

АВТОМАТИЗАЦИЯ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ БУРОВЗРЫВНЫХ РАБОТ В УСЛОВИЯХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ КРИОЛИТОЗОНЫ

Миронов Я.В., Бураков А.М.

*Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского Сибирского отделения
Российской академии наук, Якутск*

Ключевые слова: разрушение горных пород, взрывные работы, программный продукт, программное обеспечение, горные геоинформационные системы, проектирование буровзрывных работ, расчет параметров взрывных работ.

Аннотация. Приведен обзор известных передовых программных продуктов для управления технологическими процессами горных работ, в том числе и для проектирования буровзрывных работ при отработке месторождений полезных ископаемых. Показано, что multifunctional программы такого класса из-за высокой стоимости недоступны и нерентабельны для использования на небольших предприятиях горной отрасли. Обосновывается необходимость создания дешевых узкоспециализированных программ, которые могут быть доступны для маломощных горных объектов. Приведены алгоритм и характеристика разработанной в ИГДС СО РАН программы для автоматизированного расчета параметров буровзрывных работ и графического построения паспортов при ведении взрывных работ на открытых горных работах при разработке рудных, угольных и россыпных месторождений. В основе алгоритма расчета заложен стандартный порядок определения основных показателей буровзрывных работ, справочные данные по характеристикам горных пород, в том числе применительно к условиям расположения объектов работ в районах распространения многолетней мерзлоты и применяемым в настоящее время взрывчатым материалам.

AUTOMATION OF CALCULATION OF PARAMETERS OF DRILLING AND BLASTING OPERATIONS IN THE CONDITIONS OF CRYOLITHOZONE DEPOSITS

Mironov Ya.V., Burakov A.M.

*N.V. Chersky Institute of Mining of the North of Siberian Branch of the Russian Academy of Science,
Yakutsk*

Keywords: rock destruction, blasting, software, software, mining geoinformation systems, design of drilling and blasting operations, calculation of blasting parameters.

Abstract. An overview of well-known advanced software products for the management of technological processes of mining operations, including for the design of drilling and blasting operations during mining of mineral deposits. It is shown that multifunctional programs of this class are inaccessible and unprofitable for use in small mining enterprises due to their high cost. The necessity of creating cheap highly specialized programs that can be available for low-power mining facilities is justified. The algorithm and characteristics of the program developed at IMN SB RAS for automated calculation of drilling and blasting parameters and graphical construction of passports for conducting blasting operations in open-pit mining during the development of ore, coal and placer deposits are presented. The calculation algorithm is based on the standard procedure for determining the main indicators of drilling and blasting operations, reference data on the characteristics of rocks, including in relation to the conditions of the location of objects.

Введение. В настоящее время для разупрочнения монолитного массива горных пород используют различные способы, в зависимости от вида добываемого полезного ископаемого и крепости вмещающих пород. При этом, доминирующим способом все же остаются буровзрывные работы (БВР) [1]. Буровзрывные работы играют очень важную роль в цикле горных работ, поскольку от их корректно рассчитанных параметров зачастую зависит вся дальнейшая производственная цепочка [2].

Материалы и методы исследований

На основании исследований ученых в области горного дела, внесших значительный вклад в совершенствование технологии и повышение безопасности взрывных работ (Ржевский В.В., Мельников Н.В., Семенов Н.Н., Зельдович Я.Б., Харитон Ю.Б., Садовский

М.А., Лаврентьев М.А., Беляев А.Ф., Баум Ф.А., Шехтер Б.М., Андреев К.К., Демидюк Г.П., Докучаев М.М., Покровский Г.И., Каркашадзе Г.Г., Кутузов Б.Н. и др.) в настоящее время разработан ряд способов и методов для расчета параметров взрыва или прогнозирования его результатов. В связи с повсеместной цифровизацией производств, в том числе и в горнодобывающей отрасли, стабилен спрос на автоматизированные программы по управлению всеми технологическими процессами (геологоразведка, горные работы, взрывные работы, обогащение и т.д.). В результате этого на данный момент на рынке существует достаточно большое количество компьютерных программ для решения различных задач, связанных с производством БВР [3, 4].

Сегодня существует множество компаний, производящих горные геоинформационные системы (ГГИС), которые в том или ином виде предлагают свой подход к решению данной проблемы. Представленные на рынке в настоящее время ГГИС условно можно разделить на два блока: узкоспециализированные (предназначены исключительно для проектирования и анализа какого-либо одного процесса, как например, разработанная в ИГДС СО РАН

«Программа расчета параметров бестранспортной технологии внутреннего отвалообразования смерзающихся вскрышных пород» [5-8]) и многофункциональные (модульные системы, отвечающие комплексному подходу к отработке месторождения).

1. Среди специализированных ПО необходимо отметить следующие.

– ПО *Blast Maker Underground* (Киргизская Республика) предназначено для составления проектов, ведения базы данных и оптимизации процесса БВР для подземных горных работ.

– ПО *DRIFT Software* (США) предназначено для проектирования БВР на проходку горизонтальных и наклонных горных выработок путём расстановки по периметру выработки буферных шпуров. Программа предоставляет на выбор несколько алгоритмов расчётов паспорта БВР на основе первоочередного определения зоны регулируемого дробления.

– ПО фирмы *MineExcellence* (Австралия) предназначено для проектирования программных технологий БВР.

– ПО *BIMSu* – система управления информацией о взрывах в подземных выработках или тоннелях (хранение и анализ данных).

– ПО *BLASTOP* – предлагает комплексный подход к проектированию очистных работ.

– *BLADES Tunnel Designer* – предназначено для проектирования горизонтальных и наклонных выработок различной формы.

– ПО *Thierry Bernard Technologie* (Франция) – предназначено для проектирования в области взрывных работ для гражданского строительства и горнодобывающего направления, а также в области разработки технологий для промышленных ВВ и систем инициирования.

Также среди специализированного ПО для проектирования БВР в подземных условиях можно отметить такие продукты как *JKSimBlast* (Австралия), *SHOTPlus Underground* (Австралия), *Maptek* (США), *iRing Inc.* (Канада), *HOLLSET* (Россия), *KAZBLAST UNDER* (Казахстан) и др.

2. Среди многофункциональных ПО необходимо отметить следующие.

К наиболее известным системам относятся *Minemap*, *Minecom* (США), *Micromine* и *Vulcan* (Австралия), *Geovia GEMS* (Франция), *GEOVIA Surpac* (Франция), *MineFrame* (Россия), *Геомикс* (Россия), *K-Mine* (Украина), *Techbase* (США), *Datamine* (Великобритания) и др. Самой известной компанией в России на данный момент является *MICROMINE*.

Многфункциональные ПО состоят из основы (ядра), которое служит для управления ключевыми функциями, (например, создание базы данных; геологический модуль; подсчёт запасов; планирование; анализ данных; управление рудо- потоками и т.д.) и дополнительные, как правило, узкоспециализированные модули (геомеханика, проектирование БВР и др.), которые отвечают требованиям комплексного подхода к работе, предоставляя инженерам доступ к различным типам работ, в том числе связанных с проведением БВР [4, 9-11].

К сожалению, несмотря на такое многообразие программ, доступность к ним для небольших маломощных предприятий горнодобывающей отрасли, в частности на территории Республики Саха (Якутия), очень ограничена. Связано это зачастую с высокой стоимостью

ПО, размер которого составляет десятки тысяч долларов, что нерентабельно для организации. С другой стороны, для небольших карьеров (рудных, угольных, стройматериалов) или приисков Якутии, годовая производительность которых по горной массе колеблется в диапазоне 50-200 тыс. тонн или м³ необходимость в таких программах отсутствует. Зачастую на таких предприятиях расчеты БВР производят или специалисты стороннего подрядчика, выполняющие взрывные работы, или инженерный персонал самого предприятия, используя применяемые на предприятии бумажные шаблоны расчетов или простейшие программы, например Excel. В таком случае на предприятии расчеты обычно проводятся вручную или в Excel составляется простейшая таблица расчета, а после необходимых вычислений, результат распечатывается на бумажном носителе, и часто такого подхода достаточно. Однако в случае отступления от устоявшегося на предприятии «шаблона» взрывных работ возникают определенные трудности в выполняемых расчетах.

В такой ситуации, если предприятие хочет автоматизировать производственные процессы расчета БВР, то к выбору автоматизированного программного продукта необходим индивидуальный подход в зависимости от поставленных задач – ПО должно обладать набором функций, который способен решить конкретные цели предприятия и при этом находиться в доступном ценовом сегменте.

Для условий ведения горных работ, в том числе с учетом многолетней мерзлоты, ускорения и автоматизации расчетов, небольшими предприятиями, не обладающими возможностью приобретения дорогостоящего программного обеспечения со значительным набором различных и не всегда необходимых функций, в ИГДС СО РАН разработан специализированный программный продукт, позволяющий проектировать паспорта БВР в полном соответствии с горнотехническими условиями разработки, конкретными целями предприятий и требованиями правил безопасности на горных работах.

Компьютерная программа предназначена для автоматизированного расчета параметров взрывных работ и графического построения паспортов при ведении взрывных работ на открытых горных работах при разработке рудных, угольных и россыпных месторождений. В основе алгоритма расчета заложен стандартный порядок определения основных показателей БВР, справочные данные по характеристикам горных пород, в том числе применительно к условиям криолитозоны (расположения объектов работ в районах распространения многолетней мерзлоты) и применяемым в настоящее время взрывчатым материалам. Влияние свойств многолетней мерзлоты на взрываемость горных пород учтено через поправочные значения соотношений крепости горных пород в естественном и замороженном состояниях, что в конечном итоге оказывает влияние на удельный расход применяемого взрывчатого вещества.

Интуитивно-понятный набор функций программного интерфейса позволяет даже не квалифицированным специалистам с минимальными навыками проектирования взрывных работ очень быстро освоить работу в данной программе и выполнять необходимые расчеты с учетом особенностей ведения взрывных работ в конкретных горно-геологических условиях, производить графическую корректировку расположения скважин, изменять конструкции и компоновку зарядов. При этом, после каждой корректировки изначально задаваемых данных в автоматическом режиме производится изменение расчетных и технико-экономических показателей паспорта БВР. Отличительными особенностями можно назвать простоту освоения и удобство работы, простой и понятный интерфейс, минимум настроек и управляющих элементов, что весьма актуально для решения узкоспециализированных задач. Аналитический расчёт и представление результатов происходит в автоматическом режиме.

Алгоритм расчета реализован на языке программирования Python. Программа состоит из блоков ввода данных, расчета, анализа и вывода результатов расчета. Программа также содержит библиотеку рекомендуемых к применению ВВ и выдержки из правил безопасности для выбора всех необходимых параметров БВР.

Программа состоит из трех основных блоков.

Блок 1. На основании исходных данных выбирается тип месторождения и детализируются данные о свойствах взрывааемых пород и необходимые условия взрывания (рис. 1).

Блок 2. Расчет параметров взрыва, в котором вводятся необходимые данные и производится их предварительный расчет (рис. 2).

Блок 3. Выбор схемы скважинного заряда, графическое построение схем монтажа взрывания на поверхности и в теле заряда, тип и количество боевиков, расчет необходимых безопасных расстояний с учетом требований единых правил безопасности [12].

Выберите вид месторождения

Введите значение группы по СНиПу (Табл. 1)

☒ На выброс

☐ На рыление

Категория	Степень крепости	Породы	Коэффициент крепости f	Группа по СНиПу
I	В высшей степени крепкие породы	Наиболее крепкие, плотные и вязкие кварциты и базальты. Исключительно по крепости другие породы.	20 и более	XI
II	Очень крепкие породы	Очень крепкие гранитовые породы. Кварцевый порфир, очень крепкий сланец. Менее крепкие, нежели указанные выше кварциты. Самые крепкие песчаники и известняки.	15	X
III	Крепкие породы	Гранит (плотный) и гранитовые породы. Очень крепкие песчаники и известняки. Кварцевые рудные жилы. Крепкий конгломерат. Очень крепкие железные руды.	10	IX
IIIa	То же	Известняки (крепкие). Некрепкий гранит. Крепкие песчаники. Крепкий мрамор, доломит, колчеданы.	8	XIII
IV	Довольно	Обыкновенный песчаник. Железные руды.	6	VII

Категория взрываемости	Наименование и вид грунта	Температура грунта, С	Категория льдистости	Рекомендуемый удельный расход ВВ, кг/м ³ , при взрывании	
I легко-взрываем	Мерзлые песчаные грунты со степенью водонасыщения до 0,5 и выше 0,9	От 0,5 и ниже	Сильно-льдистые	0,4-0,6	на выброс и зброс 1,3-1,8
II редне-взрываем	Мерзлые песчаные грунты со степенью водонасыщения 0,5-0,9; мерзлые, моренные обломочные и гравийные грунты с песчаным заполнителем.	От 0,5 и ниже	То же	0,6-0,8	1,6-2,2
редне-взрываем	Мерзлые глинистые, моренные, обломочные и	От 0,5 и ниже	Льдистые	0,6-0,8	1,6-2,2

Рис. 1. Рабочий интерфейс программы: Блок 1 – исходные данные

Введите параметры для расчета

Высота уступа Нуст.

Длина блока Lбл.

Ширина блока Вбл.

Выберите метод нахождения диаметра скважины

☒ Диаметр скважины по диаметру бурового инструмента (мм)

☐ Диаметр скважины по емкости ковша экскаватора (м)

Диаметр бурового инструмента Dб.и.

Удельный расход ВВ для зарядов выброса qв

Коэффициент сближения скважин m скв.

Коэффициент сближения рядов m ряд.

Коэффициент работоспособности Кр.

Коэффициент свойств трещиноватости Ав.п.

Вес боевика (гр.)

Угол наклона скважины к горизонту beta

Коэффициент для длины перебура Кпер.

	126	d	мм
Диаметр скважины :			
Вместимость одного пог.м. скважины :	10,59	P	кг
Расчетная величина сопротивления по подошве :	2,67	W	м
Расстояние между скважинами :	2,67	a	м
Расстояние между рядами скважин :	2,67	b	м
Длина перебура :	1,26	Lper	м
Длина скважины :	14,68	Lskv	м
Вес заряда в скважине :	102,66	Qvv	кг
Длина заряда :	9,69	Lzar	м
Длина забойки :	4,99	Lzab	м
Площадь скважины :	7,13	Sskv	м ²
Выход горной массы :	5,83	Vgm	м ³
Средняя площадь полигонов с рылением песков на взрыв :	163,46	Sn	м ²
Количество скважин :	28,05	Nskv	шт
Количество рядов :	3	Nya	шт
Количество скважин в ряду :	9,36	Nskvr	шт

Рис. 2. Рабочий интерфейс программы: Блок 2 – расчет параметров взрыва

Безопасное расстояние по разлету

☒ Взрывание на горизонтальной поверхности

☐ Взрывание на косогорах

Безопасное расстояние по ударной волне взрыва

Введите навеску ВВ в одном погонном метре ДШ

☒ Температура окружающего воздуха ниже 0 по цельсию

☐ Температура окружающего воздуха выше 0 по цельсию

Согласно ЕПБ не менее 200

Безопасное расстояние по действию сейсмических волн

Выберите вид пород

Выберите тип здания

Выберите вид взрыва

Согласно ЕПБ не менее 200

Расчетное безопасное расстояние по разлету отдельных кусков породы (Взрывание на горизонтальной поверхности):	304
Расчетное безопасное расстояние по вертикальному разлету отдельных кусков породы :	304
Расчетное безопасное расстояние по действию ударной волны (УВВ) на застекление (В зинный период):	134
Расчетное безопасное расстояние по действию сейсмических волн :	31

Рис. 3. Рабочий интерфейс программы: Блок 3 – схема взрывания и расчет безопасных расстояний

По окончании расчетов результаты выводятся в итоговой таблице, которая включает в себя все параметры БВР [13]. Также программа позволяет использовать данные итоговой таблицы для составления распорядка проведения массового взрыва.

В настоящее время данный программный продукт подготовлен для апробации на ряде малых рудных, угольных и россыпных предприятий горнодобывающих объектов Республики Саха (Якутия).

Выводы

Разработанный в ИГДС СО РАН специализированный программный продукт, позволяет проектировать паспорта БВР и распорядок проведения массовых взрывов в полном соответствии с горнотехническими условиями разработки, конкретными целями предприятий и требованиями правил безопасности при ведении открытых горных работ.

Данное ПО, как узко специализированный продукт, будет в первую очередь интересно к применению на небольших горнодобывающих предприятиях Арктического региона.

Финансирование. «Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема №0297-2021-0020, ЕГИСУ НИОКТР №122011800086-1) с использованием оборудования ЦКП ФИЦ ЯНЦ СО РАН».

Список литературы

1. Брухавецкая А.О. Анализ влияния параметров БВР на качество дробления горной массы // Взрывное дело. – 2022. – №136-93. – С. 111-128.
2. Вохмин С.А., Кытманов А.А., Ерлыков Г.П., Шевнина Е.В., Курчин Г.С., Кирсанов А.К. Прогноз и фактический выход негабаритной фракции при отбойке руды в подземных условиях // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2021. – №2. – С. 39-49. – DOI: 10.15372/FTPRPI20210205.
3. Тюпин В.Н., Игнатенко И.М., Агарков И.Б., Крючков И.С. Автоматизированный расчет параметров взрывных работ на основе показателя буримости трещиноватого массива при шарошечном бурении скважин на карьерах // Горный журнал. – 2021. – №12. – С. 75-79. – DOI: 10.17580/gzh.2021.12.14.
4. Кирсанов А.К. Анализ программных продуктов для проектирования буровзрывных работ при отработке месторождений подземным способом // Известия ТулГУ. Науки о Земле. – 2023. – Вып. 2 – С. 249-259.
5. Панишев С.В., Миронов Я.В. Программа расчета производительности драглайна при разработке смерзающейся взорванной горной массы // Успехи современного естествознания. – 2020. – № 8. – С. 63-68.
6. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2023614137 РФ. Программа расчета параметров бестранспортной технологии внутреннего отвалообразования смерзающихся вскрышных пород / С.В. Панишев, Я.В. Миронов. – Заявка №2023613022 от 20.02.2023; зарег. 27.02.2023.
7. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2024661618 РФ. Программа расчета параметров бестранспортной технологии внутреннего отвалообразования смерзающихся вскрышных пород / С.В. Панишев, Я.В. Миронов. – Заявка №2024660886 от 16.05.2024; зарег. 21.05.2024.
8. Миронов Я.В., Панишев С.В. Автоматизация расчета параметров внутреннего отвалообразования смерзающихся вскрышных пород // XXV Лаврентьевские чтения, посвященные 30-летию Академии наук РС (Я): материалы научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Якутск: Изд. дом СВФУ, 2023. – С. 55-57.
9. Обзор новейших систем проектирования БВР [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://rit-it.com/2021/09/29/obzor-novejsih-sistem-proektirovaniya-bvr/>.
10. Система автоматизированного проектирования буровзрывных работ «BlastMaker» для открытых горных работ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://blastmaker.kg/sapr-bvr-blastmaker/>.
11. Технология обеспечения буровзрывного цикла горных работ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://geomix.ru/software/geomix/bvr/>.
12. Приказ от 3 декабря 2020 года N 494 «Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности "Правила безопасности при производстве, хранении и применении взрывчатых материалов промышленного назначения" (с изменениями на 25 мая 2022 года)».
13. Литвинский Г.Г., Шульгин П.Н. Разработка нового паспорта БВР и методики его расчета на ЭВМ // Известия ТулГУ. Науки о Земле. – 2023. – Вып. 2. – С. 90-97.

References

1. Brukhavetskaya A.O. Analysis of the influence of drilling and blasting parameters on the quality of rock crushing // Explosion technology. 2022, no. 136-93, pp. 111-128.

2. Vokhmin S.A., Kytmanov A.A., Shevnina E.V., Kurchin G.S., Kirsanov A.K., Erlykov G.P. Prediction and actual oversized/undersized fragmentation in underground blasting // Journal of Mining Science. 2021, vol. 57, no. 2, pp. 210-219.
3. Tyupin V.N., Ignatenko I.M., Agarkov I.B., Kryuchkov I.S. Computerized design of blasting parameters based on drillability index of jointed rock mass in roller bit drilling in open pit mines // Mining Journal. 2021, no. 12, pp. 75-79. DOI: 10.17580/gzh.2021.12.14.
4. Kirsanov A.K. Analysis of software products for the design of drilling and blasting operations during the development of deposits by underground method // News of TulSU. Earth Sciences. 2023, iss. 2, pp. 249-259.
5. Panishev S.V., Mironov Ya.V. Dragline productivity calculation program for the development of a frozen exploded rock mass // Successes of modern natural science. 2020, no. 8, pp. 63-68.
6. Certificate of registration of the computer program No. 2023614137 RU. Program for calculating the parameters of the transportless technology of internal dumping of frozen overburden rocks / S.V. Panishev, Ya.V. Mironov. – Appl. No. 2023613022 from 20.02.2023; reg. 27.02.2023.
7. Certificate of registration of the computer program No. 2024661618 RU. Program for calculating the parameters of the transportless technology of internal dumping of frozen overburden rocks / S.V. Panishev, Ya.V. Mironov. – Appl. No. 2024660886 from 16.05.2024; reg. 21.05.2024.
8. Mironov Ya.V., Panishev S.V. Automation of calculation of parameters of internal dumping of frozen overburden rocks // XXV Laurentian readings dedicated to the 30th anniversary of the Academy of sciences of the RS (Ya): proceedings of the scientific conference of students, postgraduates and young scientists. – Yakutsk: NEFU Publ. house, 2023. – P. 55-57.
9. Overview of the latest BVR design systems [Electronic resource]. – Access mode: <https://rit-it.com/2021/09/29/obzor-novejshih-sistem-proektirovaniya-bvr/>
10. The system of computer-aided design of drilling and blasting operations "BlastMaker" for open-pit mining [Electronic resource]. – Access mode: <https://blastmaker.kg/sapr-bvr-blastmaker/>
11. Technology for ensuring the drilling and blasting cycle of mining operations [Electronic resource]. – Access mode: <https://geomix.ru/software/geomix/bvr/>
12. Order No. 494 dated December 3, 2020 "On approval of Federal Norms and Rules in the field of industrial safety "Safety rules for the production, storage and use of explosive materials for industrial purposes" (as amended on May 25, 2022)".
13. Litvinsky G.G., Shulgin P.N. Development of a new BVR passport and methods of its calculation on a computer // News of TulSU. Earth Sciences. 2023, iss. 2, pp. 90-97.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Миронов Яков Владимирович – ведущий инженер	Mironov Yakov Vladimirovich – leading engineer
Бураков Александр Михайлович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник	Burakov Aleksandr Mikhailovich – candidate of technical sciences, leading researcher
mironoff22ykt@mail.ru	

Получена 05.12.2024