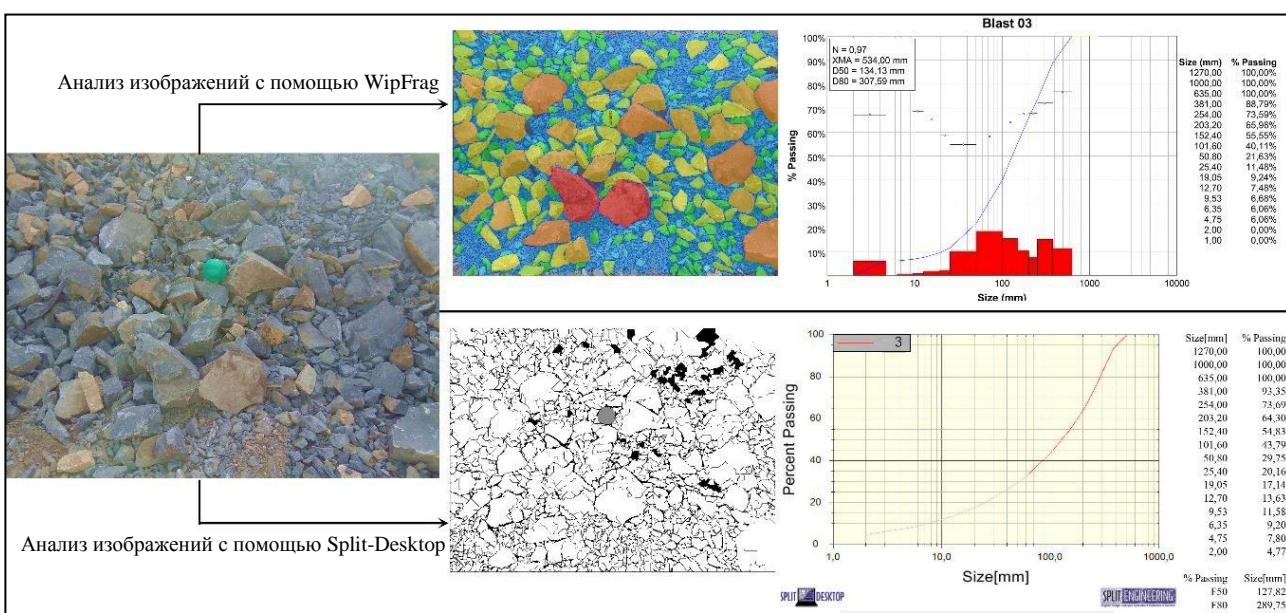


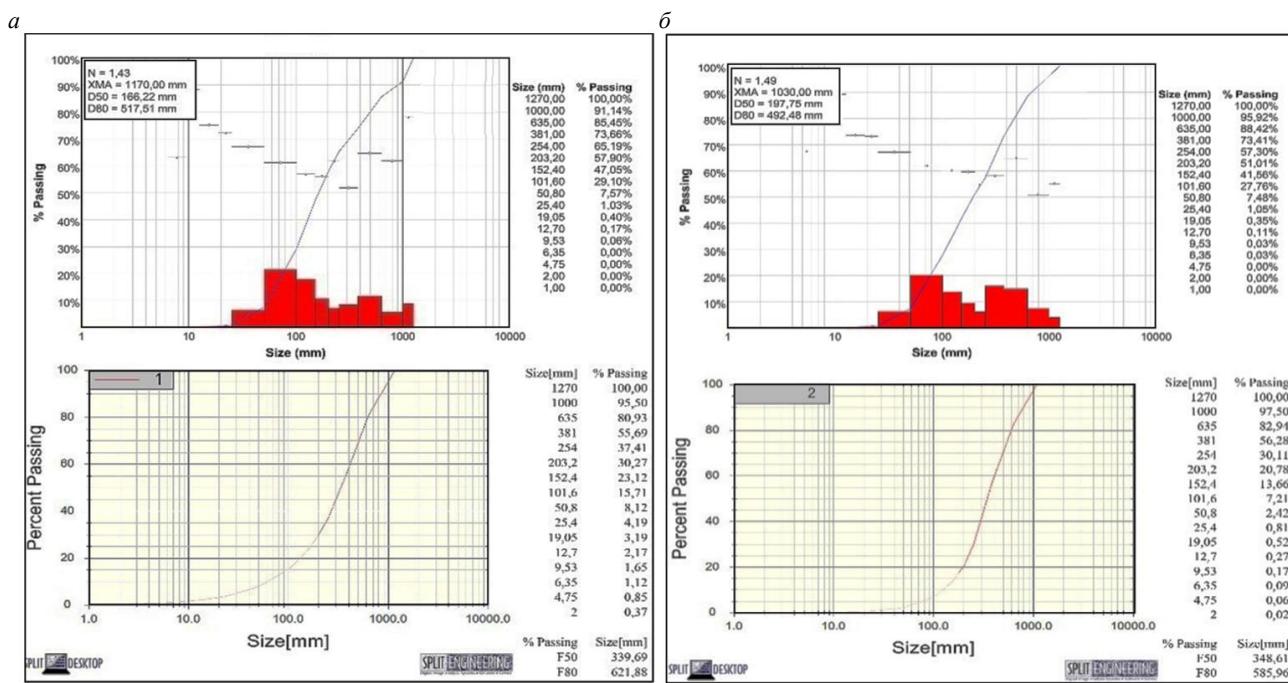
Рис.5. Основные этапы анализа обработки изображений

Проектные параметры взрыва были получены и оценены в качестве входных данных для модели KuzRam (рабочий лист Excel). Сравнивался проходной процент X_{50} для взорванной породы размером 1000 мм с учетом, что первичная дробилка, установленная в карьере, предназначена для дробления породы размером менее 1000 мм и производит продукт мелкого помола размером 152,4 мм.

Анализ обработки изображений выполнен с помощью нескольких фотографий раздробленной массы развалов в три этапа (после взрыва, на одной трети и двух третях загрузки погрузчиком) и последующей выгрузки в компьютер для анализа WipFrag и Split-Desktop. Это программное обеспечение использует изображения, снятые с объектом масштабирования (шара), который используется в качестве инструмента для выявления истинного размера (рис.5). Фотографии были сделаны случайным образом с учетом различий в размерах и определения масштаба. На следующем этапе несколько случайно выбранных фотографий были отобраны в качестве входных данных для программного обеспечения двухпроцессорной обработки. После масштабирования в течение нескольких секунд или минут программа автоматически определяет границы изображений и отображает статус автоматической сетки. После получения результатов сетки отмечено, что границы были нарисованы неправильно, а результаты (кривая распределения) полностью отличаются от реальности, что требует ручного редактирования каждого фрагмента. Параметры обнаружения границ были дополнительно скорректированы вручную для достижения лучшего результата. Затем проведено виртуальное просеивание для измерения размеров блоков и создания кривой процентного прохождения распределения фрагментов и таблицы совокупного размера для каждого проанализированного изображения. Процессы повторяются для других изображений из того же развода, и результаты объединяются для повышения точности.

Результаты и обсуждение. Результаты анализа распределения частиц по размерам взорванной горной массы, полученные после трех различных взрывов с использованием программного обеспечения Split-Desktop и WipFrag, показаны на рис.6, в то время как на рис.7 сравнивается кривая KuzRam с результатами, полученными с помощью Split-Desktop и WipFrag. В карьере Айн-Эль-Кебира максимально допустимый размер куска, который может обработать первичная дробилка, составляет 100 см.

На рис.6 показаны результаты взрывов 1, 2 и 3 в анализе Split-Desktop, которые дали 23,12, 13,66 и 54,83 % мелких частиц ($< 15,24$ см) соответственно. Изменение размеров среднего куска X_{50} – 33,96, 34,86 и 12,78 см были получены для взрывов 1, 2 и 3 соответственно. Предельный размер раздробленной породы от всех взрывов был меньше 100 см – размера впускной щели первичной дробилки. Наблюдалось незначительное количество негабарита в развале ($< 4,5$ %) при взрыве 1 (рис.6, а), ($< 2,5$ %) при взрыве 2 (рис.6, б) и нулевое количество при взрыве 3 (рис.6, в).



Результаты численного анализа с помощью программного обеспечения WipFrag, полученные для трех взрывов, составили 47,05, 41,92 и 55,55 % мелких частиц (<15,24 см) соответственно; средний размер куска X_{50} – 16,62, 19,77 и 13,41 см для взрывов 1, 2 и 3 соответственно. Верхние значения размера раздробленной породы во всех взрывах были меньше 100 см – размера впускной щели первичной дробилки. Процентное содержание в развале негабарита <8,86 % при взрыве 1, <4,1 % при взрыве 2 и с нулевым количеством негабарита при взрыве 3. Таким образом, результаты дробления KuzRam были стабильными (те же результаты, что и при трех взрывах) с незначительным или близким к нулю количеством обломков (<0,01 %) верхних размеров раздробленных пород от всех взрывов (меньших, чем размер впускной щели первичной дробилки 1000 мм).

Результаты Split-Desktop показывают, что негабарит наблюдался при взрывах 1 и 2, при взрыве 3 наименьшая доля обломков (0,00 %), в то время как у взрыва 1 самый высокий процент – 4,5 %. Максимально допустимый размер куска, который может обработать первичная дробилка, составляет 1000 мм. Анализы Split-Desktop показывают очень близкое распределение частиц по размерам для трех взрывов с X_{50} : 339,69, 348,61 и 127,82 мм соответственно.

Распределение частиц по размерам, полученное с помощью программы WipFrag, дает почти те же результаты, что и программа Split-Desktop, демонстрируя при этом аналогичную тенденцию. Программа WipFrag показывает, что все фрагменты развода меньше контрольной отметки в 1000 мм; три анализа WipFrag указывают на допустимый диапазон обломков, при этом доля прохождения составила 91,14 % при взрыве 1, 95,9 % при взрыве 2, в то время как у взрыва 3 самый высокий процент прохождения – 100 %. Три независимых результата WipFrag весьма

Рис.6. Анализ взрывов в программах Split-Desktop, WipFrag: *а* – взрыв 1; *б* – взрыв 2; *в* – взрыв 3

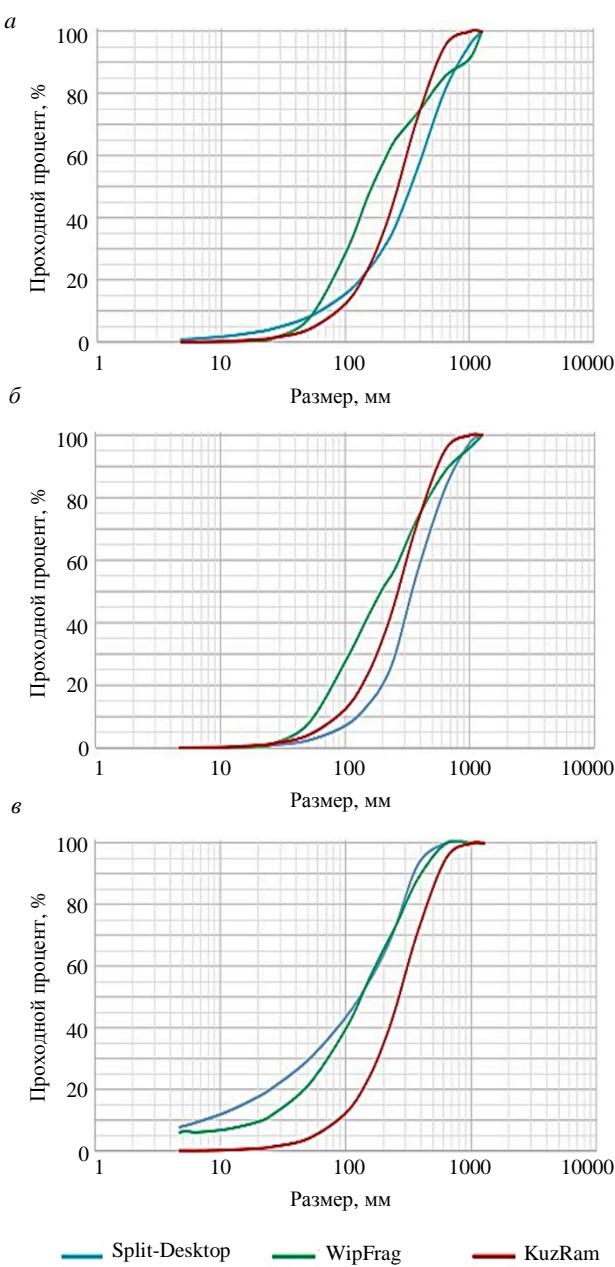


Рис.7. Сравнение кривых распределения размеров в программах Split-Desktop, WipFrag и KuzRam для трех взрывов:
а – взрыв 1; б – взрыв 2; в – взрыв 3

где X_{KR} – идеальный средний размер, ожидаемый от раздробленного материала по модели KuzRam, мм; X_{bm} – средний размер куска в развале по результатам анализа распределения частиц, мм.

Показатель фрагментации дает представление об эффективности фрагментации путем сравнения полученного фрагмента с идеальным размером модели KuzRam. Используются параметры проектирования взрыва, параметры взрывчатого вещества, свойства неповрежденной породы и общие свойства, а также расчетный идеальный размер, полученный как с помощью методов Split-Desktop, так и WipFrag, с применением обработки фотографий, сделанных по развалу. На ПФ, судя по всему, больше влияет структура горного массива, изменяющаяся в карьере. Значение ПФ меньше единицы означает, что полученный средний размер куска больше идеального размера, в то время как значение больше единицы показывает очень эффективную фрагментацию со средним размером куска, меньшим или равным идеальному размеру. Значение ПФ должно быть выше единицы [45-47].

схожи с показателями программы Split-Desktop (рис.6), таким образом, они отражают один и тот же реализованный проект. Небольшое различие, которое можно отметить, – изменение структурных характеристик горного массива [44].

Согласно результатам процентного прохождения, полученным по трем анализам (табл.1), модель KuzRam дает стабильные показатели при трех взрывах, около 99,99 % прохождения с процентным содержанием негабарита в карьере 0,01 %.

Анализ результатов показывает очень близкое распределение частиц по размерам для трех взрывов как эмпирическими, так и численными методами со стабильными значениями X_{50} по модели KuzRam в 266 мм, варьирующимися от 127,82 до 348,61 мм при анализе с помощью программного обеспечения Split-Desktop и около 134,13-197,75 мм при анализе с использованием программного обеспечения Split-Desktop с численным анализом посредством программы WipFrag.

Процентное содержание негабарита, установленное в результате численного анализа развала, подтверждает результаты, полученные с помощью модели KuzRam, но с большей точностью.

Анализ распределения частиц по размерам для двух программ обработки изображений дает аналогичный результат – 100 % прохождение при третьем взрыве. Поэтому, основываясь на приведенных результатах и для оценки эффективности взрывных работ, вводим новый коэффициент для оценки качества дробления взрывными работами в карьерах по добыче известняка – показатель фрагментации

$$\Pi\Phi = \frac{X_{KR}}{X_{bm}},$$



Таблица 1

Результат процентного прохождения для анализа Split-Desktop, WipFrag и KuzRam

| Размер, мм | Прохождение % | | | | | | |
|------------|---------------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|
| | Split-Desktop | | | WipFrag | | | KuzRam |
| | Взрыв 1 | Взрыв 2 | Взрыв 3 | Взрыв 1 | Взрыв 2 | Взрыв 3 | |
| 0,00 | 00,00 | 00,00 | 00,00 | 00,00 | 00,00 | 00,00 | 00,00 |
| 2,00 | 0,37 | 0,02 | 4,77 | 0,00 | 0,00 | 00,00 | 00,00 |
| 4,75 | 0,85 | 0,06 | 7,80 | 0,00 | 0,00 | 6,06 | 00,10 |
| 6,35 | 1,12 | 0,09 | 9,20 | 0,00 | 0,03 | 6,06 | 00,10 |
| 9,53 | 1,65 | 0,17 | 11,58 | 0,06 | 0,03 | 6,68 | 00,20 |
| 12,70 | 2,17 | 0,27 | 13,63 | 0,17 | 0,11 | 7,48 | 00,40 |
| 19,05 | 3,19 | 0,52 | 17,14 | 0,40 | 0,37 | 9,24 | 00,80 |
| 25,40 | 4,19 | 0,81 | 20,16 | 1,03 | 1,08 | 11,48 | 1,30 |
| 50,80 | 8,12 | 2,42 | 29,75 | 7,57 | 7,77 | 21,63 | 4,10 |
| 101,60 | 15,71 | 7,21 | 43,79 | 29,10 | 27,96 | 40,11 | 12,60 |
| 152,40 | 23,12 | 13,66 | 54,83 | 47,05 | 41,92 | 55,55 | 23,60 |
| 203,20 | 30,27 | 20,78 | 64,30 | 57,90 | 51,33 | 65,98 | 35,50 |
| 254,00 | 37,41 | 30,11 | 73,69 | 6519 | 57,53 | 73,59 | 47,30 |
| 381,00 | 55,69 | 56,28 | 93,35 | 73,66 | 73,40 | 8879 | 72,00 |
| 635,00 | 80,93 | 82,94 | 100,00 | 85,45 | 88,41 | 100,00 | 95,20 |
| 1000,00 | 95,50 | 97,50 | 100,00 | 91,14 | 95,90 | 100,00 | 99,90 |
| 1271,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |

В нашем исследовании, основанном на прямых наблюдениях, которые были сделаны на основе анализа взорванной горной массы в развале, и предыдущих результатах, полученных двумя методами (после взрыва, с загрузкой погрузчиком на одну треть и две трети), было обнаружено, что результаты по среднему куску (X_{50}), полученные методом обработки изображений (Split-Desktop и WipFrag) ближе к реальности, чем те, которые получились в результате анализа и прогноза по модели KuzRam.

Согласно результатам, полученным с помощью ПФ-метода обработки изображений, показанного в табл.2, можно сделать следующие выводы:

- При анализе WipFrag все показатели фрагментации, полученные различными взрывами, больше единицы ($\Pi\Phi > 1$), что означает, что размер среднего куска меньше или равен идеальному размеру, т.е. подтверждается, что все три взрыва являются очень эффективными, причем максимальный показатель фрагментации дает третий взрыв ($\Pi\Phi = 1,98$).
- При анализе Split-Desktop значения показателя фрагментации, заданные взрывами 1 и 2, меньше единицы ($\Pi\Phi \leq 1$), т.е. средний размер куска больше или равен идеальному размеру, что подтверждает, что два взрыва не дают эффективной фрагментации, в то время как значение фрагментации, полученного при третьем взрыве, больше единицы ($\Pi\Phi = 2,08$).

Таблица 2

Показатели фрагментации в анализах Split-Desktop и WipFrag

| Номер взрыва | X_{KR} , мм | X_{dm} , мм | | ПФ | |
|--------------|---------------|---------------|---------|---------------|---------|
| | | Split-Desktop | WipFrag | Split-Desktop | WipFrag |
| 1 | 266 | 339,69 | 166,22 | 0,78 | 1,6 |
| 2 | 266 | 348,61 | 197,75 | 0,76 | 1,34 |
| 3 | 266 | 127,82 | 134,13 | 2,08 | 1,98 |

На основании результатов анализов можно сделать вывод, что взрыв 3 фиксирует самые высокие значения ПФ (2,08 и 1,98 для Split-Desktop и WipFrag соответственно), и поэтому считается наиболее эффективной фрагментацией.

Заключение. В данной работе используется эмпирический метод модели KuzRam и численный метод программ для цифровой обработки изображений Split-Desktop и WipFrag для изучения и сравнения распределения частиц по размерам раздробленной породы, вызванной взрывом



в известняковом карьере Айн-Эль-Кебира. Анализируются и сравниваются три различных взрыва с одинаковыми проектными параметрами. Результаты анализа Split-Desktop дали аналогичные значения с максимальным процентом выхода негабарита, равным 4,5 %.

Анализы WipFrag очень близки друг к другу по максимальному проценту негабарита, равному 8,86 %, небольшие различия могут быть в значительной степени объяснены обычной неоднородностью структурных особенностей и ошибками горнорабочих.

Однако распределение частиц по размерам, предсказанное моделью KuzRam, показывает существенное отличие от Split-Desktop и WipFrag и не может быть истинным (одинаковое значение для всех трех взрывов). Модель KuzRam недооценивает размер фрагментов и средний прогнозируемый размер куска меньше истинного значения для трех изученных взрывов. Эти расхождения можно объяснить различием в характеристиках разрывов, которые, как предполагается, равномерно распределены в горном массиве. Поскольку проектные параметры взрыва и взрывчатые вещества, использованные для трех взрывов, одинаковы, можно сделать вывод, что эти различия вызваны обычными изменениями структурных особенностей и свойств горной массы: прочности на сжатие, наличием трещин, заполнением швов и условиями грунтовых вод.

В горной промышленности эмпирический метод является весьма удобным для оценки и предварительного анализа проектных решений по взрыву. В данном исследовании для оценки эффективности дробления взрывом использовалась недавно введенная константа – показатель фрагментации. Сравнивались идеальный средний размер куска с фактическим средним, полученным путем анализа результатов взрыва, и соотносились между собой.

Модель KuzRam дает только идеалистические результаты без учета различий в структурных характеристиках породы и геометрии взрыва, свойств взрывчатого вещества, взрываемости и физико-химических свойств пород, хотя данные параметры влияют на качество дробления.

Эмпирические модели дробления не всегда дают правильные результаты, поэтому важно усовершенствовать методику измерения дробления в соответствии с общими условиями исследуемого карьера. Результаты анализа методом цифровой обработки изображений с использованием двух программных продуктов очень близки, имеются несущественные расхождения, которые могут быть связаны с различными структурными характеристиками образования горных пород (однородностью, трещиноватостью, углами систем трещин, стратиграфией и др.) и техническими ошибками при проектировании взрыва. Это свидетельствует об эффективности метода обработки изображений.

Авторы благодарят компанию «SCAEK» за гостеприимство и сотрудничество, особую признательность выражают команде взрывников.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Fredj M., Hafsaoui A., Talhi K., Menacer K.* Study of the powder factor in the surface bench blasting // Procedia Earth and Planetary Science. 2015. Vol. 15. P. 892-899. DOI: [10.1016/j.proeps.2015.08.142](https://doi.org/10.1016/j.proeps.2015.08.142)
2. *Rais K., Kara M., Hr Hadji R. et al.* Original approach for the drilling process optimization in open cast mines; case study of Kef Essenou open pit mine Northeast of Algeria // Mining Science. 2017. Vol. 24. DOI: [10.5277/msc172409](https://doi.org/10.5277/msc172409)
3. *Rezaeinezhad A., Monjezi M., Mehrdanesh A., Khandelwal M.* Optimization of blasting design in open pit limestone mines with the aim of reducing ground vibration using robust techniques // Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources. 2020. Vol. 6. № 40. DOI: [10.1007/s40948-020-00164-y](https://doi.org/10.1007/s40948-020-00164-y)
4. *Phamotse K.M., Nhleko A.S.* Determination of optimal fragmentation curves for a surface diamond mine // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2019. Vol. 119. № 7. P. 613-619. DOI: [10.17159/2411-9717/494/2019](https://doi.org/10.17159/2411-9717/494/2019)
5. *Hosseini M., Namvar Z.N.* The Design of the Large Blastholes Pattern by Analyzing of Fragmentation of Blasted Rocks in Sar-cheshmeh Copper Mine // Geotechnical and Geological Engineering. 2017. Vol. 35. № 1. P. 395-402. DOI: [10.1007/s10706-016-0115-6](https://doi.org/10.1007/s10706-016-0115-6)
6. *Bastami R., Bazzazi A.A., Shoormasti H.H., Ahangari K.* Predicting and Minimizing The Blasting Cost In Limestone Mines Using a Combination of Gene Expression Programming and Particle Swarm Optimization // Archives of Mining Sciences. 2020. Vol. 65. № 4. P. 835-850. DOI: [10.24425/ams.2020.135180](https://doi.org/10.24425/ams.2020.135180)
7. *Kulula M.I., Nashongo M.N., Akande J.M.* Influence of Blasting Parameters and Density of Rocks on Blast Performance at Tschudi Mine, Tsumeb, Namibia // Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering. 2017. Vol. 5. № 6. P. 339-352. DOI: [10.4236/jmmce.2017.56028](https://doi.org/10.4236/jmmce.2017.56028)
8. *Mireku-Gyimah D., Boateng S.K.* Selection of Blast Design for Kofi Pit C of Endeavour Mining Corporation, Mali // Ghana Mining Journal. 2018. Vol. 18. № 2. P. 30-36. DOI: [10.4314/gm.v18i2.4](https://doi.org/10.4314/gm.v18i2.4)



9. *Fredj M., Hafsaoui A., Riheb H. et al.* Back-analysis study on slope instability in an open pit mine (Algeria) // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2020. Vol. 2. P. 24-29. DOI: 10.33271/nvngu/2020-2/024
10. *Borana S.L., Yadav S.K., Parihar S.K.* Image Processing Analysis of Blast Fragmentation: A Case Study of Sandstone Mining Area of Jodhpur // International Journal of Research in Advent Technology. 2018. Vol. 6. № 10. P. 2584-2589. DOI: 10.13140/RG.2.2.24151.73120
11. *Agyei G., Owusu-Tweneboah M.* A Comparative Analysis of Rock Fragmentation using Blast Prediction Results // Ghana Mining Journal. 2019. Vol. 19. № 1. P. 49-58. DOI: 10.4314/gm.v19i1.6
12. *Аленичев И.А., Рахманов Р.А.* Исследование эмпирических закономерностей сброса горной массы взрывом на свободную поверхность уступа карьера // Записки Горного института. 2021. Т. 249. С. 334-341. DOI: 10.31897/PMI.2021.3.2
13. *El Mekki A., Hadji R., Chemseddine F.* Use of slope failures inventory and climatic data for landslide susceptibility, vulnerability, and risk mapping in souk Ahras region // Mining Science. 2017. Vol. 24. P. 237-249. DOI: 10.5277/msc172417
14. *Babaeian M., Ataei M., Sereshki F. et al.* A new framework for evaluation of rock fragmentation in open pit mines // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2019. Vol. 11. Iss. 2. P. 325-336. DOI: 10.1016/j.jrmge.2018.11.006
15. *Djoudi M., Bensehamdi S., Fredj M.* Study of blasting effect on bench stability // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 833. № 012196. DOI: 10.1088/1755-1315/833/1/012196
16. *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. Vol. 281. № 105970. DOI: 10.1016/j.enggeo.2020.105970
17. *Singh B.K., Mondal D., Shahid M. et al.* Application of digital image analysis for monitoring the behavior of factors that control the rock fragmentation in opencast bench blasting: A case study conducted over four opencast coal mines of the Talcher Coal-fields, India // Journal of Sustainable Mining. 2019. Vol. 18. Iss. 4. P. 247-256. DOI: 10.1016/j.jsm.2019.08.003
18. *Xie C., Nguyen H., Bui X-N. et al.* Predicting rock size distribution in mine blasting using various novel soft computing models based on meta-heuristics and machine learning algorithms // Geoscience Frontiers. 2020. Vol. 12. Iss. 3. № 101108. DOI: 10.1016/j.gsf.2020.11.005
19. *Dhekne P.Y., Balakrishnan V., Jade R.K.* Effect of Type of Explosive and Blast Hole Diameter on Boulder Count in Limestone Quarry Blasting // Geotechnical and Geological Engineering. 2020. Vol. 38. P. 4091-4097. DOI: 10.1007/s10706-020-01280-y
20. *Sereshki F., Hoseini S.M., Ataei M.* Blast fragmentation analysis using image processing // International Journal of Mining and Geo-Engineering. 2016. Vol. 50. Iss. 2. P. 211-218. DOI: 10.22059/ijmge.2016.59831
21. *Siddiqui F.I., Ali Shah S.M., Behan M.Y.* Measurement of Size Distribution of Blasted Rock Using Digital Image Processing // Journal of King Abdul-Aziz University Engineering Sciences. 2009. Vol. 20. Iss. 2. P. 81-93. DOI: 10.4197/Eng.20-2.4
22. *Sudhakar J., Adhikari G.R., Gupta R.N.* Comparison of Fragmentation Measurements by Photographic and Image Analysis // Techniques Rock Mechanics and Rock Engineering. 2006. Vol. 39. Iss. 2. P. 159-168. DOI: 10.1007/s00603-005-0044-9
23. *Júlio de C.S., Andrévity da C.S., Suelen S.R.* Analysis of Blasting Rocks Prediction and Rock Fragmentation Results Using Split-Desktop Software // Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração. 2018. Vol. 15. Iss. 1. P. 22-30. DOI: 10.4322/2176-1523.1234
24. *Tosun A.* A modified WipFrag program for determining muckpile fragmentation // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2018. Vol. 118. № 10. P. 1113-1199. DOI: 10.17159/2411-9717/2018/v118n10a13
25. *Elahi AT., Hosseini M.* Analysis of blasted rocks fragmentation using digital image processing (case study: limestone quarry of Abyek Cement Company) // International Journal of Geo-Engineering. 2017. Vol. 8. № 16. DOI: 10.1186/s40703-017-0053-z
26. *Menacer K., Hafsaoui A., Talhi K., Saadoun A.* Study of the Influence Factorson Rock Blasting // Procedia Earth and Planetary Science. 2015. Vol. 15. P. 900-907. DOI: 10.1016/j.proeps.2015.08.143
27. *Shadabfar M., Gokdemir C., Zhou M. et al.* Estimation of Damage Induced by Single-Hole Rock Blasting: A Review on Analytical, Numerical, and Experimental Solutions // Energies. 2021. Vol. 14. № 29. P. 1-24. DOI: 10.3390/en14010029
28. *Xiaohua Ding, Xiang Lu, Wei Zhou et al.* Blasting Impact Simulation Test and Fragmentation Distribution Characteristics in an Open-Pit Mine // Shock and Vibration. 2019. Vol. 2019. № 4080274. DOI: 10.1155/2019/4080274
29. *Hu X., Qu S.* A new approach for predicting bench blasting-induced ground vibrations: a case study // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2018. Vol. 118. № 5. P. 531-538. DOI: 10.17159/2411-9717/2018/v118n5a9
30. *Silva J.D., Amaya J.G., Basso F.* Development of a predictive model of fragmentation using drilling and blasting data in open pit mining // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2017. Vol. 117. № 11. DOI: 10.17159/2411-9717/2017/v117n11a14
31. *Sereshki F., Hoseini S. M., Ataei M.* Blast fragmentation analysis using image processing. International // Journal of Mining and Geo-Engineering. 2016. Vol. 50. № 2. P. 211-218. DOI: 10.22059/ijmge.2016.59831
32. *Jug J., Strelec S., Gazdek M., Kavur B.* Fragment Size Distribution of Blasted Rock Mass // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2017. Vol. 95. № 042013. DOI: 10.1088/1755-1315/95/4/042013
33. *Cardu M., Coragliotto D., Oreste P.* Analysis of predictor equations for determining the blast-induced vibration in rock blasting // International Journal of Mining Science and Technology. 2019. Vol. 29. Iss. 6. P. 905-915. DOI: 10.1016/j.ijmst.2019.02.009
34. *Karim Z., Hadji R., Et Hamed Y.* GIS-based approaches for the landslide susceptibility prediction in Setif Region (NE Algeria) // Geotechnical and Geological Engineering. 2019. Vol. 37. P. 359-374. DOI: 10.1007/s10706-018-0615-7
35. *Tamani F., Hadji R., Hamad A., Hamed Y.* Integrating remotely sensed and GIS data for the detailed geological mapping in semi-arid regions: case of Youks les Bains Area, Tebessa Province, NE Algeria // Geotechnical and Geological Engineering. 2019. Vol. 37. P. 2903-2913. DOI: 10.1007/s10706-019-00807-2
36. *Zeqiri R.R., Riheb H., Karim Z. et al.* Analysis of safety factor of security plates in the mine «Trepça» Stantërg // Mining Science. 2019. Vol. 26. P. 21-36. DOI: 10.37190/msc192602
37. *Leng Z., Fan Y., Gao Q., Hu Y.* Evaluation and optimization of blasting approaches to reducing oversize boulders and toes in open-pit mine // International Journal of Mining Science and Technology. 2020. Vol. 30. Iss. 3. P. 373-380. DOI: 10.1016/j.ijmst.2020.03.010
38. *Baofu Duan, Hualin Xia, Xuxu Yang.* Impacts of bench blasting vibration on the stability of the surrounding rock masses of roadways // Tunnelling Underground Space Technology. 2018. Vol. 71. P. 605-622. DOI: 10.1016/j.tust.2017.10.012



39. *Fredj M., Boukarm R., Saadoun A. et al.* Distribution Analysis of Rock Fragments Size Based on the Digital Image Processing and the Kuz-Ram Model. Case of Jebel Medjounes Quarry // Aspects in Mining & Mineral Science. 2019. Vol. 2. Iss. 4. DOI: 10.31031/AMMS.2019.02.000545
40. *Zhang Z-X., Chi L-Y., Yi C.* An empirical approach for predicting burden velocities in rock blasting // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2021. Vol. 13. Iss. 4. P. 767-773. DOI: 10.1016/j.jrmge.2021.04.004
41. *Mutinda E.K., Alunda B.O., Maina D.K., Kasomo R.M.* Prediction of rock fragmentation using the Kuznetsov Cunningham-Ouchterlony model // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2021. Vol. 121. Iss. 3. P. 107-112. DOI: 10.17159/2411-9717/1401/2021
42. *Lawal A.I.* A new modification to the Kuz-Ram model using the fragment size predicted by image analysis // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2021. Vol. 138. Iss. 104595. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2020.104595
43. *Ouchterlony F., Sanchidrián J.A.* A review of development of better prediction equations for blast fragmentation // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2019. Vol. 11. Iss. 5. P. 1094-1109. DOI: 10.1016/j.jrmge.2019.03.001
44. *Maerz N.H., Palangio T.C., Franklin J.A.* WipFrag image based granulometry system // Proceedings of the FRAGBLAST 5 Workshop on Measurement of Blast Fragmentation, 23-24 August 1996. Montreal, Quebec, Canada. P. 91-99. DOI: 10.1201/9780203747919-15
45. *Akbari M., Lashkaripour G., Yarahamdi B.A., Ghafoori M.* Blastability evaluation for rock mass fragmentation in Iran central iron ore mines // International Journal of Mining Science and Technology. 2015. Vol. 25. Iss. 1. P. 59-66. DOI: 10.1016/j.ijmst.2014.11.008
46. *Shehu S.A., Yusuf K.O., Hashim M.H.M.* Comparative study of WipFrag image analysis and KuzRam empirical model in granite aggregate quarry and their application for blast fragmentation rating // Geomechanics and Geoengineering. 2020. Vol. 17. Iss. 1. DOI: 10.1080/17486025.2020.1720830
47. *Idowu K.A., Olaleye B.M., Saliu M.A.* Application of Split-Desktop Image Analysis and KuzRam Empirical Model for Evaluation of Blast Fragmentation Efficiency in a Typical Granite Quarry // Ghana Mining Journal. 2021. Vol. 21. № 1. P. 45-52. DOI: 10.4314/gm.v21i1.5

Авторы: А.Саадун, д-р наук, преподаватель, <https://orcid.org/0000-0001-7860-6107> (Университет Абдеррахмана Мира, Беджайя, Алжир; Университет Аннабы, Аннаба, Алжир), М.Фредж, д-р наук, преподаватель, mohamed.fredj@univ-bejaia.dz, <https://orcid.org/0000-0002-0560-4941> (Университет Абдеррахмана Мира, Беджайя, Алжир; Университет Аннабы, Аннаба, Алжир), Р.Букарм, д-р наук, преподаватель, <https://orcid.org/0000-0002-9387-5812> (Университет Абдеррахмана Мира, Беджайя, Алжир; Университет Беджайя, Беджайя, Алжир), Р.Хаджи, профессор, <https://orcid.org/0000-0002-9632-0212> (Университет Ферхата Аббаса, Сетиф, Алжир).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.