



Крючков Иван Сергеевич,
ОАО «ВИОГЕМ», г. Белгород

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ И ЭНЕРГОЕМКОСТИ ШАРОШЕЧНОГО БУРЕНИЯ СКВАЖИН

Аннотация. Для обеспечения добычи полезных ископаемых необходимо проводить бурение скважин, которое требует больших затрат энергии, поэтому эффективность бурения напрямую влияет на экономику. В связи с этим, определение скорости и энергоемкости шарошечного бурения является актуальной научной задачей, которая вызывает интерес у широкого круга специалистов. В данной статье рассматриваются существующие методы определения скорости и энергоемкости шарошечного бурения, и проводится анализ их преимуществ и недостатков. Результаты этого анализа могут быть полезными для улучшения технологий бурения скважин и повышения эффективности бурения. Статья содержит результаты теоретических и практических исследований, проведенных учеными, такими как Ржевский В.В., Новик Г.Я., Крюков Г.М., Кутузов Б.Н., Тангаев И.А., Тюпин В.Н. по определению скорости и энергоемкости шарошечного бурения. Подчеркивается важность учета геологических и структурных факторов при определении энергоемкости бурения, а также сложность определения этих факторов на основе параметров бурения. Представленные формулы требуют адаптации к конкретным типам месторождений и используемому горному оборудованию и аппаратуры для фиксации параметров при бурении скважин.

Ключевые слова: разрушение горных пород, шарошечное бурение, скорость бурения, энергоемкость бурения, трудность бурения, добыча полезных ископаемых.



Введение

В настоящее время добыча твердых полезных ископаемых является одной из важнейших отраслей экономики во всем мире. При шарошечном бурении разрушение горного массива происходит за счет действия шарошек, которые расположены на рабочей поверхности бурового инструмента. При вращении бурового инструмента шарошки врезаются в горную породу, создавая радиальные и осевые нагрузки. Радиальные нагрузки вызывают разрушение породы в направлении от центра бурового инструмента, а осевые силы обуславливают продольное разрушение. При этом происходит измельчение горной породы и ее удаление из зоны действия шарошек.

Анализ существующих методов определения скорости и энергоемкости шарошечного бурения скважин включает изучение различных теоретических и эмпирических зависимостей, которые были получены на основе множества факторов, таких как физико-технические свойства горных пород, параметры бурового инструмента, тип и конструкция оборудования, режимы бурения и т.д. Каждый из этих методов имеет свои преимущества и недостатки, и выбор метода зависит от конкретных условий работы и требований к точности измерения.

При этом зная скорость бурения данного станка в массивах с определенными физико-техническими параметрами можно нормировать процесс бурения.

Зависимости для определения скорости бурения

Вопросам изучения сопротивляемости горных пород разрушению и скорости бурения при разработке месторождений посвящено множество работ, таких ученых, как Успенский Н.С., Ржевский В.В., Новик Г.Я., Крюков Г.М., Кутузов Б.Н., Тангаев И.А., Мосинец В.Н. [1-11].

Физические свойства горных пород используются во многих расчетах, но прежде всего в расчете скорости бурения. Для расчета скорости шарошечного бурения, учеными Долежаликом и Успенским разработана формула [11]:



$$v_{ш} = \frac{0.425bP_{oc}n}{k_1k_2^2R_1^2\sigma_{сж}} \sqrt[3]{\frac{E}{\sigma_{сж}}}, \quad (1.1)$$

где b — ширина основания зубца; P_{oc} — осевое усилие; n — частота вращения бурового става; k_1 и k_2 — коэффициенты пропорциональности; R_1 — радиус долота; $\sigma_{сж}$ — предел прочности пород на сжатие; E — модуль упругости Юнга.

В справочнике по открытым горным работам [12] представлено выражение для определения теоретической скорости шарошечного бурения:

$$v = 3k_{сж}hn_{вр}, \quad (1.2)$$

где $k_{сж} = 0,5/0,3$ — коэффициент, учитывающий уменьшение скорости бурения за счет неполного скола породы между зубьями; h — глубина внедрения зуба.

Для определения скорости шарошечного бурения Г.М. Крюков предложил функцию: [1]

$$v_6 = f(P_{oc}, n, Q, q_2, A_1, A_2), \quad (1.3)$$

где f — коэффициент крепости по шкале М.М. Протодяконова; Q — расход воздуха; q_2 — расход воды; A_1 — группа физико-технических параметров пород; A_2 — группа геометрических параметров шарошечного долота.

Скорость бурения шарошечными долотами по Г.М. Крюкову:

$$V_{бур} = nk_2h_в, \quad (1.4)$$

где k_2 — коэффициент, зависящий от степени разрушения породы на забое при совершении одного оборота шарошки, и от среднего расстояния между зубьями твердосплавных венцов; $h_в$ — глубина вдавливания зубьев шарошки в горную породу.

$$h_в = \left(\frac{k_1P_{oc}}{\varepsilon_1\sigma_{мд}} \right)^{2/3}, \quad (1.5)$$

где k_1 — коэффициент, зависящий от степени очистки забоя скважины от шлама; ε_1 — значение, рассчитываемое по геометрическим параметрам долота



и шарошек; $\sigma_{\text{мд}}$ — напряжения, соответствующие интенсивному мелкодисперсному дроблению породы под зубом долота и зависящие от коэффициента крепости пород f .

Комащенко В.И. представил формулу для определения механической скорости шарошечного бурения в виде [13]:

$$v_{\text{мех}} = \frac{0,01P_{\text{ос}}n^{0,8}}{f^{1,6}D^{*9,8}}, \quad (1.6)$$

где D — диаметр долота.

И формулу для инженерных расчетов механической скорости бурения:

$$v_{\text{мех}} = 24 \frac{P_{\text{ос}}n}{P_{\text{к}}D}, \quad (1.7)$$

где $P_{\text{к}}$ — предел прочности породы на раздавливание.

Данная формула верна при условии, $150 \text{ кПа} < P_{\text{к}} < 400 \text{ кПа}$; $70 \text{ мин}^{-1} < n < 150 \text{ мин}^{-1}$; $150 \text{ мм} < D < 400 \text{ мм}$; $150 \text{ кН} < P_{\text{ос}} < 400 \text{ кН}$.

В [2] Кутузов Б.Н. привел расчет скорости шарошечного бурения. Профессор предположил, что за один оборот шарошечного долота с количеством зубков Z каждая из шарошек совершает m оборотов.

Скорость бурения по Б.Н. Кутузову:

$$v_{\text{б}} = h_{\text{ср}}n, \text{ м/мин.} \quad (1.8)$$

Величина среднего углубления долота за один оборот:

$$h_{\text{ср}} = \frac{mZV_{\text{раз}}}{\pi R_{\text{д}}^2}, \text{ м/об,} \quad (1.9)$$

где m — соотношение частоты вращения шарошки и долота; Z — число породоразрушающих зубков на долоте; $R_{\text{д}}$ — радиус долота, м.

Объем зоны разрушения при единичном внедрении:

$$V_{\text{раз}} = r_1^2 l \left[\frac{\pi}{2} + \sqrt[3]{\frac{\sigma_{\text{р}}}{\sigma_{\text{сж}}} \left(1 - \sqrt{\frac{\sigma_{\text{р}}}{\sigma_{\text{сж}}}} \right)^2} \right], \text{ м}^3, \quad (1.10)$$

где $\sigma_{\text{р}}$ — предел прочности на растяжение.

Радиусы зоны дробления r_1 и зоны скалывания r_2 :



$$r_1 = 0,678 \frac{P_{oc} K_{ш} \varepsilon_{max}}{c_1 l \sigma_{сж}} * \frac{\left(\frac{\Delta h}{n}\right)^{1/3} \left(\frac{E}{\sigma_{сж}}\right)^{2/3}}{(1-2\theta_{ск})(1+f_{тр} \sin \pi \beta)} ; \quad (1.11)$$

$$r_2 = \sqrt{\frac{\sigma_{сж}}{\sigma_p}} * r_1, \quad (1.12)$$

где $K_{ш}$ — коэффициент, учитывающий взаимодействие тела шарошки с породой через продукты разрушения; ε_{max} — максимальное значение коэффициента ε , учитывающего одновременность внедрения в породу нескольких зубков; c_1 — коэффициент, зависящий от произведения α_1 ; α_1 — известная функция угла килеватости; $\theta_{ск}$ — полярный угол трения, определяющий зону скола; l — длина лезвия, м.

Представленные выше формулы позволяют выполнять расчет скорости шарошечного бурения и в совокупности учитывают физико-технические свойства горных пород, параметры используемого бурового оборудования и режимы бурения. Однако, отсутствие универсальной зависимости, позволяющей включать в себя все известные характеристики, получаемые при сопровождении процесса бурения, является недостатком, способным оказывать весьма существенное влияние на полученные экспериментальные данные.

Опираясь на закон сохранения энергии, В.Н. Тюпин получил зависимость скорости бурения трещиноватого горного массива шарошечным долотом в виде [7]:

$$v_6 = \frac{\pi^2 P_{oc} n d_3^2}{2 \left(\frac{\sigma_c^2(r)}{8E} \Phi d_e d_d^2 - M \right)} = \frac{K P_{oc} n d_3^2}{10^3 f d_e \Phi d_d^2 - M}, \quad (1.13)$$

где K — коэффициент, устанавливаемый в процессе бурения скважин; d_3 , d_d — диаметр зубка и диаметр долота; d_e — размер естественной отдельности; Φ — показатель трещиноватости горного массива, M — крутящий момент.

Приведенные математические зависимости связывают между собой параметры бурения и физико-технические свойства массива горных пород, но в связи с большой сложностью теоретических расчетов и необходимостью эмпирического определения многих входящих в формулы величин, на практике



обычно пользуются опытными данными о влиянии на скорость бурения конструктивных и режимных параметров.

Анализ современных методов оценки энергоемкости бурения скважин и шпуров

В изучение энергоемкости бурения внесли свой вклад многие ученые, предложив формулы определения энергоемкости бурения.

Оценкой энергоемкости при открытом способе разработки месторождений в конце 1970-х годов активно занимались академики В.В. Ржевский и Г.Я. Новик. Основным методом, разработанным этими учеными, основывался на математическом моделировании процесса разрушения породы и взаимодействия с ней инструмента буровой установки.

В работе [5] представлен принцип оценки разрушения горной породы, где полная энергия разрушения A_{Π} включает в себя разрушающие напряжения A_o , непроизводительные затраты, относящиеся к конструкции рабочего механизма A_k и особенности свойств горных пород A_{Φ} .

$$A_{\Pi} = A_o + A_k + A_{\Phi}. \quad (1.14)$$

Разрушающее напряжение A_o будет оставаться постоянным для определенного типа горной породы при одинаковой степени дробления, вне зависимости от метода разрушения. Удельная энергия разрушения идеально упругой породы $A_o = \frac{\sigma_{сж}^2}{2E}$ (1.15), а при пластической деформации происходят дополнительные затраты.

$$A_o + A_{\Phi} = \frac{\sigma_{сж}^2}{2E} \left(2 \frac{E}{E_{деф}} - 1 \right), \quad (1.16)$$

где $E_{деф}$ — модуль деформации.

В.В. Ржевский и Г.Я. Новик представили в своей работе принципы для относительной оценки трудности разрушения горных пород:

1. Разрушение горной породы вызывается воздействием внешних сил, таких как сжимающие, растягивающие и скалывающие, которые достигают



пределов прочности на сжатие $\sigma_{сж}$, на растяжение σ_p и сдвиг $\tau_{сдв}$. Что приводит к образованию новых поверхностей разрушения ΔS .

2. Воздействие разрушающих сил может быть оценено средним значением предела прочности при разрушении $\sigma_{раз} = \frac{\sum F_i}{\Delta S}$ (1.17). Где в числителе сумма внешних сил, а в знаменателе площадь сечения.

3. В различных горных процессах доли сжимающих, растягивающих и скалывающих напряжений различаются и характеризуются коэффициентами k_1 — k_3 .

$$\sigma_{раз} = k_1\sigma_{сж} + k_2\tau_{сдв} + k_3\sigma_p. \quad (1.18)$$

Для общей относительной оценки трудности разрушения пород можно принять условие равномерного распределения усилий сжатия, растяжения и сдвига.

$$\sigma_{раз} = \frac{1}{3} (\sigma_{сж} + \sigma_p + \tau_{сдв}). \quad (1.19)$$

Для классификации пород удобно использовать относительный показатель, разделив величину $\sigma_{раз}$ на $6,7 * 10^6$ Па.

4. Необходимо учитывать трещиноватость третьего порядка путем определения истинной поверхности разрушения (ΔS без учета поверхности трещин в массиве) или через акустический показатель трещиноватости массива A_i . В результате прочности массива $\sigma_{раз.м} = \frac{\Delta S}{\Delta S + S_0} \sigma_{раз}$ (1.20) или $\sigma_{раз.м} = A_i \sigma_{раз}$ (1.21), где S_0 — общая площадь поверхностей предыдущих трещин и полостей.

5. При механическом воздействии на горную породу необходимо учитывать также объемный вес породы γ , так как преодолевается сила тяжести разрушенных частиц.

Предел прочности разрушаемого массива пород можно оценить по формуле:

$$\sigma_{раз.м} = A_i \sigma_{раз} + k_b l \gamma. \quad (1.22)$$



В данной формуле второе слагаемое характеризует усилия, требуемые на преодоление сил тяжести, степень влияния которых на $\sigma_{\text{раз.м}}$ учитывается величиной k_B ; l — расстояние перемещения частиц породы, м.

Степень влияния объемного веса на разрушаемость породы подлежит изучению для каждого процесса, но для относительной характеристики применяется $k_B l \approx 5 * 10^{-5}$ м.

Следовательно, относительная трудность разрушения рассчитывается по формуле:

$$P_{\text{тр}} = 5 * 10^{-8} (\sigma_{\text{сж}} + \sigma_p + \tau_{\text{сдв}}) A_i + 5 * 10^{-5} \gamma. \quad (1.23)$$

Ржевский В.В. и Новик Г.Я. разделили горные породы по трудности бурения на 5 категорий и 25 классов (табл. 1). Горные породы, имеющие значение относительного показателя трудности разрушения свыше 25 встречаются крайне редко и не входят в классификацию.

Таблица 1

Классификация горных пород по трудности бурения

Класс	$P_{\text{тр}}$	Описание горных пород
I	1÷5	Мягкие, плотные и полускальные связные породы
II	5,1÷10	Легкоразрушаемые скальные
III	10,1÷15	Скальные породы средней трудности разрушения
IV	15,1÷20	Трудноразрушаемые скальные
V	20,1÷25	Весьма трудноразрушаемые скальные

В целом, методика Ржевского и Новика является достаточно сложной и требует серьезных знаний в области математического моделирования и физики разрушения породы. Однако она позволяет достаточно точно оценивать энергоемкость процесса бурения, что может быть полезным при планировании и оптимизации работы буровых установок.

И.А. Тангаев предложил формулу для определения удельной энергоемкости бурения [6]:



$$e = \frac{N}{v}, \quad (1.24)$$

где N — частота вращения бурового става; v — скорость бурения скважин.

Частота вращения бурового става связана крутящим моментом долота $M_{кр}$, мощностью вращателя n и КПД трансмиссии вращателя η :

$$N = 2\pi * 10^{-3} * M_{кр} * n * \eta^{-1}. \quad (1.25)$$

Следующее уравнение описывает зависимость момента вращения долота от диаметра долота D , осевого усилия P_0 , показателя очистки скважины m и эмпирического коэффициента k_1 , который зависит от крепости породы.

$$M_{кр} = 2,84 * k_1 * D * (0,22 * P_0)^m. \quad (1.26)$$

В [7] также приведена формула определения показателя буримости массива горных пород, которая отражает энергоёмкость бурения и приведена в Дж/м².

$$P_6 = f * d_e * \Phi = K * 10^{-3} \frac{P_{oc} n d_3^2}{v_6 d_d^2} + 10^{-3} \frac{M}{d_d^2}. \quad (1.27)$$

Величина энергоёмкости бурения напрямую зависит от геолого-структурных особенностей массива и в большей степени от крепости и трещиноватости слагаемых его горных пород. Определить каждый из вышеперечисленных природных факторов по технологическим параметрам бурения (давление на забой, вращающий момент, частота вращения, давление воздуха и скорость бурения) весьма затруднительно и нецелесообразно, так как степень их влияния на буримость и взрываемость пород весьма разнообразна и зависит от множества дополнительных геолого-структурных факторов. Поэтому данные формулы требуют непосредственной адаптации к конкретному типу месторождения и используемому на нем горнодобывающему оборудованию.

Заключение

В результате проведенного анализа существующих методов можно сделать следующие выводы:



1. В целом, выбор метода зависит от конкретных условий бурения и требует компромисса между точностью результатов и простотой использования.

2. В настоящее время формулы определения скорости и энергоемкости шарошечного бурения В.Н. Тюпина, установленные методом математического моделирования с использованием закона сохранения энергии [7], являются наиболее приемлемыми, так как позволяют учитывать параметры бурового оборудования, режимы бурения, параметры долот, крепость и трещиноватость массива горных пород, но требуют предварительного подбора эмпирического коэффициента. Сложность получения исходных данных для расчета скорости бурения и показателя буримости компенсируется наличием на горных предприятиях автоматизированных систем (Wenco, АСУ ГТК «Карьер» и др.), способных оптимизировать работу горного оборудования и считывать, в том числе, параметры бурения (давление на забой, частота вращения бурового инструмента, крутящий момент, параметры долот). Трещиноватость и крепость горных пород, в свою очередь, может быть получена из геомеханической модели месторождения, которой в настоящее время согласно ФНиП, должны обладать предприятия с объемом разработки горной массы от 1 млн. м³ [14]. Поэтому эмпирический коэффициент можно определить путем проведения промышленных экспериментальных исследований.

3. Дальнейшие исследования в этом направлении могут повысить точность определения скорости и энергоемкости шарошечного бурения скважин в различных по физико-техническим параметрам массивах и повысить эффективность процесса бурения.

Список литературы:

1. Крюков Г.М. Физика разрушения горных пород при бурении и взрывании. – М.: Горная книга, 2006. – 330 с.
2. Кутузов Б.Н. Взрывное и механическое разрушение горных пород. – М.: Недра, 1973. – 311с.



3. Кутузов Б.Н., Тюпин В.Н. Упрощенный расчет параметров массового взрыва на карьерах // Известия ВУЗов. Горный журнал. – 1985, №7. С. 66–67.
4. Мосинец В.Н., Пашков А.Д., Латышев В.А. Разрушение горных пород. – М.: Недра, 1975. – 216 с.
5. Ржевский В. В., Новик Г. Я. Основы физики горных пород. М.: Недра, 1985. – 375 с.
6. Тангаев И.А. Энергоемкость процессов добычи и переработки полезных ископаемых. – М.: Недра, 1986. – 231с.
7. Тюпин В.Н. Установление скорости шарошечного и ударно-вращательного бурения скважин с использованием закона сохранения энергии // ГИАБ. – 2020. №6. С. 76–84.
8. Тюпин В.Н., Игнатенко И.М., Агарков И.Б., Крючков И.С. Автоматизированный расчет параметров взрывных работ на основе показателя буримости трещиноватого массива при шарошечном бурении скважин на карьерах // Горный журнал. – 2021. № 12. С. 75–79.
9. Тюпин В.Н., Игнатенко И.М., Крючков И.С., Ушаков Д.К. Установление скорости шарошечного бурения взрывных скважин и показателя буримости трещиноватых массивов горных пород // Освоение месторождений минеральных ресурсов и подземное строительство в сложных гидрогеологических условиях: сборник материалов четырнадцатого международного симпозиума. - Белгород: ИД "Белгород" НИУ "БелГУ", – 2019. С. 145–151.
10. Тюпин В.Н. Взрывные и геомеханические процессы в трещиноватых напряженных массивах. – Белгород: ИД «Белгород» НИУ «БелГУ», 2017. – 192с.
11. Успенский Н.С. Курс глубокого бурения ударным способом. – М.: Изд-во Совета нефтяной промышленности, 1924. – 222 с.



12. Трубецкой К.Н., Потапов М.Г., Виноцкий К.Е., Мельникова Н.Н. Справочник. Открытые горные работы. – М.: Горное бюро, 1994. – 590 с.
13. Комащенко В.И., Носков В.Ф., Исмаилов Т.Т. Взрывные работы: Учебник для вузов. – М.: Высшая школа, 2007. – 439 с.
14. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила обеспечения устойчивости бортов и уступов карьеров, разрезов и откосов отвалов». Утв. приказом Ростехнадзора от 13.11.2020 № 439.