Министерство образования и науки Российской Федерации

Сибирский федеральный университет

В. Д. Буткин, И. И. Демченко

БУРОВЫЕ МАШИНЫ И ИНСТРУМЕНТЫ

Допущено Учебно-методическим объединением вузов Российской Федерации по образованию в области горного дела в качестве учебного пособия для студентов вузов, обучающихся по специальности «Горные машины и оборудование» направления подготовки «Технологические машины и оборудование», 26.10.2011

Красноярск
СФУ
2012

УДК 622.242(07)
ББК 33.13я73
Б932

Р е ц е н з е н т ы:
Б. А. Катанов, д-р техн. наук, проф. Кузбасского государственного технического университета;
Ю. А. Афанасьев, канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник зав. отделом «Диагностика» «СУЭК – Красноярск»

Буткин, В. Д.
Б932 Буровые машины и инструменты : учеб. пособие / В. Д. Буткин, И. И. Демченко. – Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2012. – 120 с.
ISBN 978-5-7638-2514-5

В учебном пособии рассмотрены характеристики и технологии бурения взрывных скважин, предназначенных для подготовки горных пород к выемке, рациональные конструкции бурового инструмента, факторы и критерии оценки работоспособности и эффективности бурового инструмента. Приведены параметры режимов бурения шарошечными долотами. Представлены методики проверочных расчетов энергосиловых параметров и расчета эксплуатационных показателей буровых станков. Разработана программа «Информационная система расчета параметров бурового оборудования», позволяющая автоматизировать расчеты по выбору бурового оборудования.

Предназначено для студентов вузов, обучающихся по специальности «Горные машины и оборудование» направления подготовки «Технологические машины и оборудование».

УДК 622.242(07)
ББК 33.13я73

ISBN 978-5-7638-2514-5

© Сибирский федеральный университет, 2012

ВВЕДЕНИЕ

При проектировании и эксплуатации буровой техники на карьерах выделяются две основные инженерные задачи: 1) выбор способа бурения и типоразмера бурового станка; 2) определение рациональных параметров и эксплуатационных характеристик процесса бурения.

Выбор способа бурения (шарошечного, ударно-вращательного и др.) и типоразмера бурового станка, характеризуемого прежде всего диаметром скважин и требуемой сменной производительностью, осуществляется инженерами-технологами и инженерами-механиками на основе изучения известных геологических и горно-технологических особенностей месторождения и заданных экономических требований, которые определяют конструкцию карьера и параметры системы разработки (высоту уступов, ширину рабочих площадок и др.).

К главным факторам, учитываемым при выборе способа бурения и технологических параметров буровых машин, относятся физико-механические свойства буримых пород: крепость, абразивность, трещиноватость, влажность и т. д.

В данной работе способ бурения, крепость горных пород и типоразмер бурового станка считаются известными. Студенту предлагается самостоятельно решать вопросы оптимизации процессов бурения. Для этого необходимо:

1) выбрать рациональные конструкции бурового инструмента;

2) определить рациональные параметры режима бурения;

3) выполнить проверочные расчеты энергосиловых параметров буровой машины (мощность механизмов, крутящие моменты и др.).

Расчет эксплуатационных показателей работы буровых машин (производительность, себестоимость проходки скважин) позволяет определить потребность в средствах бурения и необходимые расходы.

Учебное пособие может быть использовано при выполнении практических занятий, курсового проектирования, самостоятельной подготовки студентами, изучающими курс «Механическое оборудование карьеров», и написании соответствующего раздела при дипломном проектировании, а также может быть полезно инженерам горного производства, осуществляющим проектирование применения

буровых машин на карьерах. Для этого приводится достаточный справочный материал (см. прил. 1) и методики выполнения расчетов.

В разработке программы «Информационная система расчета параметров бурового оборудования» (см. прил. 2) и примера расчета по обоснованию и выбору конструкции бурового долота и определения рационального режима бурения, энергосиловых параметров и эксплуатационных показателей (см. п. 3.4) принимал участие Д. С. Догадин.

1. ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИИ БУРЕНИЯ ВЗРЫВНЫХ СКВАЖИН. ВОПРОСЫ ТЕОРИИ РЕЖИМОВ БУРЕНИЯ

Выбираемые конструкции и энергосиловые параметры буровых машин должны удовлетворять технологическим требованиям. Во-первых, буровая машина должна соответствовать производительности экскаватора. В идеале двухсменная работа бурового станка должна обеспечивать трехсменную работу экскаватора. Это достигается главным образом подбором скорости бурения и диаметра скважины, обеспечивающих нужный выход взорванной горной массы с 1 м скважины, который приближенно пропорционален квадрату диаметра скважины. В то же время главным фактором выбора диаметра бурения является требуемая степень дробления горной массы, зависящая от трещиноватости и крепости пород взрываемого блока. Во-вторых, типы буровых машин и инструментов должны соответствовать крепости горных пород.

В настоящее время на карьерах преобладают *станки шарошечного бурения* (СБШ), которые правильнее называть станками вращательного действия, так как на них применяют как шарошечные, так и долота режущего типа и комбинированные (режуще-шарошечные, шарошечно-ударные и др.) буровые инструменты. На специализированных *станках вращательного бурения резанием* (СБР) используют только режущие долота (РД) и кроме шнековой очистки применяют также шнекопневматическую очистку скважин. От станков СБШ и СБР существенно отличаются *станки ударно-вращательного бурения* (СБУ), которые содержат погружные пневмоударники, соединенные с коронками. При этом порода разрушается в основном ударными нагрузками, так как крутящие моменты и осевые нагрузки незначительны.

Станки ударно-вращательного бурения с выносным гидравлическим или пневматическим ударно-вращательным механизмом (как правило, зарубежного производства) в небольшом количестве используются на отечественных глубоких карьерах для бурения скважин диаметром преимущественно 100–160 мм в породах средней крепости и крепких. Редко и только в термобуримых крепких породах (кварцитах, гранитах) используют *комбинированные станки* – шарошечные с

термическим расширителем. Нижнюю часть скважины, пройденную шарошечным долотом, расширяют от 250–270 до 400–600 мм с помощью термической горелки. *Огнеструйные буровые станки* могут применяться в комплексе со станками ударно-вращательного бурения.

Эффективность процесса работы буровых машин в сильной степени зависит от режимов бурения, которые характеризуются силой и скоростью воздействия бурового инструмента на забой скважины, а также степенью очистки скважины от разрушенной породы.

К *режимным параметрам* вращательного бурения относят осевую нагрузку на долото $P_{\text{ос}}$, скорость вращения долота ω и расход сжатого воздуха Q, подаваемого в скважину. От величины и соотношения режимных параметров существенно зависят такие основные показатели проходки скважин, как скорость бурения $V_{\text{б}}$ и стойкость долота $l_{\text{д}}$, определяющие конечные результаты (сменную производительность станка $\text{П}_{\text{с}}$, себестоимость бурения S, удельную энергоемкость бурения E).

К параметрам ударно-вращательного и вращательно-ударного бурения дополнительно относятся энергия и частота ударов по долоту.

У применяемых станков типа СБУ ударная мощность пневмоударника и частота ударов являются нерегулируемыми параметрами, хотя разработаны конструкции, позволяющие изменять в процессе бурения энергию удара, частоту ударов, расход и давление сжатого воздуха в зависимости от прочности буримых пород.

Рациональным режимом бурения является такое сочетание режимных параметров, при котором достигается заданный или высокий и экономически выгодный (по фактору износостойкости долота) уровень скорости бурения. *Оптимальные режимы бурения* могут соответствовать экстремальным значениям стоимости проходки скважины, удельной энергоемкости процесса бурения, технической производительности станка и другим критериям.

Методика расчета (расчетные формулы) режимов бурения зависит от способа бурения и конструкции применяемого долота, при выборе которых помимо технологических требований (производительность экскаватора, диаметр скважин и др.) главным фактором являются физико-механические свойства горных пород. Последние применительно к бурению оцениваются контактной прочностью пород $P_{\text{к}}$, прочностью породы при бурении $\sigma_{\text{б}}$ или коэффициентом крепости горных пород f по шкале профессора М. М. Протодьяконова.

Возможный уровень режимных параметров зависит от прочности породоразрушающих элементов долот и от мощности вращательно-подающих и ударных механизмов, что влияет на величину вдавливающих и тангенциальных усилий при вращении инструмента, на крутящий момент на долоте, амплитуду силовых импульсов, удельные контактные нагрузки и контактные напряжения в процессе внедрения инструмента в породу. Поэтому необходимо рассчитать мощность на оптимальных режимах бурения и сравнить ее с паспортной.

Теория расчета режимов бурения опирается на общие закономерности механического разрушения горных пород.

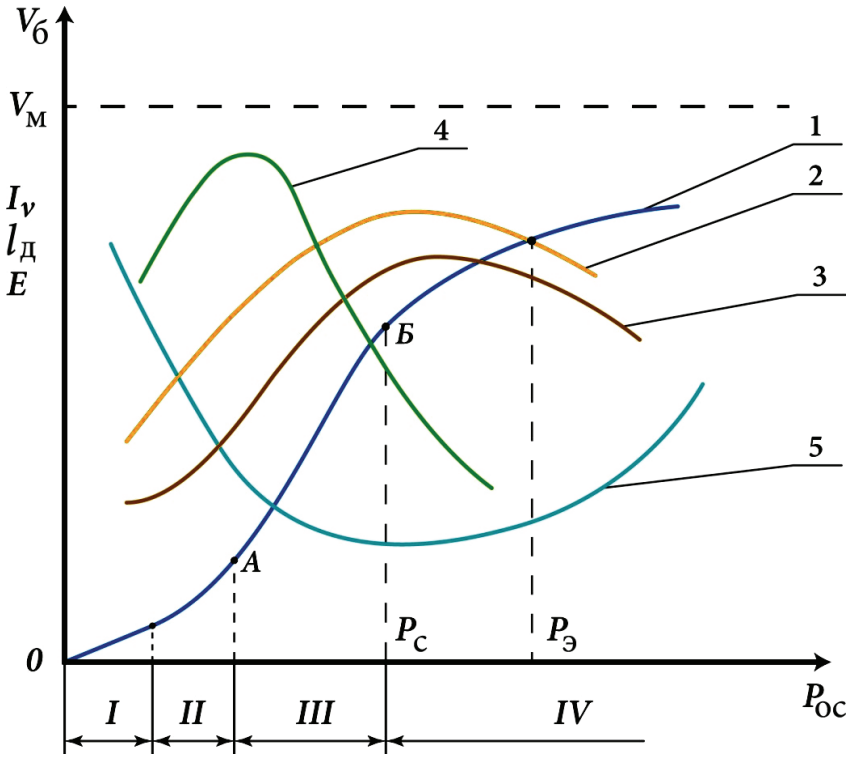


Рис. 1. Влияние осевой нагрузки на параметры бурового процесса: 1 – скорость бурения $V_б$; 2 – силовой градиент скорости бурения I_v; 3 – стойкость долота $l_д$; 4 – $dV_б/dP_{ос}$; 5 – удельная энергоемкость E

Основное влияние на процесс разрушения горных пород оказывают величина осевой нагрузки долота $P_{ос}$, состоящей из статической $P_{ст}$ и динамической $P_{дин}$ составляющих нагрузки: $P_{ос} = P_{ст} + P_{дин}$. При этом центральное значение имеет зависимость скорости разрушения горной породы (оцениваемая скоростью бурения $V_б$ или глубиной разрушения породы за один оборот долота h) от осевой нагрузки на долото $P_{ос}$ (рис. 1).

В зависимости от соотношения между удельным контактным давлением долота $P_{\text{уд}}$ и контактной (агрегатной) прочностью породы $P_{\text{к}}$ различают три вида механического разрушения породы: *поверхностное* (зона I), *усталостное* (зона II) и *объемное* (зона III), при котором на контакте бурового инструмента с породой возникает критическое напряжение, значительно превосходящее контактную прочность породы. В зоне III зубья или лезвия могут активно проникать в породу и отделять от массива отдельные куски, поэтому достигаются наименьшие значения энергоемкости разрушения горной породы E и себестоимости бурения S. В зоне IV происходит также объемное разрушение породы, но рост глубины внедрения инструмента и скорости бурения замедляется из-за увеличения поверхности контакта бурового инструмента с породой. В пределе величины h и $V_{\text{б}}$ ограничиваются геометрическими размерами зубьев или лезвий (посадка на задние грани резцов и рассечку) и ухудшением условий эвакуации разрушенной породы из забоя скважины.

На масштаб различных видов разрушения породы влияют в основном контактная прочность породы, прочность бурового инструмента и время контакта $t_{\text{к}}$ породоразрушающей части долота с забоем, определяемая угловой скоростью долота. В зависимости от сочетания этих факторов в наблюдаемой области бурения отдельные зоны (I, II, III, IV) могут вырождаться или, наоборот, преобладать. На рис. 2 показаны участки кривых $V_{\text{б}}(P_{\text{ос}})$, встречающиеся в промышленном бурении в рамках технических возможностей буровых станков и инструментов. В слабых породах ($f < 1$–2) при остром буровом инструменте зоны I и II пренебрежимо малы (кривая 1), преобладает объемное разрушение, и в зоне наблюдений процесс описывается прямой линией. В очень крепких породах ($f = 16$–20) функция $V_{\text{б}}(P_{\text{ос}})$ в зоне наблюдений также линейна, но процесс разрушения имеет поверхностный характер (кривая 4), так как прочность инструмента не позволяет создать критические напряжения в породе. В крепких породах ($f = 10$–12) может происходить в основном усталостное разрушение (кривая 3). В породах средней крепости ($f = 5$–8) наблюдаются все виды разрушения породы (кривая 2).

При прочих равных условиях на эффективность процесса разрушения породы существенное влияние оказывает скорость приложения нагрузки, зависящая от числа оборотов долота и времени контак-

та $t_к$ зубьев и резцов в месте приложения нагрузки. Влиянием фактора $t_к$ объясняется снижение темпа роста скорости бурения с увеличением частоты вращения долота (рис. 3).

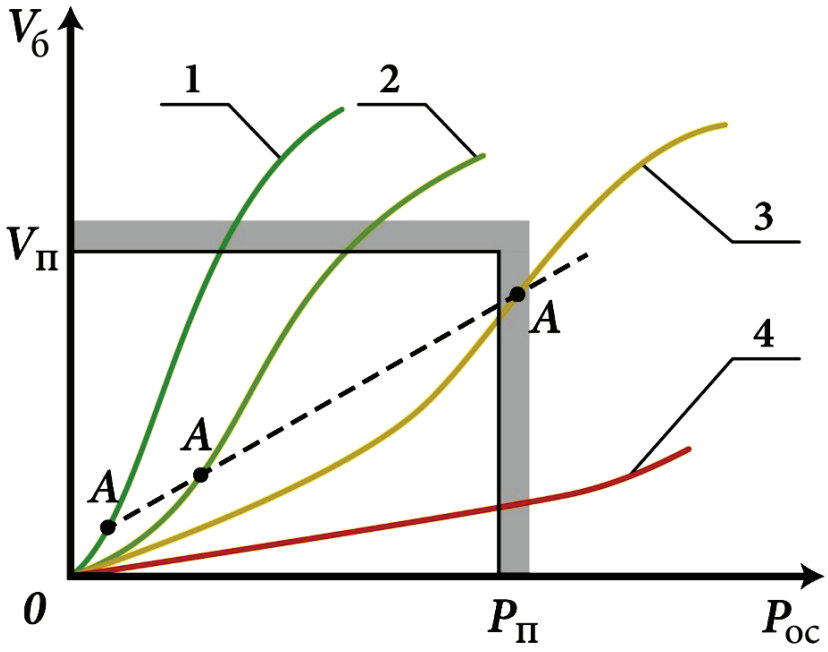


Рис. 2. Вид функции $V_б(P_{ос})$ в зависимости от коэффициента крепости породы и технических возможностей буровых станков и инструментов: 1 – слабые горные породы (f< 1–2); 2 – породы средней крепости (f = 6–8); 3 – крепкие горные породы (f = 10–12); 4 – очень крепкие породы (f = 16–20); $P_п$, $V_п$ – соответственно, предельные осевые нагрузки и скорости подачи буровых станков; A – условные начальные границы объемного разрушения породы

В обобщенном виде *условия рациональных силовых режимов* механического бурения можно выразить формулой

$$P_{ос} + P_{дин} > FP_к \text{ при } t_к \approx 7\text{–}15 \text{ мс}, \qquad (1)$$

где F – площадь контакта долота с породой в горизонтальной проекции; $P_к$ – контактная прочность породы; $(P_{ос} + P_{дин})/F$ – удельное контактное давление на забой.

В работе [2] предложен метод количественной оценки границ различных видов разрушения горных пород при бурении на основе анализа силовой функции $h_p(P_{ос})$ и силового градиента, выражаемого соотношением

$$I_v = \frac{h}{P_{\text{ос}}} = \frac{V_{\text{б}}}{P_{\text{ос}} \cdot \omega}, \qquad (2)$$

где h – глубина разрушения породы за один оборот долота.

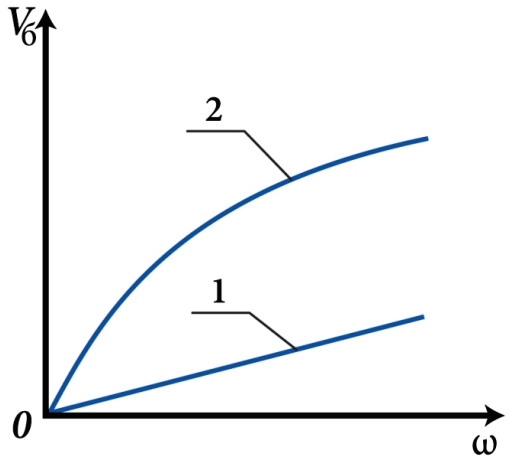


Рис. 3. Общий вид зависимости скорости бурения $V_{\text{б}}$ от частоты вращения долота ω в крепких породах: 1 – бурение с осевой нагрузкой, недостаточной для объемного разрушения; 2 – бурение с высокой осевой нагрузкой

Параметр I_v является важной информативной характеристикой процесса бурения, определяющей эффективность приложения нагрузки на долото, и имеет энергетический смысл, так как произведение $P_{\text{ос}} \cdot \omega$ пропорционально энергии, передава-емой долотом на забой скважины в единицу времени. Установлено, что координаты границ усталостного и объемного видов разрушения породы (см. рис. 1, точки А и Б) определяются условиями максимума производных силовой функции ($dh/dP_{\text{ос}}$) и силового градиента ($dI_v/dP_{\text{ос}}$) глубины разрушения породы.

Найденные закономерности позволяют найти выражение функции $l_{\text{д}}(P_{\text{ос}})$, которая носит сложный характер. В условиях поверхностного и усталостного видов разрушения породы величина $l_{\text{д}}$ с ростом $P_{\text{ос}}$ может уменьшаться, слабо возрастать или не изменяться. При объемном характере разрушения величина $l_{\text{д}}$ с ростом $P_{\text{ос}}$ интенсивно увеличивается, так как путь трения резца при большой стружке уменьшается. Однако и в этом случае существует критическая нагрузка, при превышении которой $l_{\text{д}}$ начинает уменьшаться (см. рис. 1, зона IV), так как вследствие отмеченных ранее ограничений удельная энергоемкость процесса бурения интенсивно возрастает и значительная часть энергии тратится на износ долота. Таким образом, зависимость $l_{\text{д}}(P_{\text{ос}})$ имеет максимум, который соответствует максимуму кривизны функции $V_{\text{б}}(P_{\text{ос}})$ и не зависит от конструкции долота, а определяется его типом.

Выражение функции $l_{\text{д}}(P_{\text{ос}})$ можно получить, опираясь на интегральные оценки работоспособности долота и закономерности изменения параметра I (см. рис. 1).

Потенциальный ресурс (запас работоспособности), качество долота целесообразно оценивать интегральным показателем работоспособности Ψ, инвариантным к режимным параметрам:

$$\Psi = f\left(d_{\text{д}}, D_{\text{к}}, f\right). \tag{3}$$

В функции (3) приняты во внимание основные факторы, обуславливающие запас работоспособности долота: $d_{\text{д}}$ – диаметр, размеры долота; $D_{\text{к}}$ – конструктивные и технические характеристики инструмента (прочность породоразрушающей части, качество твердого сплава, расположение продувочных каналов и т. д.); f – крепость (или $P_{\text{к}}$ – контактная прочность породы).

В работе [2] показано, что стойкость долота изменяется пропорционально величине $h/P_{\text{ос}}$ и имеет экстремум при той же осевой нагрузке $P_{\text{ос}}$, что и максимум параметра I_v. Нагрузка $P_{\text{ос}}$ соответствует верхней границе эффективного объемного разрушения породы. Следовательно, можно записать

$$l_{\text{д}} = \Psi \cdot I_v. \tag{4}$$

При этом изменение средних значений Ψ в зависимости от коэффициента крепости породы f (или контактной прочности) для многих условий приближенно оценивается гиперболой

$$\Psi = \frac{\theta}{P_{\text{к}}}, \tag{5}$$

где θ – коэффициент, характеризующий зависимость показателя Ψ от f (или $P_{\text{к}}$).

На основании выражений (2), (4) и (5) имеем

$$l_{\text{д}} = \frac{\theta \cdot V_{\text{б}}}{f \cdot \omega \cdot P_{\text{ос}}}. \tag{6}$$

Применительно к долотам режущего типа модели ДР выявлена приближенная зависимость [13]:

$$V_{\text{б}} = \frac{K_1 \cdot \omega}{1 + \left(\frac{K_2 \cdot f}{P_{\text{ос}}} \right)^2}, \tag{7}$$

где $V_{\text{б}}$ – скорость бурения, м/ч; ω – скорость вращения долота, об/мин; f – коэффициент крепости горной породы; $P_{\text{ос}}$ – осевая нагрузка на долото, кН; K_1 и K_2 – коэффициенты, зависящие от типа долота и его диаметра (для долота ДР-214В $K_1 = 0{,}9$ и $K_2 = 12$; для ДР-160Ш $K_1 = 1{,}2$ и $K_2 = 6$).

Подставляя выражение (7) в формулу (6), получим

$$l_{\text{д}} = \frac{K_1 \cdot \theta \cdot P_{\text{ос}}}{f \cdot P_{\text{ос}}^2 + f^3 \cdot K_2^2} \cdot \tag{8}$$

Наиболее целесообразным критерием оптимальности режимов бурения является *себестоимость бурения*, которая учитывает как техническую, так и экономическую стороны оптимизируемого процесса и в общем виде может быть выражена формулой

$$S = \frac{A}{\text{П}_{\text{с}}} + \frac{C_{\text{д}}}{l_{\text{д}}} = A / \left[\frac{T \cdot \eta}{\frac{60}{V_{\text{б}}} + t_{\text{в}}} \right] + \frac{C_{\text{д}}}{l_{\text{д}}}, \tag{9}$$

где A – затраты на работу станка в единицу времени (машино-смена, машино-час) без затрат на буровой инструмент, руб.; $\text{П}_{\text{с}}$ – сменная производительность станка, м/смену; $C_{\text{д}}$ – стоимость долота, руб.; $l_{\text{д}}$ – стойкость долота, м; T – время смены, мин; η – коэффициент эффективности использования станка в течение смены (обычно η = 0,70–0,85); $V_{\text{б}}$ – скорость бурения, м/ч; $t_{\text{в}}$ – затраты времени на вспомогательные машинные операции, мин/м.

В формулу (9) вводят выражения (7) и (8), т. е. основные функции $V_{\text{б}}\left(P_{\text{ос}}, \omega, f\right)$ и $l_{\text{д}}\left(P_{\text{ос}}, \omega, f\right)$ для применяемой конструкции долота с условием обеспечения совершенной очистки забоя сжатым воздухом. Затем целевую функцию дифференцируют, получая уравнения $dS/dP_{\text{ос}} = 0$ и $dS/d\omega = 0$, из которых находят оптимальные величины нагрузки $P_{\text{ос}}$ и скорость вращения долота ω.