



УДК 622.243:622.24.08:550.8.053

## ОПЫТ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ СПОСОБОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ МЕХАНИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ БУРЕНИИ СКВАЖИН

Карпов В.Н., Конури́н А.И., Орлов Д.В.

Институт горного дела им. Н.А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук



### Информация о статье

Поступила:

19 января 2024 г.

Рецензирование:

28 марта 2024 г.

Принята к печати:

25 апреля 2024 г.

### Ключевые слова:

Бурение, скважина, способ, эффективность, акустический способ, долото, диаграмма эффективности, ударно-вращательное бурение, прочность, производительность, износ, ресурс, себестоимость, режимы, параметры, инденторы, циклограмма рейса, нейросеть, датасет, искусственный интеллект.

**Аннотация.** В работе рассмотрен опыт применения способов исследования процесса воздействия исполнительных органов горных машин при ударно-вращательном, вращательно-ударном и вращательном бурении скважин на горнодобывающих предприятиях России. Приведены примеры идентификации основных и вспомогательных операций бурового процесса по данным видео- и акустических записей. Рассмотрена циклограмма спектрального анализа акустических данных при пневмоударном бурении глубокой взрывной скважины. На основе записи акустических и видеоданных бурового процесса приведены примеры определения механической, рейсовой скорости бурения и себестоимости прямых затрат. Предложено модифицированное выражение определения местных технических норм выработки (производительности). Представлены разработанные модели технико-экономической эффективности бурения скважин и их применение на карьере и в руднике. Рассмотрены примеры определения ресурсных параметров бурового инструмента и погружных пневмоударников. Приведены результаты исследования по определению рациональных режимов ударно-вращательного бурения скважин в прочных горных породах. Предложено выражение для определения пути износа инденторов в зависимости от расположения в матрице долота при ударно-вращательном бурении скважин. Представлена разработанная диаграмма оценки износа инденторов долота при ударно-вращательном бурении скважин. Приведены результаты исследования механического разрушения горных пород погружными пневмоударниками с различными мощностными характеристиками. Рассмотрены методы экспресс-анализа акустических записей процесса бурения. Предложен алгоритм обучения нейросети в автоматическом режиме, позволяющий определять текущие значения энергоэффективности бурения и предлагать режимы бурения с минимальной энергоемкостью разрушения горной породы.

**Для цитирования:** Карпов В.Н., Конури́н А.И., Орлов Д.В. Опыт и перспективы применения способов исследования процессов механического разрушения горных пород при бурении скважин // Техника и технология горного дела. – №2(25). – С. 41-78. – DOI: 10.26730/2618-7434-2024-2-41-78, EDN: FKRTBM

### Введение

Бурение скважин является важнейшим технологическим процессом в освоении месторождений полезных ископаемых (ПИ) – от разведки до промышленной разработки. Вместе с устойчивой динамикой роста добычи твердых ПИ в мире существует тенденция увеличения глубины ведения горных работ, которая связана с повышением прочностных свойств породного массива и увеличением затрат на подготовку горной массы к выемке (примерно на 10-12% на каждые 100 м) [1-4]. Также с углубкой горных работ увеличивается рост затрат на бурение скважин. К примеру, при увеличении прочности горных пород с 60 до 180 МПа рост затрат на



бурение повышается примерно в 10 раз, а на взрывные работы – только в 2 [5]. Таким образом, увеличение темпов добычи полезных ископаемых и естественная углубка месторождений предъявляет новые требования к повышению эффективности буровых технологий. Следовательно, организация производства буровых работ на месторождениях твердых полезных ископаемых должна быть направлена на энергоэффективное увеличение производительности бурения скважин при минимальных технико-экономических затратах [6-10]. Это требует разработки новых методов и средств повышения эксплуатационных характеристик и надежности буровых машин и оборудования, отражающих организационную, технико-технологическую и технико-экономическую эффективность их применения [11-15].

Для создания новых и совершенствования применяемых горных машин и породоразрушающего инструмента были разработаны способы исследования процесса воздействия исполнительных органов горных и строительных машин на разрабатываемый массив геосреды [16, 17]. В первом способе [16] для регистрации бурового процесса используется цифровой видеорегистратор (камера). В этом способе акустические данные, полученные из видеозаписи бурового процесса, обеспечивают наглядное изучение и расшифровку буровых операций во времени, а также удобство и скоротечность обработки результатов исследований. Тем не менее, в предложенном способе видеоматериал является опорным, так как он позволяет идентифицировать операции бурового процесса и привязать их к акустическим данным.

Второй способ [17] является перспективным продолжением первого способа исследования, ориентированного на самостоятельное распознавание всех буровых операций по акустическим сигналам (в различных средах).

### Основная часть

Рассмотрим опыт применения предложенных способов при оценке эффективности бурения технологии ударно-вращательного бурения скважин в Таштагольском руднике. В Таблице 1 приведены физико-механические свойства магнетитовой руды с места проведения опытно-промышленных испытаний [18].

Таблица 1. Физико-механические свойства магнетитовой руды  
Table 1. Physical and mechanical properties of magnetite ore

Показатель	Значение
Прочность, МПа	150
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	3950
Скорость продольной волны, м/с	3100
Категория трещиноватости	III
Расстояние между трещинами, м	0,8

На Рис. 1 представлен базовый комплект шахтной измерительной аппаратуры, а также буровое оборудование, используемое в ходе исследований.

На Рис. 2 представлен фрагмент циклограммы акустической записи операций бурения в шахтных условиях. В ходе работ особое внимание уделялось изучению основных и вспомогательных операций бурения по частотно-амплитудному и спектральному анализу акустической записи, в связи с чем в эксперимент были включены дополнительные операции. Так, процесс бурения глубокой взрывной скважины (скважина №1) прерывался с целью позиционирования бурового станка для забуривания очередной скважины взрывного пучка (скважина №2), после которого было выполнено обратное позиционирование станка с последующим бурением первой скважины.

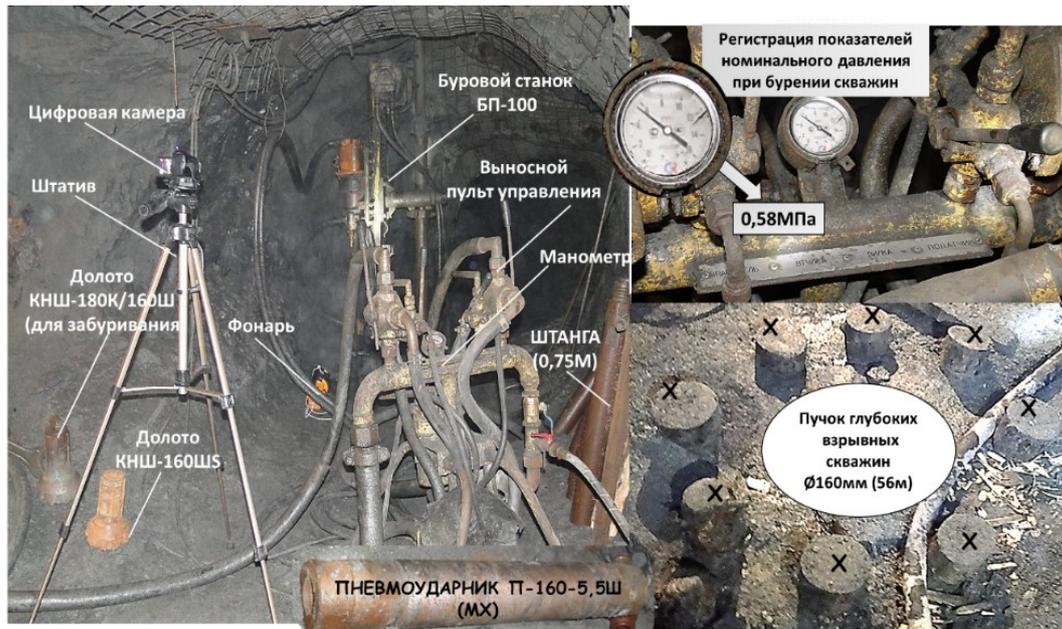


Рис.1. Комплект шахтного экспериментального оборудования  
 Fig. 1. Bindle of mining experimental equipment

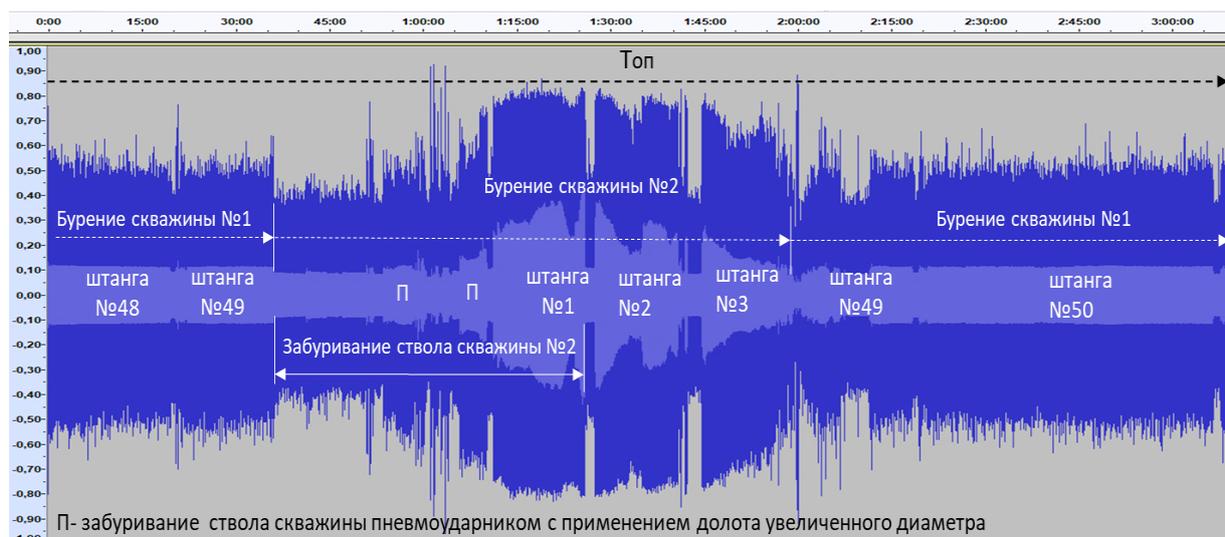


Рис. 2. Акустическая запись пневмоударного бурения в руднике Таштагол  
 Fig. 2. Acoustic record of air hammer drilling in Tashtagol ore mine

На Рис. 3 представлен аналогичный фрагмент записи, но уже после выполнения линейного спектрального анализа акустических данных.

Опыт применения способов также связан с определением таких важных параметров, как механическая  $V_M$ , рейсовая  $V_p$  скорости бурения, а также себестоимость прямых затрат  $C$ . Определение механической  $V_M$  и рейсовой  $V_p$  скоростей выполняется по формуле (1)

$$V_M = \frac{L}{t_{\text{осн}}}; \quad V_p = \frac{L}{(t_{\text{осн}} + t_{\text{вс}})} \quad (1)$$

где  $L$  – линейные размеры контрольного участка;  $t_{\text{вс}}$  – время вспомогательных операций;  $t_{\text{осн}}$  – время основных операций (чистое бурение).



Важно отметить, что для определения буримости акустические записи использовались как основные. В этом случае количество участков измерения механической и рейсовой скорости бурения определялось по количеству забуриваемых штанг, необходимых для проходки скважины, а линейные размеры измерительных участков принимались равными длинам буровых штанг. Исключение составляют первый контрольный участок  $L_1$  и последний  $L_T$ . На Рис. 4 в общем виде приведен пример циклограммы рейса буримой скважины для шахтных буровых станков типа НКР100М, СБУ-6, БП100, БУГ200 и др. При этом в интервале бурения  $L_1$  при ударно-вращательном бурении скважин погружными пневмударниками учитываются их линейный размер (с породоразрушающим инструментом) и длина первой буровой штанги, погруженной в породный массив. Завершающий интервал бурения имеет свою технологическую длину  $L_T$ , он определяется с учетом требуемой глубины скважины, размеров участка  $L_1$  и буровой колонны, расположенной в стволе скважины.

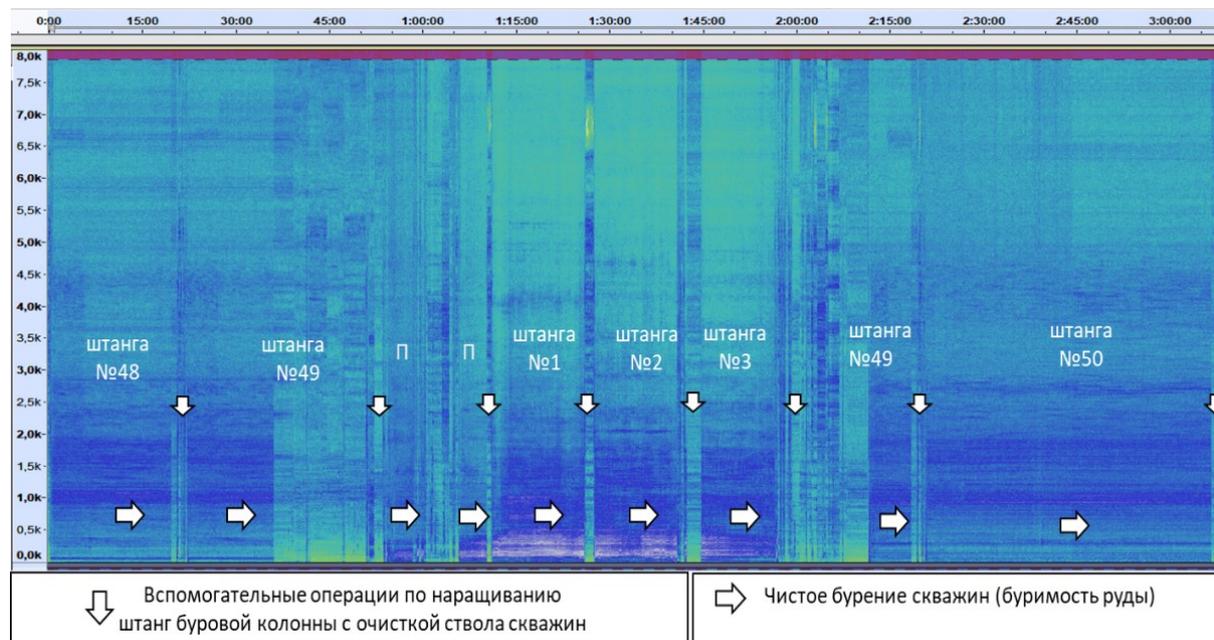


Рис. 3. Циклограмма спектрального анализа акустических данных пневмударного бурения в руднике Таштагол

Fig. 3. Cyclogram of spectral analysis of acoustic data of pneumatic shock drilling in Tashtagol mine



Рис. 4. Циклограмма рейса буримой скважины на буровом станке БП100:  $L_1 - L_T$  – измерительные участки с известными линейными размерами, м;  $t_{vc1} - t_{vst}$  время вспомогательных операций, мин;  $t_{oc1} - t_{ost}$  время основных операций (чистое бурение), мин;  $t_{on1} - t_{ont}$  оперативное время забуриваемых штанг буровой колонны, мин;  $T_{op}$  – оперативное время бурения скважины, мин.

Fig. 4. Cyclogram of the drilled borehole trip on the drilling machine БП100:  $L_1 - L_T$  are measuring sections with known linear dimensions, m;  $t_{vs1} - t_{vst}$  is a time of auxiliary operations, min;  $t_{os1} - t_{ost}$  is a



time of main operations (clean drilling), min;  $t_{оп1-t_{оп}}$  is an operational time of drill string rods being drilled, min;  $T_{оп}$  – operational time of drilling the well, min.

Значительное внимание при разработке предложенного способа исследования уделялось определению себестоимости прямых затрат на бурение взрывных скважин [16]. В Таблице 2 приведен пример результатов расчета себестоимости прямых затрат на бурение глубокой взрывной скважины длиной 56 м на шахтном буровом станке БП100, а также используемые для этого исходные данные горнодобывающего предприятия [18].

Таблица 2. Исходные данные и результаты расчета технико-экономической эффективности бурения взрывной скважины на станке БП100

Table 2. Initial data and results of calculation of technical and economic efficiency of drilling an explosive borehole on the BP100 machine

$L$	$V_M$	$V_p$	$t_{bc}$	$t_{oc}$	$t_{оп}$	$C_{в1}$	$C_{в2}$	$C_{в}$	$C_{ж}$	$C_{э}$	$C_{зп}$	$C_б$	$C$
1	107	36	0,23	0,12	0,35	99,3	116,2	215,5	6,8	222,3	217	472,4	911,7
5	57	52	0,02	0,22	0,24	8,6	213	221,6	4,6	226,2	148,8		847,4
10	50	47	0,015	0,25	0,26	6,4	242,1	248,5	5,1	253,6	164,3		890,3
15	47	37	0,07	0,26	0,33	30,2	251,7	282	6,4	288,4	204,6		965,4
20	42	36	0,048	0,29	0,33	20,7	280,8	301,5	6,5	308	209,5		989,9
25	38	34	0,038	0,32	0,35	16,4	309,8	326,3	6,9	333,2	221,9		1027,5
30	27	9,6	0,83	0,46	1,29	358,5	445,4	804	25,1	829,1	799,8		2101,3
35	35	32	0,03	0,35	0,38	12,9	338,9	351,9	7,4	359,3	235,6		1067,3
40	31	27	0,058	0,4	0,45	25	387,3	412,4	8,9	421,3	283,9		1177,6
45	29	24	0,088	0,43	0,51	38	416,4	454,4	10,1	464,5	321,1		1258
50	25	20	0,125	0,5	0,62	54	484,2	538,2	12,1	550,3	387,5		1410,2
56	23	5	1,95	0,54	2,49	842,4	522,9	1365,3	48,5	1413,8	1543,8	3430	
Значения средних показателей основных затрат на бурение								460,1	12,3	472,4	394,8	472,4	1339,7
Вспомогательные показатели для расчета $C$ :													
$L$ – контрольные участки, п.м; $t_{bc}$ – время вспомогательных операций, ч; $t_{очн}$ – время чистого бурения, ч; $t_{оп}$ – оперативное время бурения контрольного участка ( $t_{bc} + t_{очн}$ ); $C_{в1}$ – затраты на воздух без работы пневмоударника; $C_{в2}$ – затраты на воздух при чистом бурении; $C_{в}$ – общие затраты на воздух ( $C_{в1} + C_{в2}$ ); $C_{ж}$ – затраты на техническую воду; $C_{э}$ – общие затраты на энергоносители ( $C_{в} + C_{ж}$ ); $C_б$ – затраты на буровое оборудование и смазочные материалы; $C_{зп}$ – зарплата машиниста буровой установки.													
Исходные данные для расчета себестоимости прямых затрат на бурение взрывной скважины диаметром 160 мм на станке БП100													
№	Показатели											Стоимость расходов, руб/п.м	
1	БП-100											57	
2	Пневмоударник П-160-5,5 Ш											255,4	
3	Долота КНШ-160											123,3	
4	Штанга БП											33,5	
5	Масло											3,2	
6	Воздух, руб/1000м <sup>3</sup>											600	
7	Техническая вода, руб/т											16,3	
8	Затраты на воздух при бурении скважин с расходом 26,9 м <sup>3</sup> /мин, руб/ч											968,4	
9	Затраты на воздух при спускоподъемных операциях (без работы пневмоударника) с расходом 12 м <sup>3</sup> /мин, руб/ч											504	
10	Затраты на техническую воду при расходе 20 л/мин, руб/ч											19,5	
11	Зарплата машиниста буровой установки, руб/ч											620	



Расчет себестоимости прямых затрат производится для каждого контрольного участка буримой скважины по формуле:

$$C = C_э + C_б + C_{зп}, \tag{2}$$

где  $C_э$  – затраты на все виды энергоносителей, потребляемых буровым станком в течение оперативного времени бурения скважины, руб/п.м;  $C_{зп}$  – зарплата бурильщика, руб/п.м;  $C_б$  – затраты на буровое оборудование и смазочные материалы, руб/п.м.

Учитывая, что различные буровые станки могут потреблять разные виды энергоносителей, то при определении  $C_э$  необходимо использовать каждый из них. В (3) пример выражения для расчета затрат на энергоносители  $C_э$  с тремя потребляемыми источниками энергии:

$$C_э = C_в + C_ж + C_{дт}, \tag{3}$$

где  $C_в$  – стоимость потребления воздуха, руб/п.м;  $C_ж$  – стоимость потребления воды, руб/п.м;  $C_т$  – стоимость потребления электричества, руб/п.м;  $C_{дт}$  – стоимость дизельного топлива, руб/п.м. Использование двух и более энергоносителей для бурения скважин – не редкость, особенно для шахтных самоходных буровых установок [19].

Затраты на буровое оборудование  $C_б$  определяются по формуле:

$$C_б = C_а + C_д + C_п + C_{шт}, \tag{4}$$

где  $C_а$  – амортизация бурового станка, руб/п.м,  $C_д$  – затраты на буровое долото по фактическим результатам испытаний, руб/п.м;  $C_п$  – стоимость расходов на погружной пневмоударник с учетом установленных ресурсных характеристик, руб/п.м,  $C_{шт}$  – стоимость расходов на буровые штанги с учетом установленных ресурсных характеристик, руб/п.м.

Удельная себестоимость затрат для пробуренной скважины  $C$  определяется по формуле:

$$C = (C_э + C_б + C_{зп})/L_{скв}, \tag{5}$$

где  $C_э$  – затраты на все виды энергоносителей, потребляемых буровым станком и пневмоударником в течение оперативного времени бурения скважины, руб/п.м;  $C_{зп}$  – зарплата бурильщика, руб/п. м;  $C_б$  – затраты на буровое оборудование, руб/п.м,  $L_{скв}$  – длина скважины, м.

С опорой на результаты расчета технико-экономической эффективности ударно-вращательного способа бурения трех взрывных скважин на буровом станке БП100 на Рис. 5 построены диаграммы себестоимости прямых затрат для каждого случая.

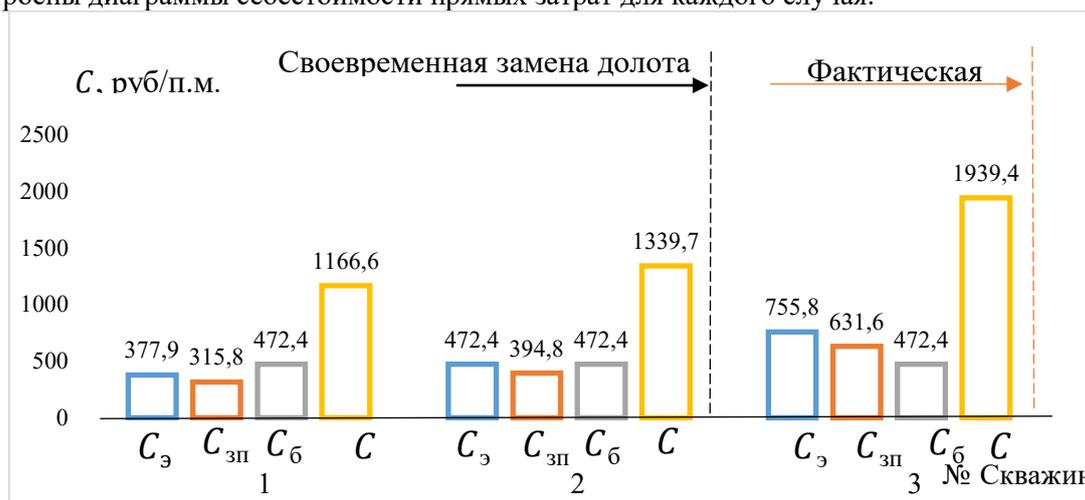


Рис. 5. Диаграмма себестоимости прямых затрат на бурение трех взрывных скважин пневмоударником П-160-5,5Ш на станке БП-100

Fig. 5. Diagram of direct cost of drilling three blast holes with pneumatic hammer P-160-5,5Sh on BP-100 machine



Из Рис. 5 видно, что удельные показатели затрат на энергоносители  $C_3$  при бурении второй скважины сравнялись с затратами на буровое оборудование и смазочные материалы  $C_6$ , при бурении третьей произошел резкий спад производительности бурения с одновременным ростом затрат на энергоносители  $C_3$  и заработную плату буровой бригады  $C_{зп}$ , превышающих затраты на буровое оборудование и смазочные материалы  $C_6$ .

В ходе опытно-промышленных испытаний с применением предложенных способов исследованиями установлено, что при бурении взрывных скважин глубиной свыше 50 метров оценку эффективности буровых работ целесообразно проводить до полного выполнения технологической задачи – пробуренной скважины, с учетом полного количества рейсов, пройденных в течение оперативного времени всех рабочих смен. В случае прохождения глубокой взрывной скважины за один рейс важно выполнять оценку состояния породоразрушающего инструмента на предмет его абразивного износа и экономической целесообразности повторного использования, к примеру, после заточки породоразрушающих элементов [20-23].

Рассмотрим пример определения абразивного износа инденторов буровых долот для ударно-вращательного бурения скважин. В производственных условиях его оценку целесообразно осуществлять по коэффициенту абразивного износа твердосплавных инденторов  $k_a$ , по формуле:

$$k_a = d_z/d_i, \quad (6)$$

где  $d_z$  – ширина площадки износа; мм,  $d_i$  – диаметр индентора, мм.

При  $d_z = d_i$  происходит полный износ индентора. Измерения могут проводиться как непосредственно на месте проведения буровых работ при помощи штангенциркуля, так и с использованием цифровых фотоматериалов и компьютера [24, 25].

На Рис. 6 показаны площадки износа инденторов и вариант средства измерения.



Рис. 6. Оценка абразивного износа буровых долот пневмоударника

Fig. 6. Assessment of abrasive wear of pneumatic hammer drill bits

Практика испытаний бурового оборудования ИГД СО РАН, а также мировой опыт показали, что при бурении глубоких скважин оценку абразивного износа необходимо осуществлять после каждого рейса буримой скважины, при массовом бурении взрывных скважин на открытых горных работах в начале и в конце каждой смены; при бурении по абразивным породам через 1/2 смены. Общепринятыми параметрами заточки инденторов буровых долот в мировой практике ударно-вращательного бурения является соотношение 1/4 - 1/3 площадки износа индентора к его диаметру, т.е при  $k_a = 0,25 - 0,3$ . При  $k_a \geq 0,5$ , производится замена бурового долота [20].



В условиях мягких горных пород, где твердосплавные инденторы в меньшей степени изнашиваются в течение рейсов буримых скважин, чем матрица долота (Рис. 7), или при износе инденторов происходит чрезмерный износ матрицы.



Рис. 7. Оценка абразивного износа матрицы буровых долот пневмоударника  
Fig. 7. Assessment of abrasive wear of the matrix of pneumatic hammer drill bits

Для определения коэффициента абразивного износа матрицы предложена формула

$$k_M = h_{\text{п}}/h_{\text{в}} \quad (7)$$

где  $h_{\text{п}}$  – вылет индентора из тела матрицы долота;  $h_{\text{в}}$  – высота посадочного размера индентора в теле матрицы долота, размер которого известен [26].

При отсутствии заточки инденторов буровых долот их эксплуатация до полного износа породоразрушающих элементов нерациональна. Это ведет к поверхностному разрушению горных пород и, следовательно, к крайне низкой скорости бурения, сопоставимой с простоем, ввиду резкого увеличения затрат на энергоносители и оплату труда буровой бригады.

На Рис. 8 приведены результаты исследования по оценке производительности бурения (сменной нормы выработки) взрывных скважин по магнетитовой руде (Таблицы 1, 2). Действующая норма выработки  $H_{\text{в}}$  в период проведения экспериментов в Таштагольском руднике составляла 7 п.м [18], при этом давление шахтной сети обеспечивающего работу пневмоударника было номинальным (0,5-0,55 МПа). Проблема низкой производительности лежит в организационном, техническом и технологическом поле. Так, протяженность местного технического нормирования в рудниках зачастую не превышает двух рабочих смен, при этом учет режимов бурения, а также рекомендаций по режимам бурения в породном массиве различной прочности нередко отсутствует. В ходе проведенных исследований было установлено, что своевременная замена бурового долота после двух пробуренных скважин длиной 56 п.м пневмоударником П-160-5,5Ш обеспечивает повышение производительности бурения на 39%. При устранении остальных выявленных причин, рассмотренных в [18], ожидаемое увеличение производительности буровых работ повысится в 2 раза с месячной экономией денежных средств до 2 млн рублей включительно (в ценах 2016 года). Для повышения эффективности ударно-вращательного бурения скважин в рудниках следует своевременно выполнять замену не только буровых долот, но также и погружных пневмоударников. Из Рис. 8 видно, что замена бурового долота после четвертой скважины не увеличила производительность бурения по манганитовой руде. Это обусловлено тем, что в процессе бурения трех взрывных скважин (наработка на долото 168 п.м, коэффициент абразивного износа  $k_a > 0,5$ ) машина потеряла свои мощностные характеристики, что фактически привело к снижению технического ресурса более чем в 2 раза, а также к снижению ресурсных показателей ответственных узлов и агрегатов бурового станка [27, 28].

Проведение опытно-промышленных испытаний буровой техники на горнодобывающих предприятиях с применением предложенных способов позволило разработать и использовать



модели различных диаграмм технико-экономической эффективности бурения скважин. Опыт работ на карьерах и в рудниках позволил определить наиболее целесообразные из них. На Рис. 9 представлена разновидность модифицированной диаграммы оценки эффективности глубоких скважин [16].

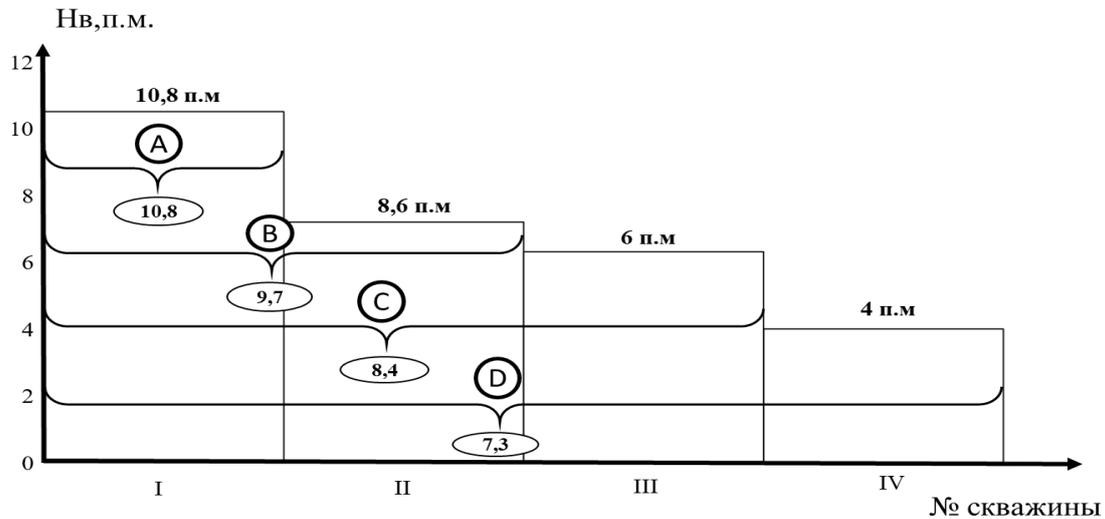


Рис. 8. Оценка производительности бурения глубоких взрывных скважин: А – для скважины I; В – для скважин I и II; С – для скважин I, II, III; D – для скважин I, II, III, IV  
Fig. 8. Estimation of drilling productivity of deep blast holes: A – for well I; B – for wells I and II; C – for wells I, II, III; D – for wells I, II, III, IV

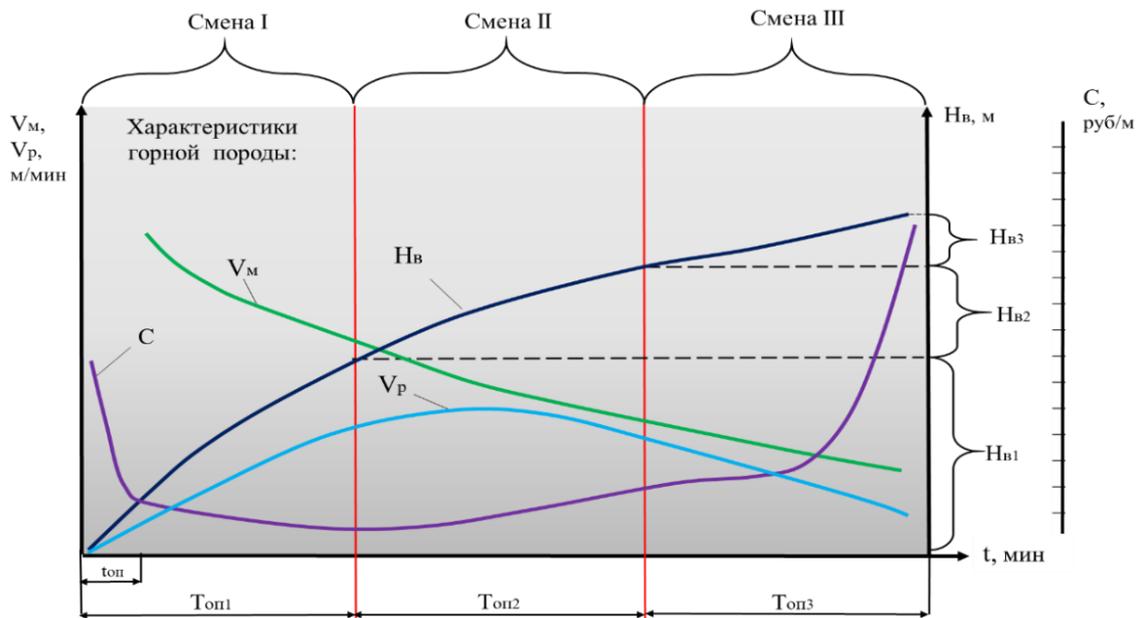


Рис. 9. Диаграмма технико-экономической эффективности бурения глубоких скважин:  $V_m$  – механическая скорость бурения, м/мин;  $V_p$  – рейсовая скорость бурения, м/мин;  $C$  – себестоимость прямых затрат на бурение 1 п.м, руб/п.м,  $T_{оп}$  – оперативное время бурения скважины(н) в течение рабочей смены, мин;  $H_v$  – техническая норма выработки в течение оперативного времени рабочей смены, п.м;  $t_{оп}$  – оперативное время забуривания штанги.

Fig. 9. Diagram of technical and economic efficiency of deep well drilling:  $V_m$  – mechanical drilling speed, m/min;  $V_p$  – voyage drilling speed, m/min;  $C$  – cost price of direct costs for drilling 1 p.m, rub/p.m,  $T_{op}$  – operational time of drilling a well(n) during the working shift, min;  $H_v$  – technical



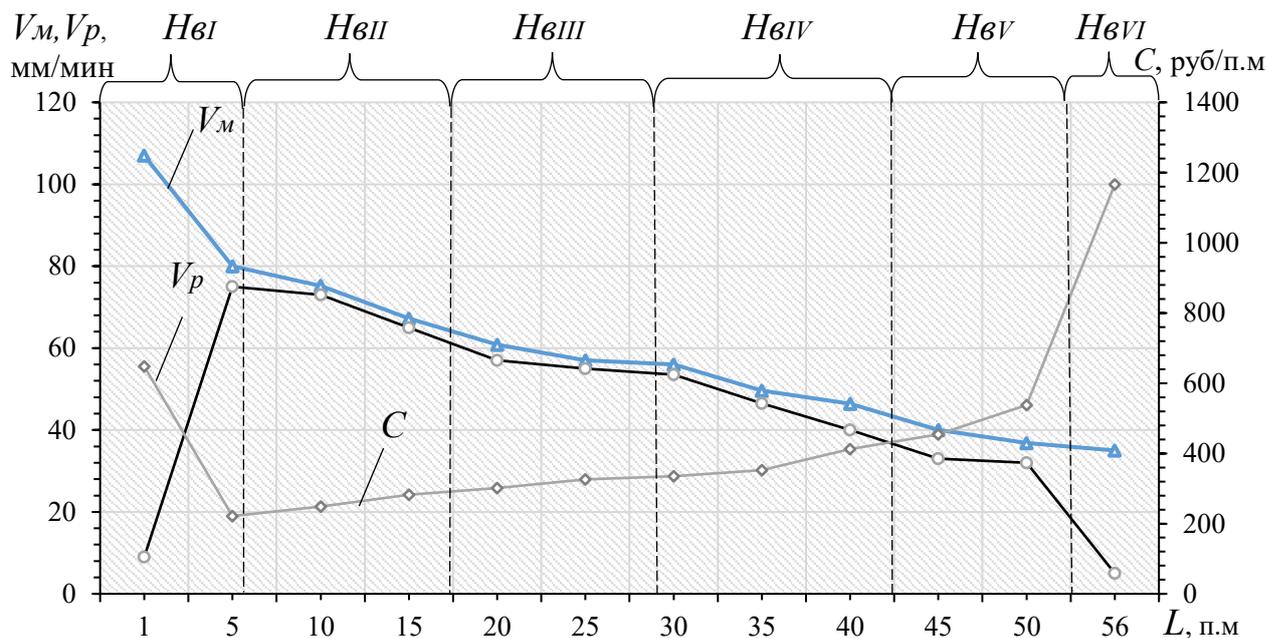


Рис. 11. Диаграмма технико-экономической эффективности бурения взрывной скважины на буровом станке БП100 по манганитовым кварцитам:  $V_m$  – механическая скорость бурения, м/мин;  $V_p$  – рейсовая скорость бурения, м/мин;  $L$  – проходка на долото, п.м;  $C$  – себестоимость прямых затрат на бурение 1 п.м, руб/п.м;  $H_{вI} \dots H_{вVI}$  – сменные нормы выработки в течение оперативного времени рабочих смен.

Fig. 11. Diagram of technical and economic efficiency of blast hole drilling on drilling machine BP100 on manganite quartzites:  $V_m$  – mechanical drilling speed, m/min;  $V_r$  – voyage drilling speed, m/min;  $L$  – rate of penetration per bit, per linear m;  $C$  – cost price of direct costs of drilling 1 p.l.m, rub/p.l.m;  $H_{вI} \dots H_{вVI}$  – shift norms of output during operational time of working shifts.

Удельное время основной работы и вспомогательной работ определялось с использованием значения показателей  $t_{oc}$  и  $t_{bc}$  по формулам:

$$t_{oy} = \frac{t_{oc}}{L}; t_{by} = \frac{t_{bc}}{L},$$

где  $L$  – длина пробуренной скважины, м.

Модифицированная формула для определения технической нормы выработки  $H_B$ :

$$H_B = \left( \frac{T_{оп} \cdot i}{t_{оп1} + t_{оп2} + t_{оп2\dots} + t_{опn}} \right) \cdot k_{п}, \quad (9)$$

где  $i$  – количество контрольных участков, ед;  $t_{оп1} \dots t_{опn}$  – удельное оперативное время прохождения контрольных интервалов с известными линейными размерами (мин/п.м).

Определение нормы времени при бурении скважин определяется по формуле:

$$H_{вр} = \frac{T_{см}}{H_B}. \quad (10)$$

При местном техническом нормировании буровых работ параметры  $T_{пз}, T_{от}, T_{л}$  устанавливает предприятие, как и продолжительность рабочей смены  $T_{см}$ . Их продолжительность зависит от действующей на предприятии нормативной базы и регламентов по ведению буровых работ, а также технико-эксплуатационных особенностей моделей буровых установок. Оперативное время бурения скважин  $T_{оп}$  рассчитывается последним, являясь одним из главных параметров для определения сменных норм выработки и норм времени  $H_{вр}$  буровых бригад, в связи с чем изучение и оценка эффективности буровых машин и породоразрушающего



инструмента в процессе бурения скважин должны выполняться с учетом параметра  $T_{оп}$ . Известно, что при опытно-промышленных испытаниях бурового оборудования процесс проходки скважин может прерываться ввиду технологической необходимости. В продолжение исследований [29, 30] при испытаниях технологии вращательно-ударного бурения глубоких дегазационных скважин пневмоударником ПНБ93-65 на станке БУГ200 процесс бурения глубокой дегазационной скважины диаметром 93 мм продолжался в течение оперативного времени двух рабочих смен, хотя сам процесс уложился в  $T_{оп}$  одной смены. Это вызвано тем, что в шахте выполнялись логистические перемещения монорельсового дизелевоза, что вызвало необходимость отклониться от плана выполнения буровых работ. На Рис. 12 приведен фрагмент акустической диаграммы бурового процесса на станке БУГ200, где на акустической записи зафиксировано прохождение монорельса. Следовательно, это время для расчета производительности бурения не учитывалось. Применение способов в режиме оценки эффективности бурения, состоящем из фрагментов бурового процесса, полученных в разные смены, не снижает объективности определения сменных норм выработки и времени по формуле (9). Учитывая, что технологические простои, вызванные перемещением дизелевоза, могут иметь регулярную основу, их изучение по видео-акустическим или акустическим данным позволяет объективно ввести понижающий коэффициент для рационального определения нормы выработки и времени. Важно отметить, что применение предложенных способов может использоваться для изучения и оптимизации логистических цепей в шахтах, рудниках, карьерах (разрезах).

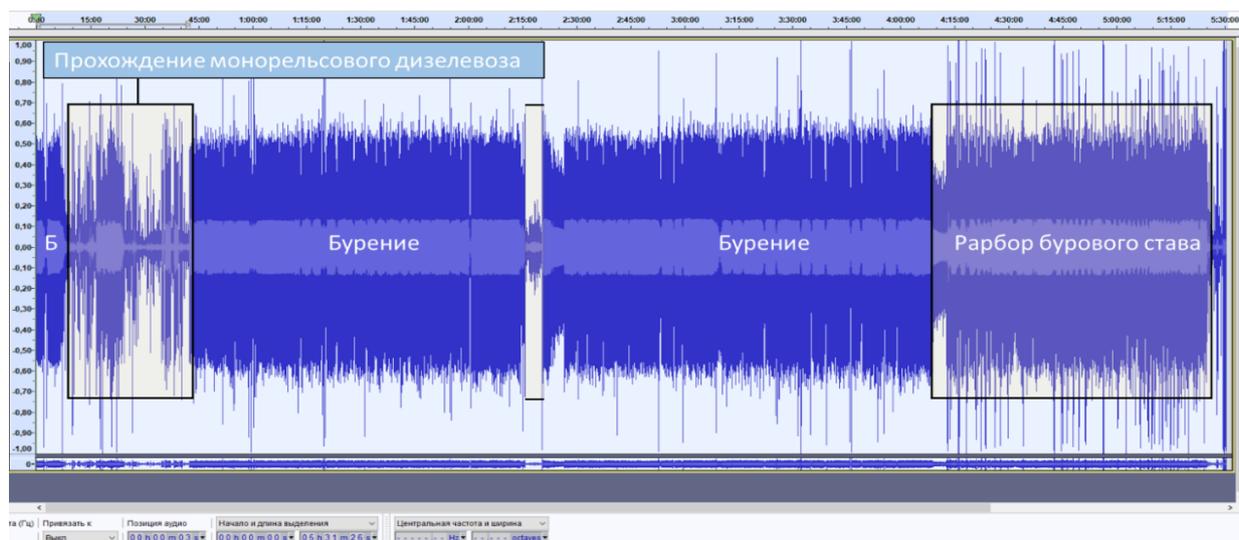


Рис. 12. Акустическая диаграмма проведения буровых работ на станке БУГ200  
Fig. 12. Acoustic diagram of drilling operations on the BUG200 machine

Использование предложенных способов для определения параметров производительности бурения глубоких взрывных скважин при местном техническом нормировании позволяет перейти к выбору рациональных норм выработки для предприятия с составлением рекомендаций. В Таблице 3 представлен пример оценки производительности бурения взрывных скважин  $\varnothing 160$  мм и глубиной 50 п.м погружным пневмоударником П-155Р (ИГД СО РАН) с долотом КНШ155Р (ИГД СО РАН) на буровом станке СБУ-6 (Рис. 13) при прохождении рейса в течение трех рабочих смен при номинальном давлении 0,45 МПа по породам прочностью 150 МПа в условиях Абазинского железорудного месторождения [17].

Результирующая таблица оценки производительности бурения вызывных скважин с учетом глубины, ФМС горных пород и контроля показателей режимов бурения позволяет перейти к рациональному техническому нормированию буровых работ и являться итоговой страницей интерфейса ПО электронного журнала эффективности бурения, вместе с электронными страницами с параметрами режимов бурения.



Рис. 13. Буровой станок СБУ-6 с погружным пневмоударником П-155Р  
Fig. 13. Drilling machine SBU-6 with submersible pneumatic hammer P-155P

Таблица 3. Оценка производительности бурения пневмоударником П-155Р на буровом станке СБУ-6 в горно-геологических условиях участка 4.8

Table 3. Estimation of drilling performance with pneumatic hammer P-155P on drilling machine SBU-6 in mining and geological conditions of site 4.8

Место проведения: участок 4.8 Скважина №1										
Т <sub>см</sub> , мин	(Т <sub>пз</sub> +Т <sub>от</sub> ), мин	Т <sub>л</sub> , мин	Станок: СБУ-6	Прочность породы: σ <sub>сж</sub> = 140МПа	Нижний полувеер: веер: Угол - 90°					
420	40	10	Пневмоударник: П155Р; Долото: КНШ155Р							
Режим разрушения: N = 5,8 кН, n = 30 об/ мин; Расход воды – 12л/мин;										
Смены	ρ <sub>ном</sub> , МПа	Σt <sub>вс</sub>	Σt <sub>ос</sub>	ΣL <sub>п</sub>	t <sub>вс</sub>	t <sub>ос</sub>	K <sub>п</sub>	H <sub>в</sub>	H <sub>вр</sub>	K <sub>а</sub>
1	0,5	96	262	18	6,04	13,34	0,855	16,3	0,43	0,5
2		91	271	22						
3		115	134	10						
4	-	-	-	-						
Итого		302	667	50						

Примечания: Расход долот -1/3; заточку инструмента проводить перед бурением каждой скважины

Рассмотрим результаты исследований технико-экономической эффективности ударно-вращательного бурения пневмоударником ПВ170М на буровой установке SWDB165 (КНР) [17]. На Рис. 14 представлена диаграмма технико-экономической эффективности бурения взрывных скважин пневмоударником ПВ170М диаметром 172 мм глубиной 18 метров до замены долота КНШ170. При прохождении рейсов буримых скважин заточка твердосплавных инденторов долота не проводилась.

Указанная на диаграмме производительность бурения получена в оперативное время рабочих смен (91,6% от 7 часов рабочей смены). Долото не имело наработки перед опытно-промышленными испытаниями. На первую рабочую смену выпал логистический простой, вызванный поломкой и заменой буровой штанги, следовательно, количество пробуренных метров могло быть выше. Учитывая мировой опыт бурения скважин, при спаде средневзвешенных показателей механической скорости бурения на 30-40% на такой же процент снижается срок службы буровой колонны (штанги, хвостовики и муфты и др.) [22, 28]. Следовательно, при спаде механической скорости бурения на 15-30% целесообразно выполнять перезаточку твердосплавных элементов долота, что позволяет повысить механическую скорость бурения. В предложенном случае мероприятие по заточке инденторов долота следовало выполнить после прохождения двенадцатой скважины (L =216 п.м). Отрезок бурения А – низкопроизводительный, максимальный спад механической скорости составил 50% при наработке на долото. Известно,



что чрезмерный износ твердосплавных элементов снижает энергию ударов на забое скважины, при этом перемещение буровой колонны происходит после многократных ударно-циклических воздействий на забой скважины. В этом случае при увеличении усилия подачи и частоты вращения происходит наложение эффектов износа и разрушения инденторов долота от периферии к центру (Рис. 15).

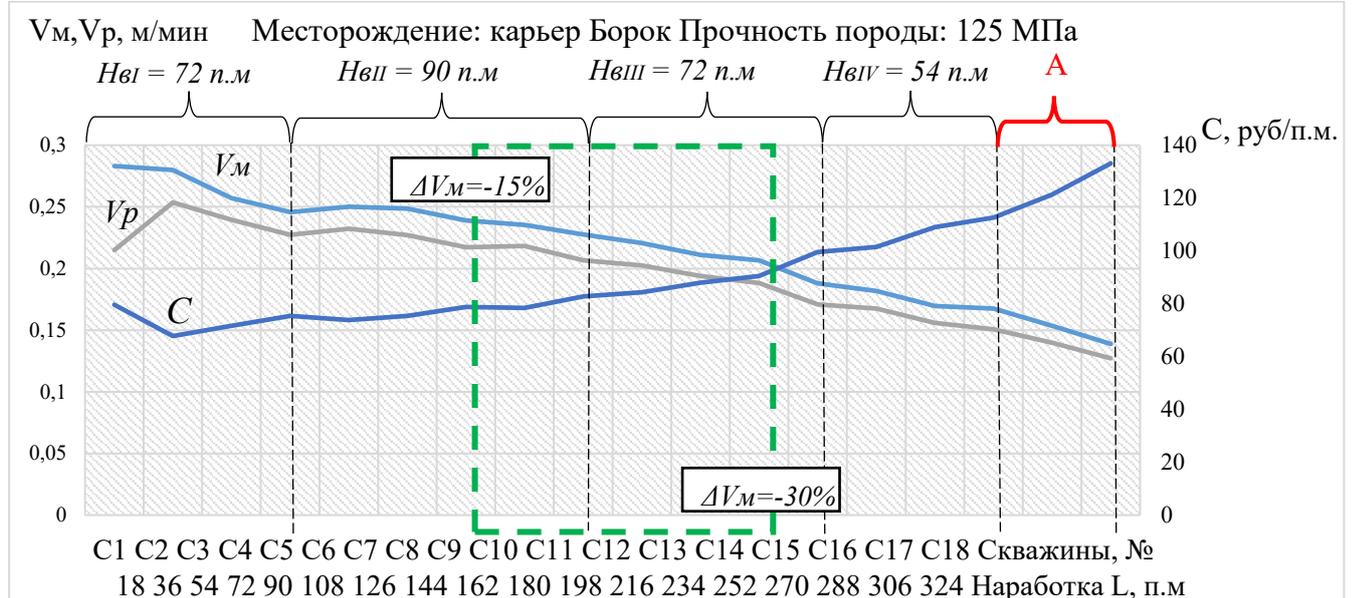


Рис. 14. Техничко-экономическая диаграмма эффективности бурения взрывных скважин на буровой установке SWDB165 (КНР) по граниту

Fig. 14. Technical and economic diagram of efficiency of drilling of explosive wells on drilling rig SWDB165 (PRC) on granite



Рис. 15. Изучение износа твердосплавных инденторов после бурения взрывных скважин  
Fig. 15. Study of hard-alloy indenter wear after drilling of blast holes

Износ периферийных инденторов долота уменьшает площадь пространства для шламтранспорта и, следовательно, вызывает переизмельчение буровой мелочи, что ведет к снижению механической скорости бурения, а также отрицательно влияет на прямолинейность буримых скважин, что уже сказывается на эффективности взрывных работ [31, 32].

Известно, что за время эксплуатации погружных пневмоударников производится замена нескольких буровых долот. В связи с этим при технико-экономической оценке эффективности пневмоударного бурения взрывных скважин целесообразно вести учет диаграмм эффективности с учетом замены долот. При потере мощностных характеристик погружные пневмоударники,



оснащенные долотами без наработки, при установлении рациональных режимов бурения покажут низкопроизводительную скорость бурения с самой первой смены. К примеру, низкая производительность бурения, как в четвертой смене (рис. 14,  $H_{6IV}$ ), начнется после замены долота с первой смены его наработкой. При этом общепринятым ресурсным показателем на отечественных горнодобывающих предприятиях является проходка на долото –  $L$  (п.м). На наш взгляд, для объективного анализа ресурсных параметров пневмоударников необходимо проводить оценку машин по количеству ударочасов –  $R_y$  и числу ударно-циклических нагружений ударника машины –  $R_{ц}$ , при установленных параметрах режима бурения скважины. Естественные условия горнодобывающих предприятий при наличии информации о физико-механических свойствах горных пород и режимах бурения при их количественной фиксации являются природными лабораториями для ресурсных испытаний буровых машин и инструмента.

С использованием предложенных способов исследования ресурсные параметры  $R_y$  и  $R_{ц}$  определяются для каждого контрольного участка  $L$  пройденного рейса буримой скважины (скважин) [16, 17].

Определение  $R_y$  осуществляется по основному времени бурения, т.е.  $R_y = t_{oc}$ , для всех контрольных участков рейса (-ов) буримых скважин. Определение  $R_{ц}$  осуществляется по среднему показателю  $f_y$  на контрольном участке  $L$  и времени его прохождения ( $t_{oc}$ ) по формуле:

$$R_{ц} = f_{уд} \cdot t_{oc}. \tag{11}$$

Наработка на отказ для пневмоударников и буровых долот определяется как сумма пройденных погонных метров контрольных участков рейсов буримых скважин:

$$R_{п} = L_1 + L_2 + L_3 \dots + L_n \tag{12}$$

На Рис. 16 представлены примеры определения наработки машин по  $R_{yч}$ ,  $R_{цн}$ ,  $R_{п}$  по спектральному, амплитудному и частотному анализу аудиограмм записи бурения скважин. Параметры определяются при чистом бурении –  $t_{oc}$ .



Рис. 16. Определение ресурсных параметров бурового инструмента и пневмоударников  
Fig. 16. Determination of lifetime parameters of drilling tools and pneumatic hammers



Анализ эксплуатации бурового оборудования на горнодобывающих предприятиях обозначил нестабильную стойкость твердого сплава буровых долот при бурении скважин на карьерах и в рудниках. В ряде случаев это вызвано несоответствием марки твердого сплава для буримых горных пород. Известно, что выбор долот необходимо осуществлять с учетом прочности горных пород. Так, в России для ударно-вращательного бурения скважин предназначены три сплава: ВК8-В ( $\sigma_{сж}$  до 140 МПа); ВК11-В ( $\sigma_{сж}$  до 180 МПа); ВК15 ( $\sigma_{сж}$  до 200 МПа) [27]. Следовательно, если породоразрушающие элементы долота неверно адаптированы к прочностным свойствам горных пород, мы заблаговременно занижаем производительность бурения и увеличиваем стоимость бурения 1 п.м буримой скважины. В ряде случаев в технических паспортах буровых долот отсутствуют данные о марках сплавов и их назначении, либо заявленная марка не предназначена для бурения той прочности пород, которая заявлена. Поскольку на стойкость долот влияет режим бурения в конкретной горной породе, то целесообразно осуществить определение и выбор рационального режима бурения и провести тестирование бурового долота.

Совершенствование буровых долот и погружных и выносных ударных машин нацелено на разрушение максимального объема горной породы на забое скважины за один полный оборот. Для ударно-вращательного бурения важным критерием выбора рационального режима бурения является максимальный объем разрушенной породы при минимальном количестве ударных воздействий на забой скважины  $s$  (формула 13) за один полный оборот долота, который определяет верхний предел рационального угла поворота долота ударной машины между ударными нагрузками –  $\gamma_r$  (формула 14), обеспечивающий максимальную производительность бурения с минимальной энергоемкостью разрушения и износом твердосплавных инденторов бурового инструмента. Превышение этого предела путем увеличения частоты вращения става ведет к снижению объемов разрушенной породы за оборот и преждевременному износу твердого сплава инденторов и уменьшению механической скорости бурения [28].

Для изучения режимов бурения показатели параметров  $\gamma$  и  $s$  определяются по формулам (13) и (14):

$$\gamma = \frac{f_{вр} \cdot 360^\circ}{f_{уд}}, \quad (13)$$

$$s = f_{уд} \cdot t_{2\pi}, \quad (14)$$

где  $t_{2\pi}$  – время полного оборота става, определяемое по формуле:

$$t_{2\pi} = \frac{60}{n}. \quad (15)$$

Следовательно, механическую скорость бурения допустимо использовать в качестве критерия выбора рационального режима, но с учетом частоты вращения бурового става. При постоянных значениях механической скорости бурения следует выбирать наибольшую частоту вращения.

Учитывая, что определение рационального режима бурения выполняется на контрольных участках  $L$ , не превышающих длину забуриваемой штанги, в качестве единого критерия, характеризующего объем разрушенной породы, целесообразно использовать удельную толщину слоя отбитой породы за один оборот долота  $h_{2\pi}$ , определяемую по формуле:

$$h_{2\pi} = \left( \frac{V_{2\pi}}{S_{заб}} \right) \cdot 1000, \quad (16)$$

где  $S_{заб}$  – площадь забоя скважины, м<sup>2</sup>;  $V_{2\pi}$  – объем разрушенной породы за оборот долота, м<sup>3</sup>/об, определяемый по формуле

$$V_{2\pi} = S_{заб} \cdot L = \left( \frac{\pi D^2}{4} \right) \cdot L. \quad (17)$$

Следовательно, максимальная толщина слоя отбитой породы за оборот долота при максимальной частоте вращения и будет определять рациональный режим бурения.



При этом сама частота вращения является своеобразной коробкой передач режимов разрушения породы, определяющей количество ударных воздействий на забой скважины.

Рассмотрим результаты изучения режимов бурения скважин в ходе опытно-промышленных испытаний погружных пневмоударников ПМ105ПМ и ПП105ЭН на Коробковском железорудном месторождении полезных ископаемых [31, 32]. Рассмотрим технические характеристики машин, полученные по данным стендовых испытаний (Таблица 5).

Таблица 5. Технические характеристики испытуемых погружных пневмоударников  
Table 5. Technical characteristics of tested submersible pneumatic hammers

Технические характеристики	П105ПМ	ПП105ЭН
Наличие клапана в системе воздухораспределения	+	+
Наличие обратного клапана	-	-
Энергия удара $A$ при $p = 0,5$ МПа, Дж	118	162
Частота ударов $f_{уд}$ , Гц	24	19,5
Ударная мощность $W$ , кВт	2,8	3,2
Удельный расход воздуха, $q$ , м <sup>3</sup> /(кВт·с)	0,045	0,036
Масса ударника, кг	4	4,1
Долото	КНШ105	КНШ105М
Форма инденторов долота	Сферические	Баллист.
Наличие выхлопных окон в матрице долота	-	+
Количество инденторов долота	12	12

На Рис. 17 приведены модели буровых долот для погружных пневмоударников, рассмотренных в Таблице 5.



Рис. 17. Буровые долота: а – КНШ105; б – КНШ105М  
Fig. 17. Drill bits: a – KNSH105; b – KNSH105M

По данным стендовых испытаний отмеченных буровых машин (Таблица 5) видно, что пневмоударник ПП105ЭН превосходит П105ПМ по мощностным характеристикам и имеет более низкий удельный расход энергоносителя. Как известно, повышение ударной мощности и экономичность погружных пневмоударников является одним из главных требований, предъявляемых к машинам в настоящее время [21, 33-35].

По распределению динамической нагрузки на инденторы ПП105ЭН также имеет превосходство: при номинальном давлении воздуха 0,5-0,6 МПа на один индентор долота приходится от 14 до 16 Дж (без учета потерь энергии при прохождении по долоту к инденторам). В процессе бурения эти показатели обычно на 10-20% выше, поскольку при разрушении породы на забое скважины не все инденторы одновременно выполняют полезную работу по разрушению породы [32].



В ходе изучения режимов бурения (Таблица 6) проходка скважины пневмоударником П-105ПМ выполнялась на двух станках, с неуправляемой частотой вращения (заводская настройка) – НКР100МА и с управляемой частотой вращения НКР100МПА. В качестве примера определения рационального режима бурения для П-105ПМ приведена работа машины при разных частотах вращения. При определении параметров режимов бурения также использовались рассмотренные способы исследования [16, 17].

Таблица 6. Оценка режимов бурения пневмоударников П-105ПМ и ПП105ЭН  
Table 6. Evaluation of drilling modes of pneumatic hammers P-105PM and PP105EN

Буровой станок	НКР100МПА		НКР100МА	НКР100МПА
Пневмоударник	П105ПМ			ПП105ЭН
Долото	КНШ105			КНШ105М
Е, Дж при 0,6 МПа			118	
Прочность породы (кварциты), МПа			193	
1. Исходные расчетные параметры (общие)				
Длина контрольного участка L, м			1,2	
Диаметр долота D, м			0,105	
Количество инденторов долота i, ед			12	
Забойная площадь разрушения S <sub>заб</sub> , м <sup>2</sup>			0,0086	
Объем разрушенной породы на контрольном участке V <sub>У</sub> , м <sup>3</sup>			0,01032	
2. Результаты натуральных экспериментов				
Энергия единичного удара E, при 0,6 МПа, Дж	118			162
Номинальное давление p, МПа			0,6	
Усилие подачи N, кН	2,3			3
Число оборотов в минуту n, об/мин	30	38	79	42
Частота ударов пневмоударника f <sub>уд</sub> , Гц	21.4	21.4	21.4	20
Угол между ударными нагрузками γ, град	8.4	10.6	22	12,6
Время полного оборота долота t <sub>2π</sub> , с	2.0	1.6	0.76	0,7
Толщина слоя отбитой породы за оборот h <sub>2π</sub> , мм/об.	3.2	3.2	1.52	4,2
Объем разрушенной породы за оборот V <sub>2π</sub> , м <sup>3</sup> /об.	2,76·10 <sup>-5</sup>	2,76·10 <sup>-5</sup>	1,31·10 <sup>-5</sup>	4,16·10 <sup>-5</sup>
Число ударов за оборот s, уд/об.	42,8	33,7	16,3	28,6
Количество зон ударного воздействия на забой с учетом количества инденторов i, I <sub>У</sub>	513,6	404,4	195,6	343,2
Забойная ударная мощность машины за оборот W <sub>2π</sub> , Вт/об.	5050,4	3976	1923,4	4633,2
Количество оборотов става на участке (L) n <sub>У</sub> , об.	373		786	248
Энергия машины, затраченная на отрезке (L) E <sub>У</sub> , Дж	1883799	1483048	1511792	1149034
Время прохождения участка (L) t <sub>У</sub> , с	746	592	600	354
Механическая скорость бурения V <sub>М</sub> , мм/мин	96.5	121	120	203
3. Формулы				
$I_U = s \cdot i$				(18)
$n_U = f_{вп} \cdot t_U$				(19)
$W_{2\pi} = E \cdot s$				(20)
$E_U = W_{2\pi} \cdot n_U$				(21)



Зная радиусы размещения твердосплавных инденторов в матрице долота, по формуле (22) несложно определить путь износа каждого индентора на контрольном участке  $L$  в зависимости от выбранного режима бурения.

$$L_{rn} = C_{rn} \cdot n_U \tag{22}$$

где  $C_{rn}$  – длина окружности, проходимая инденторами долота в зависимости от его расположения в корпусе долота.

На Рис. 18 представлена диаграмма оценки износа инденторов долота КНШ105 с учетом радиуса  $R_i$  размещения в корпусе долота и количества ( $i$ ) при бурении скважины пневмоударником П-105ПМ на участке  $L$  (Таблица 5).

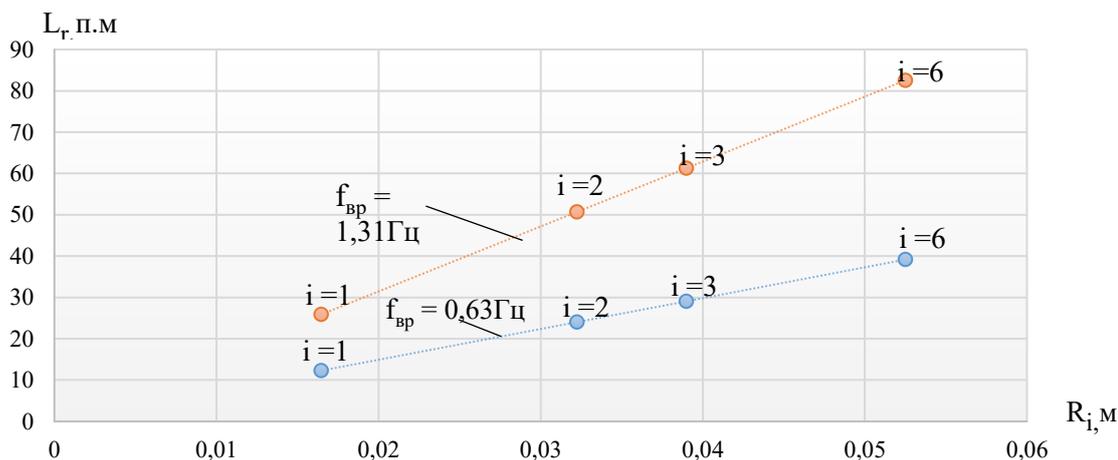


Рис. 18. Диаграмма оценки износа инденторов долота при различных режимах бурения  
Fig. 18. Bit indenter wear assessment diagram at different drilling modes

Зная марку твердосплавных инденторов (химический состав), ФМС горной породы бурового участка и определив рациональный режим бурения, целесообразно выполнять тестирование различных моделей буровых долот с учетом мощностных параметров погружных или выносных ударных систем. На графике наглядно видно, что механическая скорость бурения, имеющая для данного примера одинаковые показатели, как и линейная проходка на долото, не в полной мере годятся для изучения ресурсных параметров буровых долот и самих машин. Также, определив рациональный режим разрушения пород, при котором за оборот долота происходит 100 % поражение забоя скважины и отбивается определенный объем (слой) породы, мы можем определить коэффициент непораженного забоя скважины при менее эффективных режимах бурения. Для этого рассмотрим формулу эффективности поражения забоя скважины за один оборот (23):

$$k_h = 1 - \frac{V_{2\pi}}{V_{2\pi p}} = 1 - \frac{h_{2\pi}}{h_{2\pi p}} \tag{23}$$

Подставив в формулу данные бурения пневмоударником ПМ105ПМ, приняв за рациональный режим бурения частоту вращения  $f_{вp} = 0,63$  Гц,  $k_h = 1 - (1,52/3,21) = 0,53$ , получим, что за один оборот долота при частоте вращения  $f_{вp} = 1,3$  Гц 53% площади забоя не отбивается ввиду недостаточного количества ударных воздействий для разрушения породы. Учитывая, что износ инденторов идет от периферии к центру долота, а периферийный ряд имеет самую большую площадь для разрушения породы и, следовательно, длину пути по окружности, то при чрезмерном превышении частоты вращения става получается преждевременный износ. Для вышеприведенного примера путь холостого вращательного износа инденторов периферии при проходке 1,2 п.м скважины составил 82,5 п.м, что в 2,1 раза выше, чем при бурении в рациональном режиме.

В ходе проведенных исследований с применением предложенных способов исследования установлено, что для пневмоударника П105ПМ рациональный диапазон частот вращения скважины при проходке нисходящих взрывных скважин по слабородным кварцитам составляет 0,57–0,63 Гц [28]. В этом диапазоне пневмоударное бурение осуществляется с минимальной



энергоёмкостью (Таблица 5) и износом породоразрушающих элементов (Рис. 17), а также при максимальных показателях механической скорости бурения. Для пневмоударника ПП105ЭН установленный рациональный диапазон частот вращения составил 0,63-0,7 Гц.

Исследование процесса бурения, машин и инструмента должно нести в себе адаптивный характер применения к горно-геологическим и горнотехническим условиям месторождений твердых полезных ископаемых [36-40]. Поэтому на рынке машин пневмоударного бурения можно встретить предложения адаптивного характера, к примеру, для трещиноватых пород мягкой и средней крепости предлагаются пневмоударники с пониженной энергией ударов и повышенной частотой. В ряде случаев пневмоударники оснащаются шарошечными долотами для обеспечения безаварийного и производительного бурения [20, 43, 44].

В ИГД СО РАН при проведении опытно-промышленных испытаний погружного пневмоударника ПВ170М на карьере Борок (Новосибирская область) была проведена его сравнительная оценка энергоэффективности со шведским пневмоударником COP64.2 (Таблица 6) при бурении взрывных скважин на станке SWDB165 (КНР) по граниту ( $\sigma_{сж} = 125$  МПа) [40].

Таблица 6. Технические характеристики погружных пневмоударников

Table 6. Technical characteristics of submersible pneumatic hammers

Наименование показателя	Значение	
<b>1. Пневмоударник</b>		
Марка	COP64.2	ПВ170М
Длина, мм	1306	850
Диаметр корпуса, мм	142	146
Масса ударника, кг	22,5	17,5
Воздухораспределение: клапанное/бесклапанное	-/+	-/+
Обратный клапан	+	+
<b>2. Буровое долото</b>		
Марка	IRQL60	КНШ170
Диаметр буримой скважины, мм	165	172
Количество выхлопных окон	2	3
Количество инденторов /периферийный ряд, шт	20/10	28/10
Диаметр инденторов, мм	16	14
Соединение с пневмоударником	шлицевое	
Масса коронки, кг	25,4	17,5
<b>3. Параметры пневмоударников (стендовые испытания)</b>		
	COP64.2*	ПВ170М
Номинальное давление, МПа	1,05	1
Расход воздуха, м <sup>3</sup> /мин	9	10,3
Энергия удара, Дж	504	412
Частота ударов, Гц	19,8	22
Ударная мощность, кВт	10	9,06
*По данным Secoroc Down-the-hole equipment: Operators instruction and spare parts list down-the-hole hammers (Atlas Copco)		

В ходе испытаний в условиях повышенной трещиноватости (Рис. 19) было установлено, что при бурении скважин пневмоударником COP64.2 существуют высокие риски разрушения скважин и их потеря, о чем свидетельствовали факты перебуривания скважин при проведении оценочных испытаний пневмоударников, а также аварий с потерями погружных пневмоударников в составе буровой колонны.

Сравнительная оценка пневмоударников проводилась в условиях повышенной трещиноватости разбуриваемых породных массивов (более 10 трещин на 1 п.м).



В Таблице 7 приведена сравнительная оценка энергоэффективности бурения скважины сравниваемыми погружными пневмоударниками с применением способа исследования процесса воздействия исполнительных органов горных и строительных машин на разрабатываемый породный массив [40].



Рис. 19. Потеря и перебуривание взрывных скважин на карьере Борок  
 Fig. 19. Loss and over-drilling of blast holes at the Borok quarry

Таблица 7. Сравнительные оценки энергоэффективности бурения тестовой скважины пневмоударными машинами марок СОР64.2 и ПВ170М  
 Table 7. Comparative estimates of energy efficiency of drilling a testing well by pneumatic hammer machines of СОР64.2 and PV170М brands

Наименование параметров	Значения	
Прочность породы, МПа	125	
Плотность породы, кг/м <sup>3</sup>	2660	
Пневмоударники	СОР64.2	ПВ170М
Диаметр скважины, мм	165	172
Глубина скважины, м	18	
Номинальное давление p, МПа	1,2	
Расход воздуха Q, м <sup>3</sup> /мин	11,5	12
Усилие подачи N, кН	12	10
Число оборотов n, об/мин	50	50
Частота вращения f <sub>вр</sub> , Гц	0,83	
Частота ударов f <sub>уд</sub> , Гц	20,7	23,2
Угол между ударными нагрузками инденторов γ, град	14,3(14)	12,8 (13)
Механическая скорость бурения V <sub>м</sub> , м/мин	0,285	0,280
Объемная скорость бурения V <sub>об</sub> , м <sup>3</sup> /мин	6·10 <sup>-3</sup>	6,6·10 <sup>-3</sup>

В ходе натурных испытаний было установлено, что при номинальном давлении 1,2 МПа зарубежный пневмоударник СОР64.2, имеющий превосходство в энергии единичного удара на 18% и в массе ударника на 22% над ПВ170М, по объемной скорости бурения не превосходит отечественный образец, при этом за счет повышенной энергонасыщенности способствует разрушению скважины при бурении.

Учитывая данные по энергии единичного удара для стендовых испытаний буровых машин и средние значения частоты ударных воздействий в производственных условиях (Таблица 6), рассмотрим пример расчета их энергетических параметров при различной частоте вращения буровой колонны.

Известная формула определения мощности  $W = E \cdot f_{уд}$ , ( $E$  – энергия единичного удара пневмоударника, Дж), используемая для описания технических характеристик погружных и выносных ударных машин, характеризует лишь стендовую ударную мощность машины (без



вращения) или мощность поражения забоя скважины при ударно-вращательном бурении с установленной частотой вращения 1 Гц [28].

В связи с этим мощность пневмоударника на забое скважины при бурении определяется по формуле:

$$W_{2\pi} = E \cdot s = \frac{E \cdot t_{2\pi}}{t_{ц}}, \quad (23)$$

где  $E$  – энергия единичного удара пневмоударника, Дж;  $s$  – количество ударных воздействий за оборот става, уд/об, при  $s^{-t_{2\pi}}$ ;  $t_{2\pi}$  – время полного оборота става ( $t_{ц} = 1/f_{уд}$ ), с;  $t_{ц}$  – продолжительность ударного цикла бойка машины.

Учитывая данные по энергии единичного удара для стендовых испытаний буровых машин и средние значения частоты ударных воздействий в производственных условиях (Таблица 8), рассмотрим пример расчета их энергетических параметров при различной частоте вращения буровой колонны.

Таблица 8. Параметры забойной мощности пневмоударников COP64.2 и ПБ170М при бурении взрывных скважин на буровой установке SWDB165

Table 8. Parameters of bottom-hole power of pneumatic hammers COP64.2 and PV170M during drilling of explosive wells on drilling rig SWDB165

	COP64.2				ПБ170М			
	40	50	60	65*	40	50	55	60
$n$ , об/мин	40	50	60	65*	40	50	55	60
$t_{2\pi}$ , с	1,5	1,2	1	0,85	1,5	1,2	1,09	1
$s$ , уд/об	31,5	24,8	20,8	17,8	34,8	27,8	25,3	23,2
$\gamma$ , град	11,4	14,4	17,3	18,7	10,2	12,8	14,1	15,5
$W_{2\pi}$ , Вт/об	15649,2	12519,4	10483,2	8985,6	14337,6	11470,08	10427,4	8569,6
25 Дж на индентор долота					15 Дж на индентор долота			
*Буровой станок SWDB165 обеспечивает максимальное число оборотов $n = 60$ об/мин								

В ходе опытно-промышленных испытаний установлено, что рациональный диапазон частот вращения става для ПБ170М при бурении скважин в условиях повышенной трещиноватости пород ограничен значениями от 0,9 до 1 Гц; для зарубежной машины – свыше 1 Гц (имеет место превышение максимального предела по частоте для SWDB165). Следовательно, процесс бурения скважин производится в весьма ограниченном частотном диапазоне. При бурении скважин в породах третьей категории трещиноватости для ПБ170М рациональный диапазон значений частот вращения става составляет 0,75-0,83 Гц. В нем обеспечивается максимальная производительность буровых работ с минимальным износом инденторов породоразрушающего инструмента. Также у пневмоударника ПБ170М имеется потенциал повышения энергии единичного удара для более прочных и монолитных пород за счет сокращения числа инденторов в матрице долота и доведения их до номинальных динамических нагрузок (20 Дж).

Предложенные результаты исследований буровых процессов, полученные при помощи способов [16, 17] наряду с проведенной оценкой энергоэффективности бурения, позволяют перейти к геотехническому мониторингу буровых систем [32]. В настоящее время отмечается устойчивый рост количества исследований, направленных на повышение энергоэффективности и производительности буровзрывных работ, связанных с поиском решений для определения физико-механических свойств горных пород (прочность, трещиноватость и абразивность) при эксплуатации буровой техники на реальных производственных объектах [45-50].

Спектрально-акустические характеристики процессов бурения можно обрабатывать различными способами. Одним из самых эффективных способов нахождения признаков, характеризующих процесс бурения, является выделение его спектральных характеристик [51].

Акустическая запись состоит из пакета (набора) частот. Каждая технологическая операция имеет уникальное соотношение интенсивности частот, фиксируемых в акустическом сигнале. Анализ данных частот позволяет определить тип операции и ее параметры.

Акустический спектр представляет собой совокупность гармонических колебаний, на которые можно разложить отдельные элементы. В случае акустического сигнала,

индуцированного искусственно, с помощью одного или нескольких гармонических колебаний, спектр будет дискретным. При обработке реальных спектрограмм бурения присутствуют гармонические волны в широком диапазоне, поэтому спектр представляет собой непрерывную функцию времени [51].

Спектр можно найти, применив преобразование Фурье к звуковому сигналу. Чаще всего для нахождения спектра используют функцию FFT (Fast Fourier Transform) – быстрое преобразование Фурье. Она представляет собой алгоритм ускоренного вычисления дискретного преобразования Фурье [52]. Визуализировав распределение спектра частот сигнала относительно времени, можно получить спектрограмму. Она является основным инструментом для анализа спектральных характеристик звука.

Обычная спектрограмма выглядит следующим образом (Рис. 20).

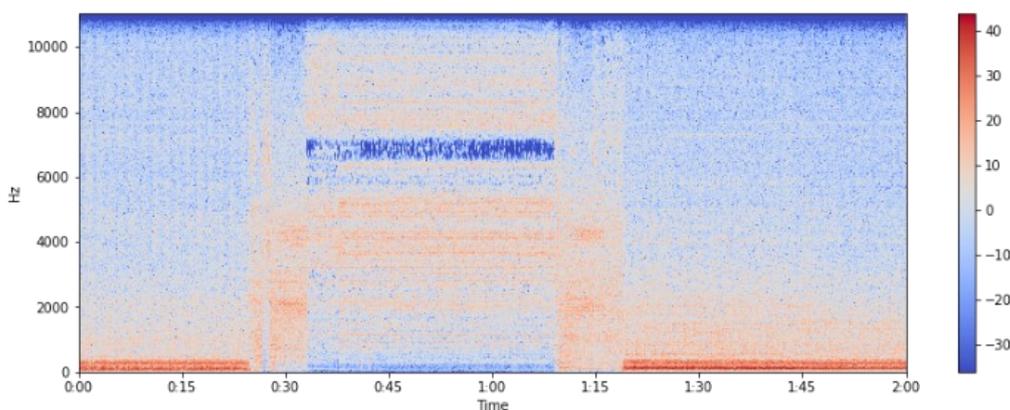


Рис. 20. Общий вид спектрограммы  
Fig. 20. General view of spectrogram

По оси Y расположены частоты, а по оси X – время. На пересечении любой пары x, y отображается значение интенсивности спектра данной частоты в данный момент времени. Значение измеряется в децибелах и отображается определенным цветом, соответствующим данному значению. Шкала соответствия «цвет-децибел» указана в легенде рисунка.

При акустическом анализе используют различные виды спектрограмм, например, Мел-спектрограмму, которая изображена на Рис. 21. Чисто математически она отличается тем, что на оси Y расположен результат нелинейной трансформации оси частот обычной спектрограммы. Иными словами, Мел-спектрограмма — это обычная спектрограмма, но со шкалой Мела на оси Y [53].

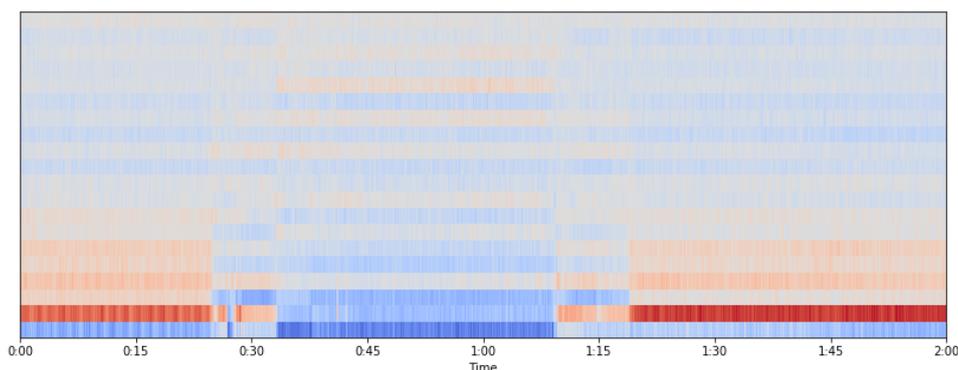


Рис. 21. Общий вид Мел-спектрограммы  
Fig. 21. General view of the Mel-spectrogram

Используя различные спектрограммы, можно, например, определять процессы работы бурового станка. На Рис. 22 представлены характерные участки спектрограмм трех процессов



работы бурового органа. По интенсивности определенных частот делается вывод о технологической операции и типе протекающего процесса работы.

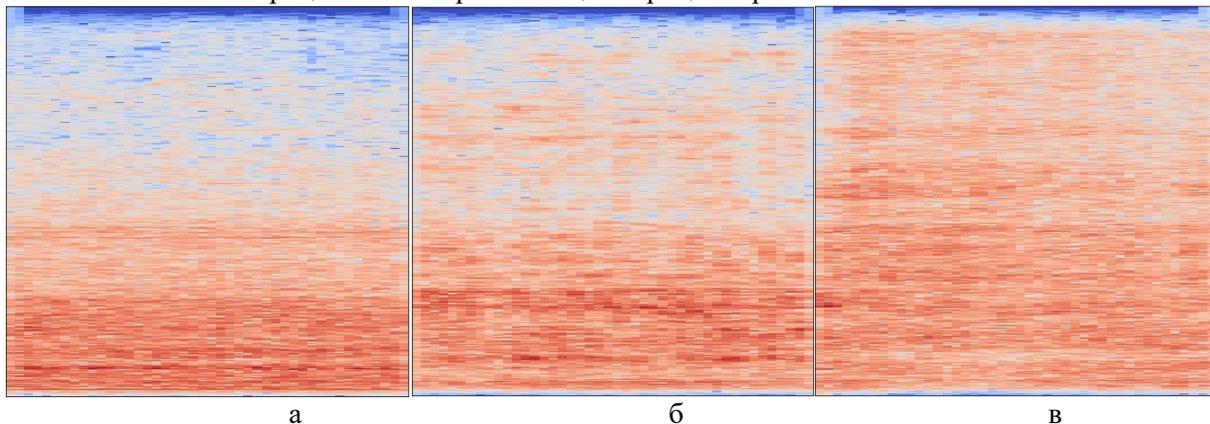


Рис. 22. Участки спектрограмм по процессам: а – вспомогательные процессы, б – бурение, в – продувка

Fig. 22. Spectrogram sections by processes: a – auxiliary processes, b – drilling, c – blowing

Для выделения спектральных характеристик возможно рассмотрение не всей спектрограммы процесса в целом, а ее разбиение на равные участки. В исследовании использовалось разбиение по 3, 5 или 10 секунд. Так, спектрограммы на Рис. 22 представляют характерные пятисекундные участки соответствующего процесса бурения. Участки внутри одного процесса практически не отличаются, что позволяет подчеркнуть распределение и интенсивность частот конкретного процесса. Подчеркивая признаки отдельного процесса на его участках, можно с точностью до ширины участка (3, 5, 10 секунд и т.п.) определить время протекания процесса и выделить его временные рамки на акустической записи.

Помимо анализа различных процессов бурения также возможен анализ буровых установок при одном и том же процессе. Взяв пятисекундные участки бурения различных буровых установок (Рис. 23), можно определить тип и мощность установки, наличие бракованных установок среди партии и др.

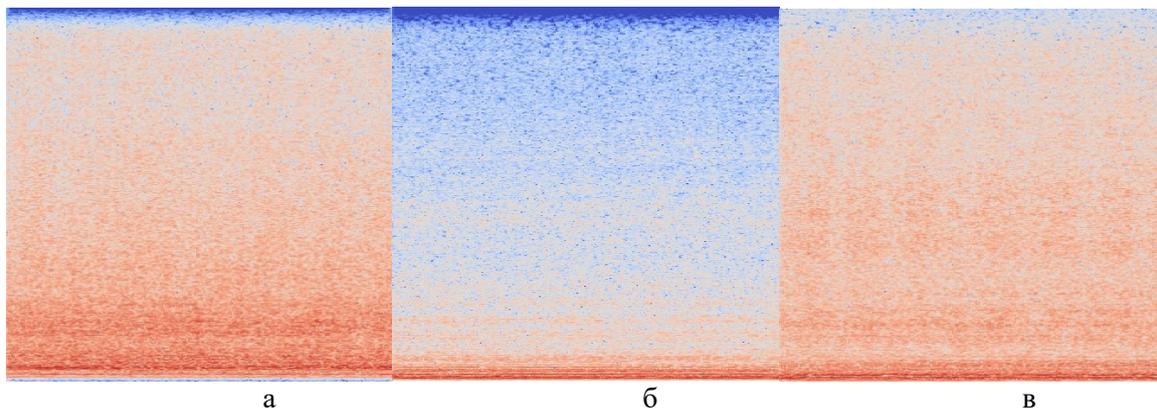


Рис. 23. Спектрограммы процесса бурения различными установками (а – в)

Fig. 23. Spectrograms of drilling process with different rigs (a – c)

Кроме использования спектрограмм при анализе акустических сигналов также используют хромограммы. Это средство для представления акустической записи, в котором спектр проецируется на 12 ячеек, представляющих 12 различных полутонов октавы [54]. Пример хромограммы представлен на Рис. 24.

Для акустического анализа процессов бурения качественные результаты показывает анализ хромограмм. Ряд операций возможно различить не только нейросетевыми алгоритмами, но и человеческим глазом.

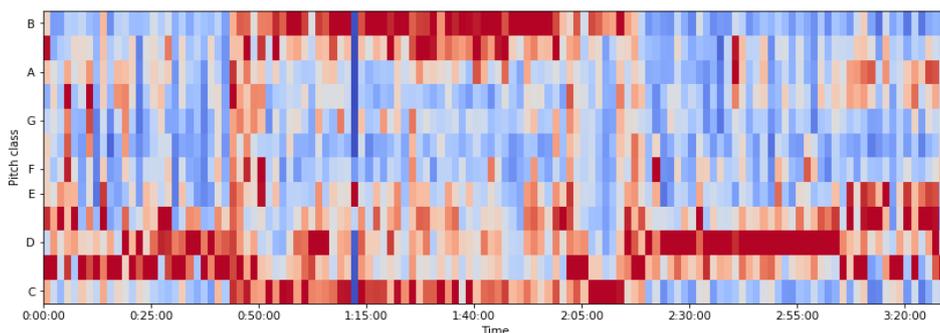


Рис. 24. Хромограмма бурения  
Fig. 24. Chromogram of drilling

Для сегментации хромограмм используются как замкнутые полигональные линии, так и области точек, которые выделяют определенную область на изображении. Для детектирования используются метки в виде координат прямоугольника, внутри которого содержится объект поиска.

Для классификации изображения используется сверточная нейросеть [55], которая состоит из 2 частей: основной и головной (Рис. 25).

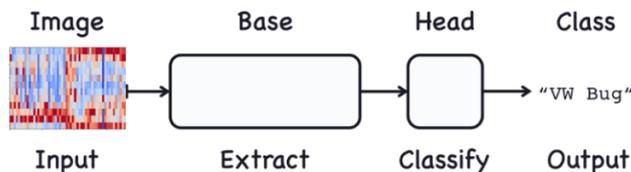


Рис. 25. Схема сверточной нейронной сети, выполняющей классификацию  
Fig. 25. Scheme of convolutional neural network performing classification

Основная часть нужна для извлечения признаков изображения. Она в основном выполняет операцию свертки, хотя там также содержатся некоторые вспомогательные слои. Головная часть используется для определения класса изображения. Она состоит из плотных слоев с добавлением некоторых других, к примеру, выпадающих слоев.

Для создания классификатора необходимо обучить нейронную сеть двум вещам:

- извлекать необходимые признаки изображения (основная часть);
- определять класс по извлеченным признакам (головная часть).

Современный классификатор очень редко обучается с нуля. Обычно он использует основную часть уже обученной модели. К такой модели присоединяется необученная головная часть. Другими словами, берется обученная часть нейросети, которая способна делать часть А. Затем извлекаются признаки, которые отправляются в новые слои для обучения, т.е. в часть Б (Рис. 26). Обычно головная часть содержит небольшое количество плотных слоев. Поэтому довольно точный классификатор можно сделать, основываясь на относительно небольшом наборе входных данных. Процесс повторного использования обученных моделей называется передачей обучения (transfer learning). Данный процесс имеет высокую эффективность, поэтому используется практически в каждом современном классификаторе [56].

Процесс извлечения признаков состоит из трех основных операций:

- фильтрация изображения по определенному признаку (свертка);
- обнаружение признака в отфильтрованном изображении (ReLU);
- сжатие изображения с выделением признака (maximum pooling).

Как правило, нейросети параллельно выполняют извлечение нескольких признаков изображения. Современные сверточные нейронные сети часто содержат более 1000 уникальных визуальных признаков на выходном слое.

Сверточный слой отвечает за этап фильтрации изображения. Он содержит 2 основных параметра `filters` и `kernel_size`. Ниже представлено описание их взаимосвязи с весами и активациями слоев.

Веса сверточной нейронной сети, изучаемые в ходе обучения, в основном содержатся в сверточных слоях. Эти веса называются ядрами (`kernels`). Их можно представить в виде матрицы (Рис. 27).

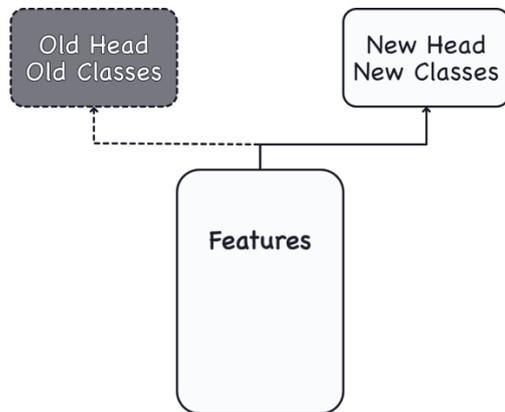


Рис. 26. Схема передачи обучения  
Fig. 26. Learning transfer scheme

-1	2	-1
-1	2	-1
-1	2	-1

Рис. 27. Матричный вид ядра  
Fig. 27. Matrix view of a kernel

Ядро участвует в процессе сканирования изображения, выделяя суммы весов по значениям пикселей (Рис. 28). Таким образом, ядро выступает как линза, которая подчеркивает или убирает определенные паттерны на изображении [57].

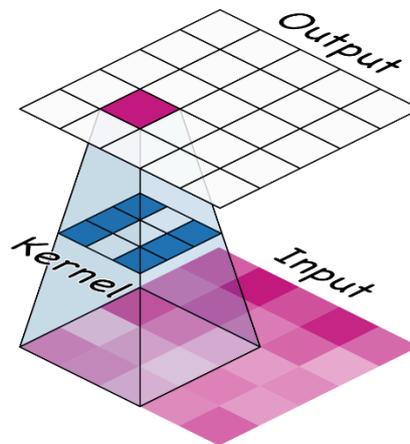


Рис. 28. Сканирование изображения с помощью ядра  
Fig. 28. Scanning an image using the kernel

Ядро определяет связь между сверточным и следующим после него слоями. Оно соединяет каждый нейрон на выходе с девятью нейронами на входе. Устанавливая значение параметра `kernel_size`, т.е. размера ядра у сверточного слоя, можно определить размер матрицы ядра. Обычно это нечетное число, к примеру, 3 или 5. Такие значения соответствуют ядрам 3×3 и 5×5. Ядро в сверточном слое определяет то, по какому признаку будет отфильтровываться изображение.

Активациями в нейронных сетях называют карты признаков. Они являются результатом применения фильтра к изображению. Карты признаков содержат визуальные признаки, извлеченные с помощью ядра. На Рис. 29 представлены ядра и карты признаков, полученные с их помощью.

Задавая параметр `filters`, можно определить количество карт признаков, которое создаст сверточный слой на выходе.

После этапа фильтрации наступает этап обнаружения признака в отфильтрованном изображении.

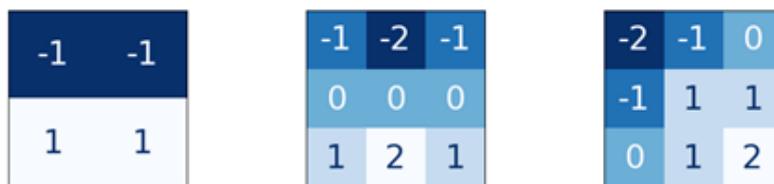


Рис. 29. Получение карт признаков с помощью ядер  
Fig. 29. Obtaining feature maps using kernels

На этапе обнаружения используется выпрямляющая функция активации и звено ReLU, которое она образует. Про функцию активации ReLU было рассказано ранее. Важно лишь помнить, что она устанавливает отрицательные значения равными 0, а положительные сохраняет без изменений. Применив ReLU к картам признаков, можно изолировать определенные признаки [58].

Третий этап процесса извлечения — это сжатие изображения с выделением признака. На данном этапе используется функция объединения по максимуму (Maximum Pooling или MaxPool). Слой MaxPool похож на сверточный, за исключением того, что вместо ядра используется функция объединения по максимуму такого же размера. Однако слой MaxPool не имеет обучаемых весов, в отличие от сверточного слоя.

На 2 этапе при применении ReLU к отфильтрованному изображению карта признаков содержит большое количество «пустых» областей. «Пустые» области – это пиксели со значением 0, которые появились из-за обнуления отрицательных значений. Такие области не несут полезной информации, хотя модель хранит информацию о них. Сокращение «пустых» областей способно ускорить работу сверточной нейронной сети.

Именно таким сокращением и занимается слой MaxPool [59]. Функция объединения по максимуму берет часть оригинальной карты признаков и преобразует все пиксели этой части в один пиксель объединенной карты признаков (Рис. 30). Значение пикселя в объединенной карте равно наибольшему значению среди пикселей оригинальной карты.

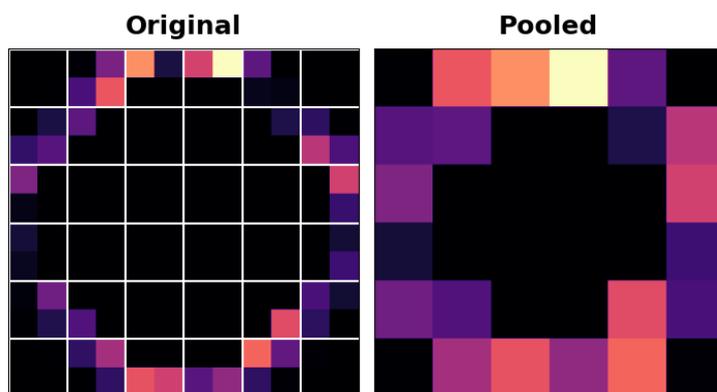


Рис. 30. Преобразование карты признаков с помощью функции объединения по максимуму  
Fig. 30. Transforming the feature map using the maximum pooling function

Применение слоя MaxPool после ReLU активации создает эффект подчеркнутых признаков. Объединяющий этап увеличивает соотношение положительных пикселей к нулевым.

Операции свертки и объединения выполняются с помощью скользящего окна (Рис. 31). Размер окна для свертки определяется размером ядра. Для функции объединения по максимуму размер окна равен размеру объединяемой области [60].

Существуют еще 2 параметра, которые влияют на сверточный и объединяющий слои: *strides* и *padding*. Параметр *strides* показывает шаг скользящего окна, а параметр *padding* определяет работу окна с пикселями на краях изображения [61].

Когда параметр *stride* больше 1, то скользящее окно пропускает часть пикселей на каждом шагу.

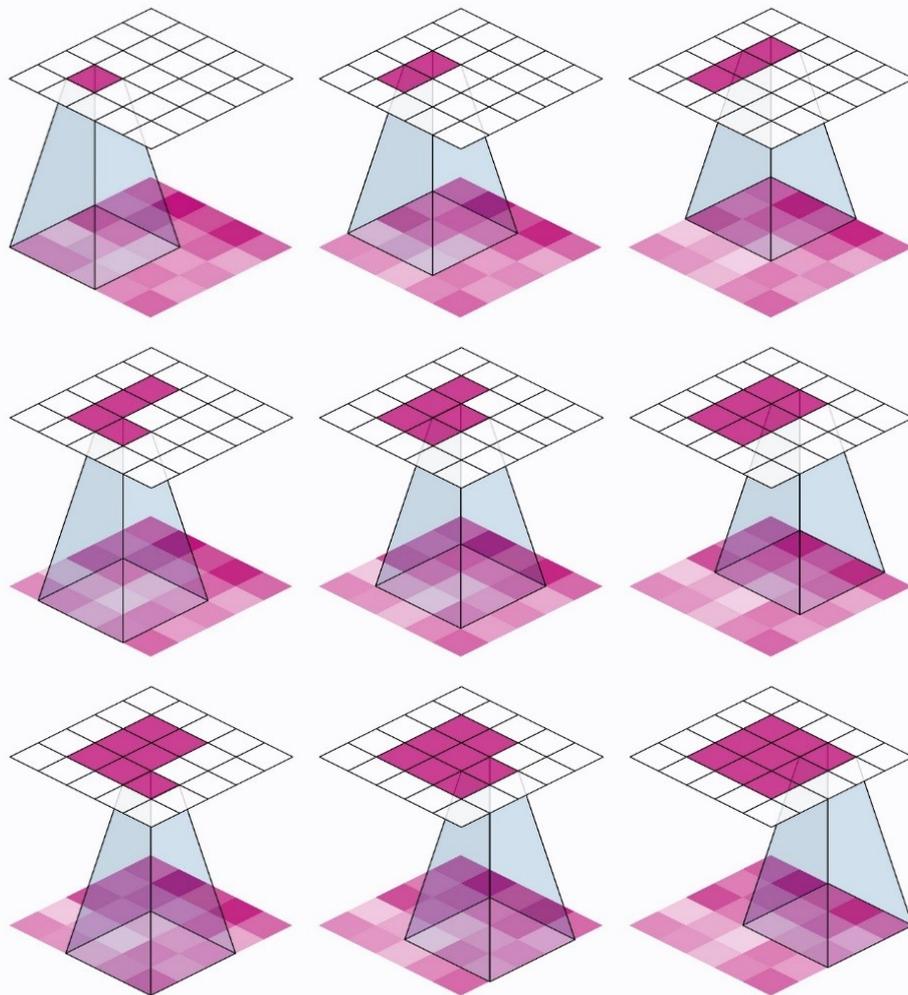


Рис. 31. Выполнение операции с помощью скользящего окна  
Fig. 31. Executing an operation using a sliding window

Для создания качественной классификации необходимо, чтобы слой свертки имел шаг 1, т.е.  $strides = (1, 1)$ . Увеличение данного параметра приведет к пропуску потенциальной важной информации. С другой стороны, слой MaxPool, как правило, всегда имеет параметр *stride* больше 1, например (2, 2) или (3, 3), но не больше размера скользящего окна (Рис. 32). Обычно параметр *strides* обозначается одной цифрой, к примеру, запись  $strides = 1$  аналогична записи  $strides = (1, 1)$ . Однако иногда шаг по осям может различаться:  $strides = (2, 1)$ , тогда упрощенную запись применять нельзя.

При работе со скользящим окном возникает вопрос о том, что делать с границами изображения. Когда центр окна находится на границе изображения, то некоторых значений, которые должны быть для вычислений, просто нет. Это возникает потому, что часть скользящего окна выходит за границы изображения.

Для решения проблемы выхода скользящего окна за границы изображения вводят параметр *padding*. Он может принимать 2 значения: *same* и *valid*.

При значении параметра *padding*, равном *valid*, сверточное окно не выходит за границы слоя ни единым пикселем. Из-за этого размер выходного слоя сокращается. Причем чем больше ядро



свертки, тем больше пикселей потеряется на выходе. Такое значение параметра ограничивает количество возможных слоев сверточной нейронной сети, особенно в случаях с малым входным размером изображений.

Когда параметр padding равен same, тогда скользящее окно может выходить за границы изображения (Рис. 33). В таких случаях значения за границей принимаются равными 0.

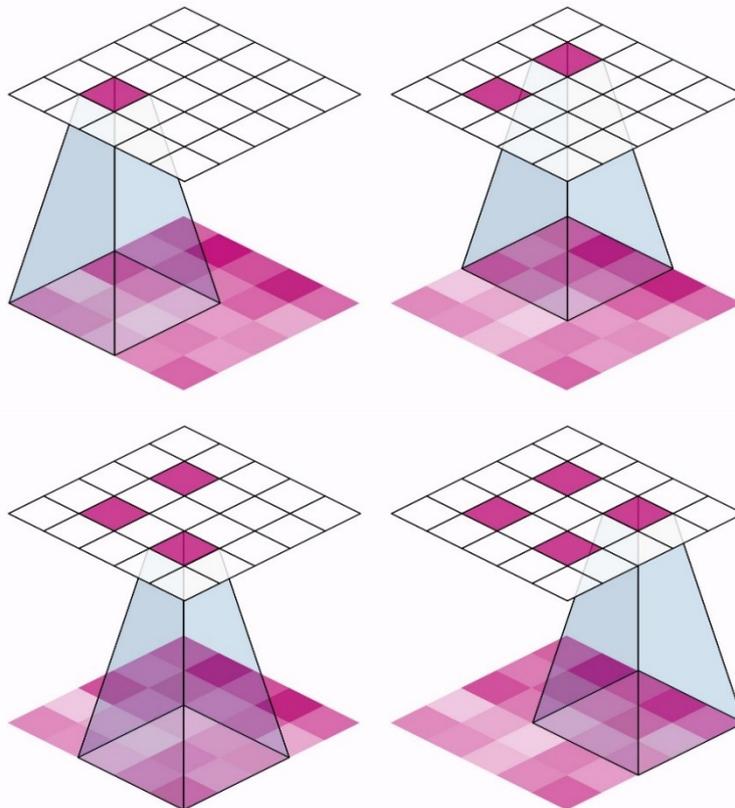
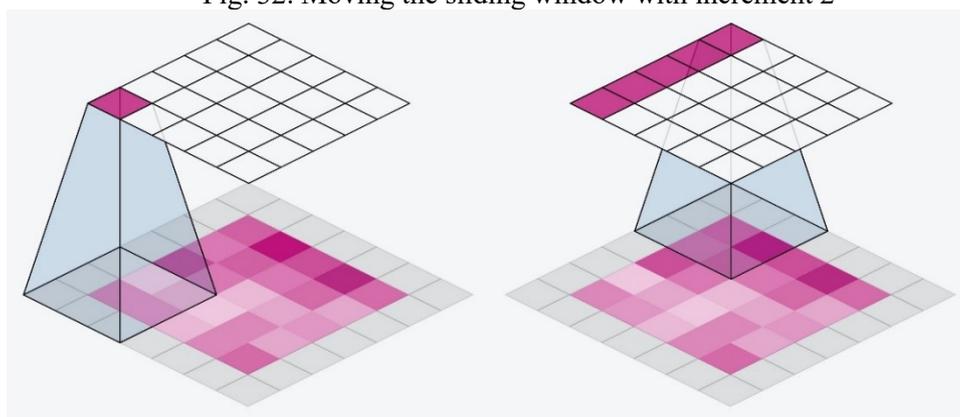


Рис. 32. Перемещение скользящего окна с шагом 2  
Fig. 32. Moving the sliding window with increment 2



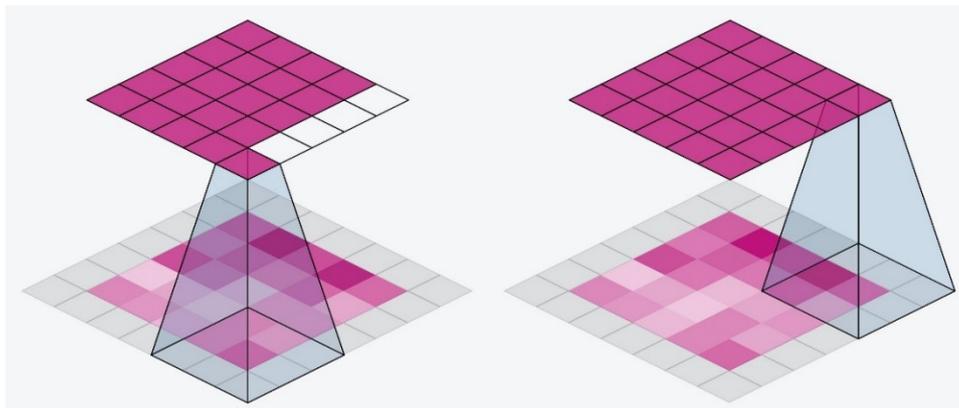


Рис. 33. Перемещение скользящего окна с выходом за границы изображения

Fig. 33. Moving a sliding window with going beyond the image boundaries

Такой процесс работы окна позволяет сохранить размер слоя, т.к. центр ядра свертки сможет двигаться вдоль краев изображения. Однако это приводит к ослаблению пикселей на границах и способствует появлению артефактов.

Значение *same*, как правило, используется для операции свертки, чтобы сохранить размерность изображения, а значение *valid* при выполнении операции объединения по максимуму.

Для обучения любого нейросетевого алгоритма необходимо подготовить входные данные. В случае компьютерного зрения входными данными будет являться набор изображений, называемый датасетом. При использовании процесса передачи обучения можно обучить сверточную нейросетевую модель на достаточно небольшом датасете. Однако для этого потребуется модель с обученными весами. Эти веса должны быть обучены на датасетах со схожими категориями [62, 63].

Наилучшим способом увеличения эффективности работы любого алгоритма машинного обучения является его тренировка на большем объеме входных данных. Чем больше примеров изучит модель, тем точнее она будет классифицировать изображения. Большой объем данных помогает модели лучше выявить распространенные признаки.

Одним из легких способов получения большего объема данных является использование уже существующих. Если преобразовать изображения датасета так, чтобы сохранить целостность классов, то можно обучить классификатор игнорировать различного рода преобразования изображений. Как правило, для увеличения размера датасета используют различного рода преобразования. Часто встречаются повороты и деформации изображения, изменение цветов и контрастности, а также многое другое. Обычно используются не просто обособленные преобразования, а их комбинации. Изображения, созданные искусственным образом, обычно не хранятся отдельно. Такие изображения создаются непосредственно перед обучением сверточного нейросетевого алгоритма и удаляются после обучения.

Важно заметить, что не каждое преобразование можно использовать для увеличения размера датасета. Выбор набора преобразований зависит от конкретно взятого датасета. Не допускается использование преобразований, которое способствует перемешиванию классов.

#### **Заключение**

Опыт и перспективы применения рассмотренных способов исследования процесса воздействия исполнительных органов горных и строительных машин на разрабатываемый массив геосреды свидетельствуют о том, что их использование целесообразно спроецировать практически на любые технологии бурения.

Повышение эффективности буровых работ для любой технологии бурения, без сомнения, имеет свою уникальную специфику. При этом общим для применяемых технологий бурения является то, что все организационные, технические, технологические изменения параметров буровых работ, направленные на повышение производительности, должны количественно фиксироваться и оцениваться. Оценка эффективности буровых технологий только по показателям производительности бурения недостаточна. Это обусловлено тем, что при



одинаковой производительности бурения затраты на выполнение основных и вспомогательных операций могут иметь существенное отличие из-за разницы затрат на буровое оборудование, энергоносители и заработную плату. Следовательно, любое технико-технологическое и организационное решение, направленное на повышение производительности буровых работ, целесообразно оценивать по удельным показателям себестоимости прямых затрат на проходжение 1 п.м скважины с конкретной привязкой к горнотехническим и горно-геологическим условиям бурового участка.

Современное развитие техники и технологии бурения требует создания программно-аппаратного комплекса самотестирования буровых машин, способного определять наиболее энергоэффективные режимы бурения, обеспечивающие высокую производительность в изменяемых горно-геологических условиях месторождений твердых полезных ископаемых. При этом каждый шаг, направленный на оптимизацию процесса бурения внутри технологии (замена энергоисточника, адаптация режимов бурения к условиям горных пород, заточка породоразрушающих элементов буровых долот, использование новых очистных агентов, смена ударных машин и инструмента и др.) или смены одной технологии на другую с ее последующей оптимизацией, должен идентифицироваться и иметь последовательную, независимую и объективную оценку.

Эффективным методом экспресс-анализа процесса бурения является анализ генерируемого микроакустического сигнала. Проанализированные акустические записи при бурении позволяют выделять технологические операции. К акустическому сигналу применимы методы анализа на основе искусственного интеллекта. Сформированная база данных по бурению представляет собой массив из нескольких сот столбцов и десятков миллионов строк. Эти данные разбиваются на тренировочный и тестовый датасеты, и искусственная нейронная сеть начинает искать скрытые закономерности в данных тренировочного датасета. Применяется метод оптимизации роя частиц. Это метод численной оптимизации, для использования которого не требуется знать точного градиента оптимизируемой функции. После того, как алгоритм считает, что решение найдено, оно проверяется на данных тестового датасета и, если решение не соответствует критерию минимальной энергоемкости, процесс повторяется. Этот процесс называется кросс-валидацией. В результате определяются веса факторов, влияющих на эффективность бурения, и их отражения в характеристиках акустического сигнала, таким образом, восстанавливается состояние процесса бурения по его цифровой тени. Обученная подобным способом нейросеть может в автоматическом режиме определять текущие значения критерия энергоемкости и давать рекомендации по изменению параметров бурового станка для достижения минимальной энергоемкости.

### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2024 Авторы. Издательство Кузбасского государственного технического университета имени Т.Ф. Горбачева. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

**Благодарности.** Авторы считают своим долгом выразить глубочайшую признательность учителю и наставнику, член-корреспонденту РАН, доктор физико-математических наук, профессору Виктору Николаевичу Опарину (1951-2023) за постановку задач, общее руководство и неоценимую помощь, и поддержку при выполнении данной работы.

Исследование выполнено по проекту: 121051900145-1

### **Информация об авторах**

**Карпов Владимир Николаевич**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории открытых горных работ  
e-mail: [karпов@misd.ru](mailto:karпов@misd.ru)

**Конуриин Антон Игоревич**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории физико-технических геотехнологий  
e-mail: [akonurin@yandex.ru](mailto:akonurin@yandex.ru)



**Орлов Дмитрий Витальевич**, аспирант лаборатории подземной разработки рудных месторождений  
e-mail: dmior198@gmail.com

ФГБУН Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный проспект, 54

### Список литературы

1. Мельников Н. Н., Козырев А. А., Лукичев С. В. Большие глубины – новые технологии // Вестник Кольского научного центра РАН. 2013. № 4(15). С. 58–66.
2. Реготунов А. С., Жариков С. Н., Сухов Р. И., Кутуев В. А. Оценка современного состояния буровзрывных работ и необходимость осуществления переходных процессов на некоторых крупных горных предприятиях Урала и Сибири // Проблемы недропользования. 2021. № 2(29). С. 52–62.
3. Котяшев А.т А. Закономерности изменения условий и показателей эксплуатации буровзрывного комплекса на открытых горных разработках // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2018. № 8. С. 34–40.
4. Васильев М. В. Влияние возрастающей глубины карьеров на эффективность горного производства // Горный журнал. 1983. № 2. С. 29–33.
5. Тангаев И. А. Буримость и взрываемость горных пород. М. : Недра, 1978. 184 с.
6. Шаповаленко Г. Н. [и др.] Организационные и технологические решения по повышению эффективности вскрышного комплекса разреза «Черногорский» // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 12 (специальный выпуск 64). С. 36–48.
7. Бовин К. А., Гилев А. В., Шигин А. О., Плотников И. С. Анализ эксплуатации техники бурения взрывных скважин на карьерах Красноярского края и Республики Хакасии // Известия Сибирского отделения Секции наук о Земле Российской академии естественных наук. Геология, разведка и разработка месторождений полезных ископаемых. 2017. Т. 40. № 3. С. 99–106.
8. Dmitriev V. T., Timukhin S. A., Simisinov D. I., Karyakin A. L. Analysis of energy parameters of mine hoists // Gornyi Zhurnal. 2017. № 8. P. 70–72. DOI: 10.17580/gzh.2017.08.13.
9. Аксенов В. В., Хорешок А. А., Бегляков В. Ю. Концепция создания перспективного технологического уклада формирования (освоения) подземного пространства на базе опережающего развития новых подходов в строительной геотехнологии и геотехнике. Часть 1. Предпосылки и основные положения // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2018. № 4(128). С. 105–114.
10. Qi B., Cao P., Yang H. [et al.] Experimental and numerical study on air flow behavior for a novel retractable reverse circulation drill bit of casing-while-drilling (CwD) // Geofluids. 2021. Vol. 2021. P. 3586572.
11. Алиева Л. А., Жуков И. А. Анализ конструкций безлезвийного бурового инструмента и постановка проблем его совершенствования // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. 2022. № 15. С. 157–170.
12. Тимофеев Е. Г., Теплякова А. В., Жуков И. А., Голиков Н. С. Автоматизированный метод проектирования бойков ударных машин по физико-механическим свойствам разрушаемых объектов / Е.Г. Тимофеев, // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 12-2. С. 257–269.
13. Ананьев К. А., Ермаков А. Н., Сидоров М. С., Варнавский К. А. Обзор исполнительных органов буровых установок // Техника и технология горного дела. 2022. № 4(19). С. 35–61.
14. Яковлев А. В., Шимкив Е. С., Переход Т. М. Исследование процесса бурения технологических скважин на карьерах АО «ЕВРАЗ КГОК» станками пневмоударного бурения // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 5. С. 121–130.
15. Novinkov A., Protasov S., Samusev P. Ensuring Seismic Safety of Underground Mines During Blasting Operations in Combined Surface-Underground Deposit Development // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 174. Article 01016. DOI: 10.1051/e3sconf/202017401016. EDN RYFUWK.
16. Патент RU № 2662743 МПК G01P 3/36. Карпов В. Н., Тимонин В. В., Ткачук А. К. [и др.] Способ исследования процесса воздействия исполнительных органов горных и строительных машин на разрабатываемый массив геосреды. Бюлл. №22 (Заявлено 04.10.2017, опубликовано 30.07.2018).
17. Патент RU № 2674350 Российская Федерация, МПК E21B 45/00, G01P 3/00. Карпов В. Н., Тимонин В. В., Ткачук А. К. [и др.] Акустический способ исследования процесса воздействия исполнительных органов горных и строительных машин с ударным принципом погружения на разрабатываемый массив геосреды. Бюлл. №34 (Заявлено 28.02.2018, опубликовано 07.12.2018).



18. Карпов В. Н., Тимонин В. В., Конури А. И., Черниенков Е. М. О проблемах повышения производительности буровых работ на отечественных рудниках // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*. 2018. Т. 5, № 2. С. 46–56.
19. Кондратенко А. С., Тимонин В. В., Карпов В. Н., Попелюх А. И. Пути повышения эффективности ударно-вращательного бурения скважин // *Горный журнал*. 2018. № 5. С. 63–68. DOI: 10.17580/gzh.2018.05.09. EDN XQFGXZ.
20. Fox B. Blasthole Drilling in Open Pit Mining. Atlas Copco, Stockholm, Sweden. 2011.
21. Ghosh R., Schunnesson H., Gustafson A. Monitoring of drill system behavior for water-powered in-the-hole (ITH) drilling // *Minerals*. 2017. Vol. 7(7). 121.
22. A – Z of DTH drilling / Halco Rock Tools Limited. 05.2016. P. 78.
23. Bo Presson. How sharp rock drilling tools put money in the bank // *Mining & construction*. 2012. №3. P. 26–27.
24. Погружные пневмударники Secoroc QLX5: инструкция по эксплуатации / Перевод на русский язык. Atlas Copco Secoroc AB Fagersta, Sweden. 2015. 34 с.
25. Громадский А. С., Хруцкий А. А., Бобырь В. Г., Кузьменко Д. И. Исследование и прогнозирование износа штыревых коронок-расширителей для бурения компенсационных шпуров и скважин в крепких породах // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2016. № 7. С. 24–31.
26. Хруцкий А. А., Бобырь В. Г. Анализ исследований по изнашиванию штыревого породоразрушающего инструмента для бурения скважин // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2015. № 4. С. 220–226.
27. ГОСТ 3882-74 (ИСО 513-75) Сплавы твердые спеченные. М. : Стандартиформ, 1974. 26 с.
28. Karpov V. N., Petreev A. M. Determination of efficient rotary percussive drilling techniques for strong rocks // *Journal of Mining Science*. 2021. Vol. 57. № 3. С. 447–458.
29. Кондратенко А. С. Технологические аспекты проходки обсаженных скважин с циклично-поточным транспортированием керна // *Записки Горного института*. 2020. Т. 246. С. 610–616.
30. Isakov A. L., Kondratenko A. S. Propagation of shock pulse along a pipe during vertical penetration in soil. *Journal of Mining Science*. 2021. Vol. 57. № 2. С. 177–183.
31. URL: [https://vk.com/video/@scout\\_misd?z=video86930313\\_456239544%2Fpl\\_86930313-2](https://vk.com/video/@scout_misd?z=video86930313_456239544%2Fpl_86930313-2).
32. Oparin V. N., Karpov V. N., Timonin V. V., Konurin A. I. Evaluation of the energy efficiency of rotary percussive drilling using dimensionless energy index // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2022. Vol. 14. Iss. 5. Pp. 1486–1500.
33. Примычкин А. Ю. Моделирование работы кольцевого упругого клапана в пневмударных машинах // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2018. № 10. С. 156–162.
34. Тамбовцев П. Н., Русин Е. П. Обоснование системы воздухораспределения погружного пневмударника с экономичным рабочим циклом // *Горные науки и технологии*. 2023. Т. 8, № 4. С. 360–376.
35. Репин А. А., Тимонин В. В., Алексеев С. Е., Кокоулин Д. И., Попелюх А. И. Повышение мощности малогабаритных погружных пневмударников // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2016. № 6. С. 86–93.
36. Гришин А. Н., Гаврилов В. Л., Немова Н. А., Резник А. В. О цифровом проектировании процессов взрывания на открытых горных работах // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*. – 2021. Т. 8. № 2. С. 138–145.
37. Шевкун Е. Б., Шишкин Е. А. Прогнозирование энергоемкости бурения скважин в массиве горных пород при производстве массового взрыва // *Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство*. 2023. № 20. С. 142–149.
38. Исаков В. С., Нгуен З. Т., Чухряев Н. П. Обоснование адаптируемых параметров режущего бурового инструмента // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки*. 2016. № 1(186). С. 76–79.
39. Bagazeev V. K., Valiev N. G., Simisinov D. I. Physico-mechanical substantiation of rock mass jetting in hydraulic borehole mining of placers // *Gornyi Zhurnal*. 2015. No. 12. Pp. 25–27.
40. Симонов П. С. Экспериментальное исследование дробления горной породы единичным ударом // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020. № 1. С. 71–79.
41. Самусев П. А. Исследование влияния технологических процессов добычи угля на его грансостав // *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. 1999. № 2(9). С. 50–51. EDN WPUIDV.
42. Novinkov A. G., Tashkinov A. S., Protasov S. I., Samusev P. A. Determination of Seismic Safe Distances During Mining Blasts with Consideration of a Dominant Vibration Frequency // *Coal in the 21st Century: Mining, Processing and Safety*. Atlantis Press. 2016. P. 202–205. EDN WNWLZV.



43. <https://www.epiroc.com/ru-ru/products/rock-drilling-tools/rotary-drilling-tools> [Электронный ресурс] (дата обращения: 29.05.23).
44. Юнгмейстер Д. А., Гасымов Э. Э., Исаев А. И. Обоснование конструкции и параметров устройства для регулирования потока воздуха в погружных пневмоударниках станков шарошечного бурения // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 6-2. С. 251–267.
45. Ишейский В. А., Васильев А. С. Ключевые особенности и проблемы при обработке, анализе и интерпретации данных по процессу бурения взрывных скважин // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 3. С. 16–33.
46. Кульчицкий В. В., Насери Я. С., Токарь М. С., Березовский Я. В., Демин М. Д., Шаркунов П. А., Коженев Е. С. Автоматическое распознавание операций бурения скважины // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2021. № 1(337). С. 18–21.
47. Сухов Р. И., Реготунов А. С., Геращенко Д. А. Развитие метода получения информации о состоянии массива горных пород в процессе бурения технологических скважин // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2019. № S37. С. 446–454.
48. Садовец В. Ю., Пашков Д. А. Исследование влияния формы режущей кромки ножевого исполнительного органа геолода на энергоемкость разрушения породы забоя // Устойчивое развитие горных территорий. 2021. Т. 13. № 4(50). С. 619–628.
49. Ишейский В. А., Мартынушкин Е. А., Васильев А. С., Смирнов С. А. Отбор данных по процессу бурения взрывных скважин при формировании баз алгоритмов машинного обучения // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2022. № 4. С. 116–133.
50. Тюпин В. Н., Кубликов, С. Н. Предельные параметры буровзрывных работ при отбойке руды глубокими скважинами в камерах шахты им. Губкина АО «Комбинат КМАруда» // Горная промышленность. 2020. № 4. С. 92–97. DOI: 10.30686/1609-9192-2020-4-92-97. EDN EGUAQD.
51. Holbrook R. Intro to Deep Learning. [Электронный ресурс] URL: <https://www.kaggle.com/learn/intro-to-deep-learning> (дата обращения: 29.05.23).
52. Holbrook R. Computer Vision. [Электронный ресурс] URL: <https://www.kaggle.com/learn/computer-vision> (дата обращения: 29.05.23).
53. Simonyan K. and Zisserman A. Very Deep Convolutional Networks for Large-Scale Image Recognition. / 3rd International Conference on Learning Representations (ICLR 2015), Computational and Biological Learning Society. 2015. Pp. 1–14. DOI: 10.48550/arXiv.1409.1556.
54. Szegedy C., Vanhoucke V., Ioffe S., Shlens J. and Wojna Z. "Rethinking the Inception Architecture for Computer Vision," 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Las Vegas, NV, USA, 2016. Pp. 2818–2826. DOI: 10.1109/CVPR.2016.308.
55. Ahn H., Chung B., Yim, C. Super-resolution convolutional neural networks using modified and bilateral ReLU. In 2019 International Conference on Electronics, Information, and Communication (ICEIC). 2019. Pp. 1-4. IEEE.
56. Haris M., Shakhnarovich G., Ukita N. Deep back-projection networks for superresolution. In Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. 2018. Pp. 1664-1673.
57. Aziz A., Sohail A., Fahad L [et al.] Channel Boosted Convolutional Neural Network for Classification of Mitotic Nuclei using Histopathological Images. In: 2020 17th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST). 2020. Pp. 277–284.
58. Pang J., Chen K., Shi J., [et al.] Libra R-CNN: Towards Balanced Learning for Object Detection. 2020.
59. Abbas Q., Ibrahim M.E.A., Jaffar M.A. (2019) A comprehensive review of recent advances on deep vision systems. Artificial Intelligence Review. 2019. № 52. Pp. 39-76. DOI: 10.1007/s10462-018-9633-3
60. Ahmed U., Khan A., Khan S.H., [et al.] Transfer Learning and Meta Classification Based Deep Churn Prediction System for Telecom Industry. 2019. 1–10.
61. Akar E., Marques O., Andrews W.A., Furht B. Cloud-Based Skin Lesion Diagnosis System Using Convolutional Neural Networks. In: Intelligent Computing-Proceedings of the Computing Conference. 2019. Pp 982–1000.
62. Нажимова Н. А., Киселев А. А. Сравнительный анализ методов определения опорных точек на изображениях // Научное обозрение. Технические науки. 2024. № 1. С. 23–28.
63. Горобец В. А. Сравнительный анализ нейросетевых методов и инструментов для работы с изображениями // Интернаука. 2024. № 2-1 (319). С. 30–32.



## EXPERIENCE AND PERSPECTIVES OF APPLICATION OF RESEARCH METHODS OF ROCK MECHANICAL DESTRUCTION PROCESSES DURING DRILLING OF WELLS

Vladimir N. Karpov, Anton I. Konurin, Dmitry V. Orlov

Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Mining Institute



### Article info

Received:  
19 January 2024

Revised:  
28 March 2024

Accepted:  
25 April 2024

**Keywords:** Drilling, well, method, efficiency, acoustic method, bit, efficiency diagram, percussive drilling, strength, productivity, wear, resource, cost, modes, parameters, indenters, flight cyclogram, neural network, dataset, artificial intelligence.

### Abstract.

The paper considers the experience of application of methods of researching the process of impact of mining machine actuators during impact-rotational, rotational-impact and rotary drilling of boreholes at mining enterprises in Russia. Examples of identification of main and auxiliary operations of drilling process by video and acoustic records are given. The cyclogram of spectral analysis of acoustic data during pneumatic-hammer drilling of a deep blast hole is considered. On the basis of acoustic and video data recordings of drilling process examples of determination of mechanical, trip speed of drilling and cost of direct expenses are given. A modified expression for determining local technical rates of work (productivity) is proposed. The developed models of technical and economic efficiency of well drilling and their application in the open pit and ore mine are presented. Examples of determining resource parameters of drilling tools and submersible pneumatic hammers are considered. The results of research on determination of rational modes of impact-rotational drilling of boreholes in hard rocks are given. An expression for determining the indenter wear path depending on the location in the bit matrix during impact-rotary drilling of wells is proposed. The developed diagram of bit indenter wear estimation at impact-rotary drilling of wells is presented. The results of research of mechanical destruction of rocks by submersible pneumatic hammers with different power characteristics are given. Methods of express-analysis of acoustic records of drilling process are considered. The algorithm of neural network training in automatic mode allowing to determine the current values of drilling energy efficiency and to suggest drilling modes with minimum energy consumption of rock destruction is proposed.

**For citation:** Karpov V.N., Konurin A.I., Orlov D.V. Experience and perspectives of application of research methods of rock mechanical destruction processes during drilling of wells, *Journal of mining and geotechnical engineering*, 2(25):41. DOI: 10.26730/2618-7434-2024-2-41-78, EDN: FKRTBM

### References

1. Mel'nikov N.N., Kozyrev A.A., Lukichev S.V. Large depths - new technologies. *Vestnik Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN = Bulletin of the Kola Scientific Center of RAS*. 2013; 4(15):58–66. (In Russ.)
2. Regotunov A.S., Zharikov S.N., Sukhov R.I., Kutuev V.A. Assessment of the current state of drilling and blasting operations and the need to implement transitional processes at some large mining enterprises in the Urals and Siberia. *Problemy nedropol'zovaniya = Problems of Subsoil Use*. 2021; 2(29):52–62. (In Russ.)
3. Kotyashev A.A. Laws of change of conditions and indicators of the drilling and blasting complex operation at the open-pit mining. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Gornyy zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2018; 8:34–40. (In Russ.)
4. Vasil'ev M.V. Influence of the increasing depth of open pits on the efficiency of mining production. *Gornyy zhurnal = Mining Journal*. 1983; 2:29–33. (In Russ.)
5. Tangaev I.A. Drillability and explosiveness of rocks. M.: Nedra; 1978. 184 p. (In Russ.)
6. Shapovalenko G.N. [et al.] Organizational and technological solutions to improve the efficiency of the stripping complex of the open-pit mine «Chernogorsky». *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' = Mining information and analytical bulletin*. 2018; 12(64):36–48. (In Russ.)



7. Bovin K.A., Gilev A.V., Shigin A.O., Plotnikov I.S. Analysis of the exploitation of explosive drilling technique at the quarries of the Krasnoyarsk Territory and the Republic of Khakassia. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya Sektzii nauk o Zemle Rossiyskoy akademii estestvennykh nauk. Geologiya, razvedka i razrabotka mestorozhdeniy poleznykh iskopaemykh = Proceedings of the Siberian Department of the Section of Earth Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences. Geology, Exploration and Development of Mineral Deposits.* 2017; 40(3):99–106. (In Russ.)
8. Dmitriev V.T., Timukhin S.A., Simisinov D.I., Karyakin A.L. Analysis of energy parameters of mine hoists. *Gornyi Zhurnal = Mining Journal.* 2017; 8:70–72. (In Russ.)
9. Aksenov V.V., Khoreshok A.A., Beglyakov V.Yu. The concept of creating a promising technological mode of formation (development) of underground space on the basis of advanced development of new approaches in construction geotechnology and geotechnics. Part 1. Prerequisites and basic provisions. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Kuzbass State Technical University.* 2018; 4(128):105–114. (In Russ.)
10. Qi B., Cao P., Yang H. [et al.] Experimental and numerical study on air flow behavior for a novel retractable reverse circulation drill bit of casing-while-drilling (CwD). *Geofluids.* 2021; 2021:3586572.
11. Alieva L.A., Zhukov I.A. Analysis of bladeless drilling tool designs and problem statement of its improvement. *Transportnoe, gornoe i stroitel'noe mashinostroenie: nauka i proizvodstvo = Transport, Mining and Construction Engineering: Science and Production.* 2022; 15:157–170. (In Russ.)
12. Timofeev E.G. [et al.] Automated design method of impact machine strikers by physical and mechanical properties of the destructed objects. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' = Mining information and analytical bulletin.* 2022; 12-2:257–269. (In Russ.)
13. Ananyev K.A., Ermakov A.N., Sidorov M.S., Varnavskiy K.A. Overview of drilling rigs executive bodies. *Journal of Mining and Geotechnical Engineering.* 2022; 4(19):35–61. DOI: 10.26730/2618-7434-2022-4-35-61. (In Russ.)
14. Yakovlev A.V., Shimkiv E.S., Perekhod T.M. Research of the process of drilling of technological boreholes at the quarries of EVRAZ KGOK JSC by pneumatic percussion drilling machines. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' = Mining information and analytical bulletin.* 2022; 5:121–130. (In Russ.)
15. Novinkov A., Protasov S., Samusev P. Ensuring Seismic Safety of Underground Mines During Blasting Operations in Combined Surface-Underground Deposit Development. *E3S Web of Conferences.* 2020; 174:01016. DOI: 10.1051/e3sconf/202017401016. EDN RYFUWK.
16. Patent RU № 2662743 MPK G01P 3/36. Karpov V.N., Timonin V.V., Tkachuk A.K. [et al.] Method of investigation of the process of impact of the executive bodies of mining and construction machines on the developed massif of geo-environment. Bulletin №22 (Applied 04.10.2017, published 30.07.2018). (In Russ.)
17. Patent RU № 2674350 Rossiyskaya Federatsiya, MPK E21B 45/00, G01P 3/00. Karpov V.N., Timonin V.V., Tkachuk A.K. [et al.] Acoustic method of investigation of the process of impact of executive bodies of mining and construction machines with percussive principle of immersion on the developed massif of geo-environment. Bulletin №34 ((Applied 28.02.2018, published 07.12.2018). (In Russ.)
18. Karpov V.N., Timonin V.V., Konurin A.I., Chernienkov E.M. On the problems of increasing the productivity of drilling operations at domestic mines. *Fundamental'nye i prikladnye voprosy gornykh nauk = Fundamental and Applied Issues of Mining Sciences.* 2018; 5(2):46–56. (In Russ.)
19. Kondratenko A.S., Timonin V.V., Karpov V.N., Popelyukh A.I. Ways to improve the efficiency of percussive rotary drilling of wells. *Gornyi Zhurnal = Mining Journal.* 2018; 5:63–68. DOI: 10.17580/gzh.2018.05.09. EDN XQFGXZ. (In Russ.)
20. Fox B. Blasthole Drilling in Open Pit Mining. Atlas Copco, Stockholm, Sweden. 2011.
21. Ghosh R., Schunnesson H., Gustafson A. Monitoring of drill system behavior for water-powered in-the-hole (ITH) drilling. *Minerals.* 2017; 7(7):121.
22. A – Z of DTH drilling / Halco Rock Tools Limited. 05.2016 P.78.
23. Bo Presson. How sharp rock drilling tools put money in the bank. *Mining & construction.* 2012; 3:26–27.
24. Secoroc QLX5 submersible air hammer: operating instructions / Russian translation. Atlas Copco Secoroc AB Fagersta, Sweden. 2015. 34 s. (In Russ.)
25. Gromadskiy A.S., Khrutskiy A.A., Bobyr' V.G., Kuz'menko D.I. Research and prediction of wear of pin-type expansion bits for drilling compensatory boreholes and boreholes in hard rocks. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' = Mining information and analytical bulletin.* 2016; 7:24–31. (In Russ.)
26. Khrutskiy A.A., Bobyr' V.G. Analysis of studies on the wear of the pin rock-destroying tool for well drilling. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' = Mining information and analytical bulletin.* 2015; 4:220–226. (In Russ.)
27. GOST 3882-74 (ISO 513-75 Hard sintered alloys. Moscow: Standartinform; 1974. 26 p. (In Russ.)



28. Karpov V.N., Petreev A.M. Determination of efficient rotary percussive drilling techniques for strong rocks // *Journal of Mining Science*. 2021; 57(3):447–458.
29. Kondratenko A.S. Technological aspects of cased hole sinking with cyclic-flow core transportation. *Zapiski Gornogo instituta = Journal of Mining Institute*. 2020; 246:610–616. (In Russ.).
30. Isakov A.L., Kondratenko A.S. Propagation of shock pulse along a pipe during vertical penetration in soil. *Journal of Mining Science*. 2021; 57(2):177–183. (In Russ.).
31. URL: [https://vk.com/video/@scout\\_misd?z=video86930313\\_456239544/pl\\_86930313-2](https://vk.com/video/@scout_misd?z=video86930313_456239544/pl_86930313-2) (accessed 1.1.24)
32. Oparin V.N., Karpov V.N., Timonin V.V., Konurin A.I. Evaluation of the energy efficiency of rotary percussive drilling using dimensionless energy index. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2022; 14(5):1486–1500.
33. Primychkin A.Yu. Modeling of the ring elastic valve operation in pneumatic impact machines. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' = Mining information and analytical bulletin*. 2018; 10:156–162. (In Russ.)
34. Tambovtsev P.N., Rusin E.P. Justification of the air distribution system of a submersible pneumatic impactor with an economical working cycle. *Gornye nauki i tekhnologii = Mining Science and Technology*. 2023; 8(4):360–376. (In Russ.)
35. Repin A.A. [et al.] Power increase of small-size submersible pneumatic percussion units. *Journal of Mining Science*. 2016; 6:86–93.
36. Grishin A.N., Gavrilov V.L., Nemova N.A., Reznik A.V. On the digital design of blasting processes in open pit mining. *Fundamental'nye i prikladnye voprosy gornykh nauk = Fundamental and Applied Problems of Mining Sciences*. 2021; 8(2):138–145. (In Russ.)
37. Shevkun E.B., Shishkin E.A. Predicting the energy intensity of borehole drilling in the rock mass at mass explosion production. *Transportnoe, gornoe i stroitel'noe mashinostroenie: nauka i proizvodstvo = Transport, mining and construction engineering: science and production*. 2023; 20:142–149. (In Russ.)
38. Isakov V.S., Nguen Z. T., Chukhryaev N.P. Justification of the adaptable parameters of the cutting drilling tool. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskie nauki = Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus region. Technical Sciences*. 2016; 1(186):76–79. (In Russ.)
39. Bagazeev V.K., Valiev N.G., Simisinov D.I. Physico-mechanical substantiation of rock mass jetting in hydraulic borehole mining of placers. *Gornyi Zhurnal = Mining Journal*. 2015; 12:25–27.
40. Simonov P.S. Experimental study of rock crushing by single impact. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' = Mining information and analytical bulletin*. 2020; 1:71–79. (In Russ.)
41. Samusev P.A. Investigation of the influence of technological processes of coal mining on its granular composition. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of Kuzbass State Technical University*. 1999; 2(9):50–51. EDN WPUIDV. (In Russ.)
42. Novinkov A.G., Tashkinov A.S., Protasov S.I., Samusev P.A. Determination of Seismic Safe Distances During Mining Blasts with Consideration of a Dominant Vibration Frequency. *Coal in the 21st Century: Mining, Processing and Safety*. Atlantis Press. 2016. P. 202-205. EDN WNWZLV.
43. <https://www.epiroc.com/ru-ru/products/rock-drilling-tools/> (accessed: 29.05.23). (In Russ.)
44. Yungmeyster D.A., Gasymov E.E., Isaev A.I. Justification of the design and parameters of the device for regulating the air flow in the submersible pneumatic percussion machines of roller cone drilling. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' = Mining information and analytical bulletin*. 2022; 6-2:251–267. (In Russ.)
45. Isheyskiy V.A., Vasil'ev A.S. Key features and problems in processing, analyzing and interpreting the data on the process of explosive drilling. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' = Mining information and analytical bulletin*. 2022; 3:16–33. (In Russ.)
46. Kul'chitskiy V.V. [et al.] Automatic recognition of the borehole drilling operations. *Stroitel'stvo neftyanykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more = Onshore and offshore oil and gas well construction*. 2021; 1(337):18–21. (In Russ.)
47. Sukhov R.I., Regotunov A.S., Gerashchenko D.A. Development of the method for obtaining information about the state of the rock massif in the process of drilling technological wells. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' = Mining information and analytical bulletin*. 2019; S37:446–454. (In Russ.)
48. Sadovets V.Yu., Pashkov D.A. Research of the influence of the cutting-edge shape of the geohod knife actuator on the energy intensity of the bottom-hole rock destruction. *Sustainable development of mountain territories*. 2021; 13; 4(50):619–628. (In Russ.)
49. Isheyskiy V.A., Martynushkin E.A., Vasil'ev A.S., Smirnov S.A. Data selection on the process of explosive wells drilling at forming the bases of machine learning algorithms. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' = Mining information and analytical bulletin*. 2022; 4:116–133. (In Russ.)



50. Tyupin V.N., Kublikov S.N. Limit parameters of drilling and blasting operations during ore stripping by deep boreholes in the chambers of the Gubkin mine of JSC «Kombinat KMaruda». *Gornaya promyshlennost' = Mining Industry*. 2020; 4:92–97. (In Russ.)
51. Holbrook R. Intro to Deep Learning. URL: <https://www.kaggle.com/learn/intro-to-deep-learning> (accessed: 29.05.23).
52. Holbrook R. Computer Vision. URL: <https://www.kaggle.com/learn/computer-vision> (accessed: 29.05.23).
53. Simonyan K., Zisserman A. Very Deep Convolutional Networks for Large-Scale Image Recognition. *3rd International Conference on Learning Representations (ICLR 2015), Computational and Biological Learning Society*. 2015. Pp. 1–14. DOI: 10.48550/arXiv.1409.1556.
54. Szegedy C., Vanhoucke V., Ioffe S., Shlens J., Wojna Z. "Rethinking the Inception Architecture for Computer Vision," 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Las Vegas, NV, USA. 2016. Pp. 2818–2826. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.308>.
55. Ahn H., Chung B., Yim C. Super-resolution convolutional neural networks using modified and bilateral ReLU. In *2019 International Conference on Electronics, Information, and Communication (ICEIC)*. 2019. Pp. 1–4. IEEE.
56. Haris M., Shakhnarovich G., Ukita N. Deep back-projection networks for superresolution. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*. 2018. Pp. 1664-1673.
57. Aziz A., Sohail A., Fahad L. [et al.] Channel Boosted Convolutional Neural Network for Classification of Mitotic Nuclei using Histopathological Images. In: *2020 17th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST)*. 2020. Pp. 277–284.
58. Pang J., Chen K., Shi J. [et al.] Libra R-CNN: Towards Balanced Learning for Object Detection. 2020.
59. Abbas Q., Ibrahim M.E.A., Jaffar M.A. A comprehensive review of recent advances on deep vision systems. *Artificial Intelligence Review*. 2019; 52:39–76. DOI: 10.1007/s10462-018-9633-3.
60. Ahmed U., Khan A., Khan S.H. [et al.] Transfer Learning and Meta Classification Based Deep Churn Prediction System for Telecom Industry. 2019. Pp. 1–10.
61. Akar E., Marques O., Andrews W.A., Furht B. Cloud-Based Skin Lesion Diagnosis System Using Convolutional Neural Networks. In: *Intelligent Computing-Proceedings of the Computing Conference*. 2019. Pp. 982–1000.
62. Nazhimova N.A., Kiselev A.A. Comparative analysis of methods for determining the reference points on image. *Nauchnoe obozrenie. Tekhnicheskie nauki = Scientific Review. Technical science*. 2024; 1:23–28. (In Russ.)
63. Gorobets V.A. Comparative analysis of neural network methods and tools for working with images. *Internauka*. 2024; 2–1(319):30–32. (In Russ.)

### Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2024 The Authors. Published by T. F. Gorbachev Kuzbass State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

### Information about the authors

**Vladimir N. Karpov**, PhD, senior researcher of Open Pit Mining Laboratory  
e-mail: [karpov@misd.ru](mailto:karpov@misd.ru)

**Anton I. Konurin**, PhD, senior researcher of Physical and Technical Geotechnologies  
e-mail: [akonurin@yandex.ru](mailto:akonurin@yandex.ru)

**Dmitry V. Orlov**, postgraduate student of Ore Underground Mining Laboratory  
e-mail: [dmior198@gmail.com](mailto:dmior198@gmail.com)

Chinakal Institute of Mining of the Siberian Branch of the RAS, 630091, 54 Krasny Ave., Novosibirsk, Russia

