

УДК 622.81

О.М. Чихачев

**ЗАВИСИМОСТЬ РАЗМЕРА ЗОНЫ РЕГУЛИРУЕМОГО
ДРОБЛЕНИЯ И УДЕЛЬНОГО РАСХОДА ВВ
ПРИ СКВАЖИННОЙ ОТБОЙКЕ ПОЛЕЗНЫХ
ИСКОПАЕМЫХ ОТ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК МАССИВОВ**

В проводимых исследованиях рассматривается двухкомпонентная среда, состоящая из вмещающих пород и полезного ископаемого с различными физико-техническими свойствами.

Для теоретического описания процессов разрушения полезных ископаемых и слагающих их сростков минералов за основу принята модель Г.И. Покровского [1], с изменениями и уточнениями, предложенными Г.М. Крюковым [2]. В соответствии с последними радиус регулируемого дробления горных пород посредством взрыва удлиненных зарядов промышленных ВВ определяется зависимостью:

$$V_0 = a_0 (p_{ж} / \sigma_{рас})^{1/2}, \quad (1)$$

где a_0 - радиус зарядной полости (скважины), м; $p_{ж}$ - давление газов взрыва в точке Жуге, МПа; $\sigma_{рас}$ - предел прочности породы на растяжение, МПа.

Из теории, изложенной в [2] следует, что при воздействии взрыва заряда ВВ на сплошную среду с одинаковыми физико-техническими характеристиками во всём взрываемом объёме, на первом этапе воздействия взрыва не наблюдается разрушений массива. Для реальной, двухкомпонентной среды, сложенной участками различной прочности и имеющей трещины и дислокации, на первом этапе неминуемо возникнут напряжения растяжения и сдвига, которые, теоретически, могут привести к разрушениям. Установлено [3], если порода состоит из сростков минералов различной прочности, то разрушение будет наблюдаться по границам их срастания. Таким образом, разрушение сростков минералов полезного ископаемого и вмещающей породы при взрывной отбойке может происходить уже на первом этапе разрушения, под действием напряжения сдвига и растяжения, в границах

радиуса регулируемого дробления V_0 , определенного по формуле (1).

В соответствии со взаимным изменением величин физико-технических характеристик вмещающих пород и полезного ископаемого определяется прочность взрываемого горного массива на сжатие ($\sigma_{сж}$), растяжение ($\sigma_{рас}$). Из формулы (1) следует, что колебания $\sigma_{рас}$ приводят к перемене величины радиуса регулируемого дробления V_0 . Это подтверждается расчётом, результаты которого приведены в табл. 1. Здесь для количественного выявления влияния физико-технических характеристик массива на V_0 величины a_0 и $p_{ж}$ приняты равным единице.

Для различных пород месторождений полезных ископаемых отмечены существенные колебания $\sigma_{рас}$, которые, в соответствии с формулой (1) и результатами расчёта, приведённого в табл. 1, приводят к изменениям величины V_0 . В табл. 2 приведен расчет величины V_0 при известном изменении $\sigma_{рас}$ для пород Сорского карьера – 6,1÷26,5 МПа и пород Мазульского карьера – 5,7÷14,1 МПа.

Проведёнными исследованиями установлено, что для оценки прочностных характеристик пород можно пользоваться информацией о содержании в них полезного ископаемого. Определена взаимосвязь между прочностью горного массива и содержанием в нём полезных ископаемых. Для Сорского месторождения на основании лабораторных испытаний, заключающихся в определении прочностных свойств образцов руды на гидравлическом прессе и проведении химического анализа, установлена зависимость:

$$\alpha = 95,2708 - 0,0339 \sigma_{сж} k^{-1}, 10^{-3} \%, \quad (2)$$

Таблица 1

Изменение величины V_0 в зависимости от $\sigma_{рас}$

№ п/п	Заданное значение $\sigma_{рас}$, ед	Величина V_0 , определённая по формуле (1)	Изменение величины V_0 , %
1	1	$V_0 = a_0 (p_{ж})^{1/2}$	-
2	1,3	$V_0 = 0,877 a_0 (p_{ж})^{1/2}$	-12,3
3	1,5	$V_0 = 0,816 a_0 (p_{ж})^{1/2}$	-18,4
4	0,7	$V_0 = 1,2 a_0 (p_{ж})^{1/2}$	+20,0
5	0,5	$V_0 = 1,4 a_0 (p_{ж})^{1/2}$	+40

Таблица 2

Изменение величины V_0 в зависимости от $\sigma_{рас}$ для пород Сорского и Мазульского месторождений

№ п/п	Месторождение	Интервалы изменения $\sigma_{рас}$, МПа	Величины V_0 , (при диаметре заряда – 250 мм, ВВ – граммонит 79/21), м
1	Сорское	6,1-26,5	2,0-4,2
2	Мазульское	5,4-14,1	2,7-4,3

$$\text{или } \sigma_{сж} = \frac{95,2708 - \alpha}{0,0339} k, \text{ МПа.} \quad (3)$$

где $\sigma_{сж}$ - значение предела прочности образцов руды на сжатие, МПа; α - содержание металла в образцах руды, 10^{-3} %; k - коэффициент перевода предела прочности пород из кг/см^2 в МПа, ед.

Коэффициент корреляции между α и $\sigma_{сж}$ $R = -0,95$, проверка по критерию Стьюдента [4] подтвердила его значимость.

Анализ полученных эмпирических зависимостей (2) и (3) показал, что для условий Сорского месторождения они описываются теоретическими уравнениями:

$$\alpha = \alpha_{\min}^{\min} - \frac{\alpha_{\max}^{\max} + \alpha_{\max} - \alpha_{\min}^-}{\sigma_{сж}^{\max}} (\sigma_{сж} - \sigma_{сж}^{\max}) k^{-1}, 10^{-3} \% \quad (4)$$

Откуда:

$$\sigma_{сж} = \frac{(\alpha - \alpha_{\min}^{\min}) \sigma_{сж}^{\max}}{\alpha_{\max}^{\min} + \alpha_{\max} + \alpha_{\min}^-} + \sigma_{сж}^{\max} = \sigma_{сж}^{\max} \left(\frac{\alpha - \alpha_{\min}^{\min}}{\Delta \alpha} + 1 \right) k, \text{ МПа} \quad (5)$$

$$\Delta \alpha = \alpha_{\max}^{\min} + \alpha_{\max} + \alpha_{\min}^-, \text{ МПа} \quad (6)$$

где α_{\min}^{\min} - наименьшее значение α в экспериментальных данных, 10^{-3} %; α_{\min}^- - средняя величина из наименьших значений α , соответствующих наибольшей прочности образцов руды, 10^{-3} %; α_{\max}^{\min} - максимальная величина из

наименьших значений α , соответствующих наибольшей прочности образцов руды, 10^{-3} %; α_{\max} - максимальная величина из наибольших значений α , соответствующих наименьшей прочности образцов руды, 10^{-3} %; $\sigma_{сж}^{\max}$ - наибольшее значение $\sigma_{сж}$ в экспериментальных данных, кг/см^2 .

Оценка зависимостей (3-6) по критерию разностного ряда [4] показала, что различие сравниваемых рядов экспериментальных и расчётных значений несущественно. Зависимости могут быть использованы для определения значений содержания металла в руде в зависимости от прочности пород, слагающих горный массив и наоборот.

Получена экспериментальная зависимость пределов прочности на растяжение $\sigma_{раст}$ и на сжатие $\sigma_{сж}$ в образцах руды:

$$\sigma_{сж} = \{106,58 + 8,3751 \sigma_{раст}\} k, \text{ МПа;} \quad (7)$$

$$\text{Откуда: } \sigma_{раст} = \frac{\sigma_{сж} - 106,58}{8,3751} k, \text{ МПа.} \quad (8)$$

Коэффициент корреляции между $\sigma_{раст}$ и $\sigma_{сж}$ $R = 0,93$, проверка по критерию Стьюдента [3] подтвердила его значимость.

Анализ полученных зависимостей (7) и (8) показал, что они полностью описываются теоретическими уравнениями:

$$\sigma_{сж} = \left\{ \sigma_{сж}^{\min} + \frac{(\sigma_{раст} - \sigma_{раст}^{\min})(\sigma_{сж}^{\max} - \sigma_{сж}^{\min})}{(\sigma_{раст}^{\max} - \sigma_{раст}^{\min})} \right\} k, \text{ МПа.} \quad (9)$$

Откуда:

$$\sigma_{раст} = \left\{ \sigma_{раст}^{\min} + \frac{(\sigma_{сж} - \sigma_{сж}^{\min})(\sigma_{раст}^{\max} - \sigma_{раст}^{\min})}{(\sigma_{сж}^{\max} - \sigma_{сж}^{\min})} \right\} k = \left\{ \sigma_{раст}^{\min} + \Delta \sigma_{сж} (\sigma_{сж} - \sigma_{сж}^{\min}) \right\} k, \text{ МПа;} \quad (10)$$

$$\Delta \sigma_{сж} = \frac{(\sigma_{раст}^{\max} - \sigma_{раст}^{\min})}{\sigma_{сж}^{\max} - \sigma_{сж}^{\min}}, \text{ МПа.} \quad (11)$$

где $\sigma_{раст}^{\max}, \sigma_{раст}^{\min}$ - соответственно максимальное и минимальное значение предела прочности на сжатие, полученные при испытании образцов руды, кг/см^2 ; $\sigma_{сж}^{\max}, \sigma_{сж}^{\min}$ - соответственно

ственно максимальное и минимальное значение предела прочности на растяжение, полученные при испытании образцов руды, кг/см².

Оценка зависимостей (7-11) по критерию разностного ряда [3] показала, что различие сравниваемых рядов экспериментальных и расчётных значений несущественно. Зависимости могут быть использованы для определения значений прочностных характеристик горного массива.

Тогда формулу (1) можно переписать в следующем виде:

$$V_0 = a_0(p_{ж}/c_{раст})^{1/2} = a_0 p_{ж} / [\sigma_{раст}^{\min} + \Delta\sigma_{сж}(\sigma_{сж} - \sigma_{сж}^{\min})]^{1/2} = a_0 p_{ж} / \{ \Delta\sigma_{сж} [\sigma_{сж}^{\max} (\frac{\alpha - \alpha_{\min}^{\min}}{\Delta\alpha} + 1) - \sigma_{сж}^{\min}] + \sigma_{раст}^{\min} \}^{1/2} \quad (12)$$

Из зависимостей (1,12) следует, что величина радиуса регулируемого дробления V_0 однозначно связана с качеством полезного ископаемого на взрываемом участке, характеризующимся содержанием полезных ископаемых в горной породе.

В ранее проведённых работах показано [5, 6], что для достижения наилучшего разрушения и раскрытия минеральных агрегатов, состоящих из полезных ископаемых и вмещающих пород, удельный расход ВВ должен в том числе определяться в зависимости от содержания полезных ископаемых на взрываемых участках. Чрезмерное количество ВВ приведёт к переизмельчению материала, разубоживанию полезных ископаемых вмещающей породой, и в конечном итоге - к снижению извлечения металла. Недостаточный удельный расход ВВ способствует уменьшению разрушения минеральных агрегатов по границам их срастания, за счёт чего также увеличиваются потери полезных компонентов. В наших исследованиях выявлена зависимость удельного расхода ВВ для участков взрываваемых руд в зависимости от содержания в них полезных ископаемых, при этом, возможно получить требуемое разрушение минеральных агрегатов при уста-

Зависимость удельного расхода ВВ от содержания металла на взрываемом участке

новленных рациональных параметрах взрывания. Приведённые выше данные позволяют определить радиус регулируемого дробления, а значит и сетку скважин, в зависимости от содержания полезных ископаемых на взрываемом участке, и, соответствующей прочности отдельностей. В данном случае имеет смысл говорить о радиусе регулируемого разрушения. В отличие от радиуса регулируемого дробления, в границах которого при взрыве заряда ВВ обеспечивается проектная технология ведения горных работ, то есть заданная работа экскаваторов, отсутствие негабаритных кусков, требуемая проработка подошвы, в пределах радиуса регулируемого разрушения обеспечивается качественное разрушение и селективное раскрытие минеральных агрегатов, что позволяет произвести отделение зерен, содержащих полезные ископаемые, от вмещающей породы при переработке минерального сырья. Обоснование количественной оценки различия радиуса регулируемого дробления и радиуса регулируемого разрушения приведена в [2].

Проведёнными исследованиями установлены уравнения связи между физико-техническими характеристиками полезных ископаемых, содержанием полезных компонентов на взрываемых участках и удельным расходом ВВ g , для Сорского месторождения (рисунок).

$$g = \alpha / (3,705 + 1,087 \alpha), \text{кг/м}^3 \quad (13)$$

Корреляционное отношение между g и α $\eta = 0,93$, проверка по критерию Стьюдента [4] подтвердила его значимость.

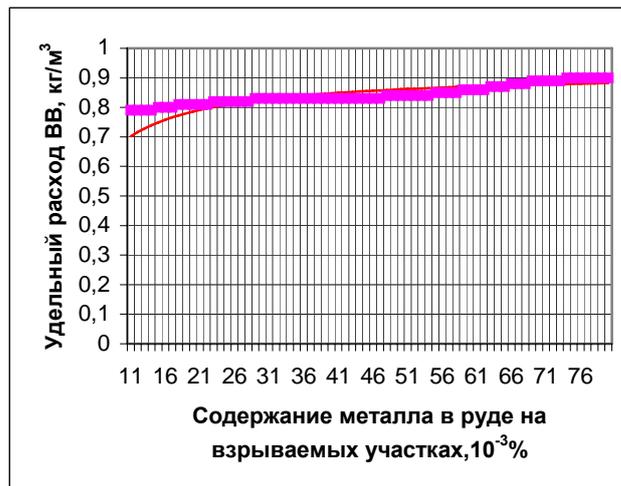


Таблица 3

Параметры взрывных работ, рекомендуемые для Сорского месторождения.

№ п/п	Содержание металла на взрывае- мых участках, $\alpha, 10^{-3}\%$	Предел прочности образцов на рас- тяжение, $\sigma_{раст}$, кг/см ² (МПа)	Предел проч- ности образцов на сжатие, $\sigma_{сж}$, кг/см ² (МПа)	Радиус ре- гулируе- мого дробления,	Усреднен- ная сетка скважин, а х в, м	Удель- ный рас- ход ВВ, г, кг/м ³
1.	11	294(28,8)	2462(241,4)	1,99	3,9	0,70
2.	22	263(25,8)	2137(209,5)	2,03	4,1	0,79
3.	31	238(23,3)	1872(183,5)	2,14	4,3	0,83
4.	39	216(21,2)	1636(160,4)	2,24	4,5	0,84
5.	45	200(19,6)	1459(143)	2,33	4,7	0,85
6.	51	183(17,9)	1282(125,2)	2,44	4,9	0,86
7.	56	149(16,6)	1134(111,2)	2,53	5,1	0,86
8.	61	156(15,3)	987(96,8)	2,64	5,3	0,87
9.	65	145(14,2)	869(85,2)	2,74	5,5	0,87
10.	68	136(13,6)	780(76,5)	2,83	5,7	0,87
11.	72	125(12,3)	662(64,9)	2,94	5,9	0,88
12.	75	117(11,5)	574(56,3)	3,04	6,1	0,88
13.	78	109(10,7)	485(47,5)	3,15	6,3	0,88

Таблица 4

Пример расчёта энергии взрыва по скважине для условий Сорского месторождения при высоте уступа 10 м

№ п/п	Глубина за- ряжаемого участка, Н _i м	Свойства взрывае- мого участка $\sigma_{раст}/\sigma_{сж}/\alpha, \text{МПа}/10^{-3}\%$	Удельный расход ВВ, г, кг/м ³	Сетка сква- жин, а х в, м	Взрывае- мый объём на метр уступа, V, м ³ /м
1.	1	26,7/218,8/19	0,78	4,0x4,0	16,00
2.	7	25,0/200,9/25	0,81	4,1x4,1	16,81
3.	2	23,1/180,6/32	0,83	4,3x4,3	18,49
4.	4	17,7/122,8/52	0,86	4,9x4,9	24,01
5.	9	12,8/70,2, /70	0,88	5,8x5,8	33,64
6.	8	11,8/59,1/74	0,88	6,0x6,0	36,00

Анализ полученной зависимости (13) пока-
зал, что для условий Сорского месторождения
она описывается теоретическим уравнением

$$g = \alpha / [2(g_{\min} + g_{\max}) + g_{\min}] + (1 + \Delta) \alpha \quad (14)$$

где g_{\min} и g_{\max} – соответственно минимальное и
максимальное значения удельного расхода ВВ,
возможные для горно-геологи-ческих условий
месторождения, кг/м³; g_{\min} – минимальное зна-
чение удельного расхода ВВ по расчётным
данным, кг/м³;

Различие сравниваемых рядов эксперимен-
тальных и расчётных значений несущественно.
Зависимости могут быть использованы для оп-
ределения значений удельного расхода ВВ при
различном содержании металла в породе на
взрывае-мых участках и физико-технических
свойств массива.

В табл. 3 приведены рекомендуемые пара-
метры взрывных работ, определенные на осно-
вании зависимостей (1-14), учитывающих со-
держание металла от 11 до 80 у.е. величину B_0
от 1,9 до 3,2 м, диаметр скважины- 250 мм, ВВ
- граммнит 79/21(давление газов взрыва в
точке Жуге принято 6800 МПа).

Метод определения параметров взрыв- ных работ

Информация для определения параметров
взрывных работ на рудных карьерах осуществ-
ляется, как правило, на основании химического и
визуального анализа бурового шлама и ана-
лиза данных по степени дробления, выходе не-
габарита при взрывании и отработке на выше-
лежащих горизонтах и других косвенных оце-
нок. Это приводит к низкой степени прогнози-
руемости качества взрывных работ, и впослед-
ствии к образованию порогов, большому выхо-

ду негабарита, неполному разрушению сростков минеральных агрегатов полезных ископаемых и вмещающих пород, что снижает эффективность процессов последующей переработки. Предлагается осуществлять поинтервальный анализ физико-технических свойств при бурении скважин, например, через 1 м проходки. Интервал опробования должен определяться с учётом особенностей и промышленной ценности каждого месторождения.

Если рассматривать величину V_0 , определённую по формуле (1), как радиус регулируемого дробления на единице высоты скважины (например, на 1 метре), то его величина будет меняться по высоте скважины в соответствии с изменением $\sigma_{раст}$. При квадратной сетке скважин, когда расстояния между скважинами A и между рядами скважин B равны, справедливо соотношение:

$$A = B = 2V_0 = 2a_0(p_{ж}/\sigma_{раст})^{1/2}, \quad (15)$$

Объём полезного ископаемого, взрываемо-го одной скважиной глубиной H , составит:

$$V_c = ABH = 8a_0^2 H(p_{ж}/\sigma_{раст}), \text{ м}^3 \quad (16)$$

Взрываемый объём, приходящийся на единицу высоты скважины (1 метр) в зависимости от прочности полезного ископаемого или содержания в нём полезных ископаемых:

$$V_i = AB = 8a_0^2(p_{ж}/\sigma_{раст}), \text{ м}^3 \quad (17)$$

Количество ВВ на единичную высоту скважины (1 метр) в зависимости от прочности полезного ископаемого или содержания в нём полезных ископаемых:

$$Q_i = 8f_i^2(h_i|\sigma_i)g \quad \text{гу} \quad (18)$$

где g -удельный расход ВВ, кг/м^3 .

Количество ВВ на скважину с учетом изменения прочности пород (содержания полезных ископаемых):

$$Q_i = \sum_{i=1}^H 8 a_0^2(p_{ж}/\sigma_i)gH_i \quad (19)$$

В реальных условиях ведения горных работ при бурении цилиндрических скважин долотом постоянного диаметра изменение удельного расхода ВВ по высоте скважин трудноосуществимо: так как промышленность не выпускает технически совершенных устройств для расширения скважин, а при использовании станков огневого бурения невозможно проконтролировать диаметр скважин и эти станки могут применяться только в породах, не склонных к возгоранию. Формула (19) позволяет в целом определить количество ВВ на скважину, необ-

ходимое для разрушения сростков минералов полезного ископаемого с учётом прочности породы на каждом участке по её длине. В условиях производства при бурении скважин в неравномерных по прочности породах коэффициент разбуривания может варьировать в пределах 10-20 %. Соответственно, вместимость скважин по высоте уступа будет меняться на десятки %. При этом, поскольку больший диаметр скважин чаще всего наблюдается при проходке участков более слабых пород (в том числе вывалы кусков из стенок скважин), большее количество ВВ по высоте попадает на уровень полезных ископаемых с меньшими прочностными характеристиками. Таким образом, чаще всего наблюдается картина, когда фактически заряжаемое количество ВВ распределяется обратно пропорционально прочности полезных ископаемых. Поэтому при взрывании сложноструктурных блоков полезных ископаемых необходимо разрабатывать специальные мероприятия: цементацию скважин, их «шлифовку» буровым долотом, уменьшение скорости подачи бурового става на участках, сложенных прочными породами и т.д.

Поинтервальные значения физико-технических свойств возможно определить по опытным данным скорости проходки долота при бурении скважин. Наиболее полно эта информация представлена в исследованиях Тангаева И.А. [5].

Пример расчёта удельного расхода ВВ для условий Сорского месторождения по предлагаемому методу (формулы 1-19) представлен в табл. 4. Диаметр скважины- 250 мм, ВВ – граммонит 79/21.

Практическая реализация способа усложняется тем, что в соответствии с действующими правилами, обуривание взрывного блока производится по проекту, утверждённому техническим руководителем рудника. Без согласования корректировать сетку скважин по результатам проходки каждой скважины запрещено. При невозможности такого согласования целесообразно проведение поинтервального опробования и использование его результатов при составлении проекта на массовый взрыв. По мере накопления достаточной статистической информации результатов интервального опробования и её систематизации будут выявляться характерные, геологические участки месторождения и разрабатываться для них типовые параметры буровзрывных работ.

Предлагаемый метод определения расхода ВВ на основании поинтервального определения физико-технических свойств взрывающего массива предпочтительнее существующего, в соответствии с которым g определяется скорее интуитивно (на основе опыта работ), как было

отмечено выше. Метод позволяет достигать более качественного взрывания, с прогнозируемой степенью дробления массива и полной раскрытия минеральных зерен (сростков), что приведет соответственно к снижению себестоимости рудоподготовки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Покровский Г.И.* Взрыв. – М.: Недра, 1972.
2. *Крюков Г.М., Глазков Ю.В.* Феноменологическая квазистатическо- волновая теория деформирования и разрушения материалов взрывом зарядов промышленных ВВ: Отдельные статьи Горного информационно-аналитического бюллетеня. - 2003. - М: Изд-во МГТУ. - №11. - 67 с.
3. *Демидюк Г.П., Викторов С.Д., Фукзан М.М.* Влияние взрывного нагружения на эффективность последующих этапов обогащения.- В кн.: Взрывное дело, № 89/46. – М.: Недра. – С. 116-121.
4. *Шестаков Ю.Г.* Математические методы в геологии. Красноярск: Изд-во Красноярского ун-та, 1988. - 208 с.
5. *Хмельковский И.Е., Аврамов В.Е., Чихачёв О.М., Урбаев А.О.* Интенсификация избирательного дробления руд взрывом. В сб. Управление качеством сырья, промпродуктов и продуктов горного, горно-обогатительного и металлургического переделов. Красноярск, 1985, – С. 46-47.
6. *Чихачёв О.М., Савушкина С.И., Оверин В.И., Страгис Ю.М.* Интенсификация взрывной отбойки бедных руд Сорского месторождения. В сб. Проблемы интенсификации производства на предприятиях края. Красноярск, 1987, с.28.
7. *Тангаев И.А.* Энергоёмкость процессов добычи и переработки полезных ископаемых. – М.: Недра, 1986, 232 с.

Коротко об авторах

Чихачев Олег Михайлович – аспирант, кафедра «Разрушение горных пород взрывом», Московский государственный горный университет.

ДИССЕРТАЦИИ

ТЕКУЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ О ЗАЩИТАХ ДИССЕРТАЦИЙ ПО ГОРНОМУ ДЕЛУ И СМЕЖНЫМ ВОПРОСАМ

Автор	Название работы	Специальность	Ученая степень
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ ГОРНОЙ ГЕОМЕХАНИКИ И МАРКШЕЙДЕРСКОГО ДЕЛА – МЕЖОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР ВНИИ			
ВОВК Александр Иванович	Геомеханическое обоснование и разработка параметров подготовки парными выработками угольных пластов Воркутинского месторождения	25.00.22	к.т.н.

