

УДК 622.24.08

АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМОЙ АЛМАЗНОГО БУРЕНИЯ

Нескоромных Вячеслав Васильевич¹,
sovair@bk.ru

Попова Марина Сергеевна¹,
zotovz2@bk.ru

Зотов Захар Геннадьевич¹,
alleniram83@mail.ru

Лиу Баочанг²,
liubc@jlu.edu.cn

¹ Сибирский федеральный университет,
Россия, 660025, г. Красноярск, пр. им. газеты «Красноярский рабочий», 95.

² Университет Цзилинь,
Китай, 130061, г. Чанчунь, ул. Химинжу, 938.

Актуальность. Из всех известных способов проходки скважин алмазное бурение отличается высокой частотой вращения инструмента на больших глубинах. Такие условия разрушения горной породы требуют особого контроля параметров процесса бурения и их корректировки в случае нарушения баланса системы реализуемых сил. Все параметры процесса бурения в определенной степени взаимосвязаны. Для достижения наибольшей эффективности работы алмазного породоразрушающего инструмента требуется оптимальный механизм его эксплуатации. Анализ ситуации и подбор нужных показателей режима бурения алмазным инструментом довольно трудоемкая работа, которую в производственных условиях необходимо осуществлять непрерывно онлайн, поэтому актуальной является задача разработки автоматизированной системы управления процессом алмазного бурения с целью рациональной организации использования дорогостоящего алмазного инструмента. Автоматизация управления бурением осуществима путем применения современных технологий компьютерного программирования, алгоритм которого должен учитывать все требования оптимизации взаимозависимых параметров процесса бурения.

Целью исследования является разработка алгоритма управления системой алмазного бурения для дальнейшего внедрения его в программное обеспечение.

Объекты: процесс алмазного бурения скважин, технико-экономические показатели бурения и параметры, оказывающие влияние на результаты бурения.

Методы: аналитический метод, метод полного факторного эксперимента, метод моделирования.

Результаты. Основными параметрами, влияющими на итоги проводимых буровых работ, являются механическая скорость бурения, ресурс инструмента и мощность, затрачиваемая на разрушение горной породы. Использование в качестве критерия оптимальности величины углубления за оборот позволяет обеспечить приемлемую скорость бурения и низкие затраты мощности при сохранении высокого ресурса инструмента. Процесс управления алмазным бурением заключается в анализе изменения в конкретный момент времени механической скорости бурения и мощности, на основании которого принимается решение о корректировке величины частоты вращения и осевой нагрузки. Разработан алгоритм управления системой алмазного бурения, который может быть реализован доступным языком программирования.

Ключевые слова:

Бурение, управление, оптимизация, углубление за оборот, механическая скорость бурения, критерий оптимальности, алгоритм, режим бурения.

Введение

На сегодняшний день вращательное бурение различным алмазным буровым инструментом является наиболее перспективным и востребованным. При этом алмазное бурение отличается применением дорогостоящего инструмента, характеризующегося определенной сложностью механизма разрушения горной породы и углубления скважины [1–18]. Технология алмазного бурения предполагает высокочастотное вращение инструмента как на малых, так и на средних, и на больших глубинах [19–23]. Для получения хороших технико-экономических показателей необходимо осуществлять непрерывный контроль параметров процесса бурения с целью их корректировки и достижения оптимальных условий работ.

Наилучших результатов можно добиться лишь в том случае, если полностью реализован ресурс алмазного инструмента при высокой скорости бурения и низких затратах мощности на ее реализацию.

Метод комплексного анализа критериев

Перечисленные цели осуществимы путем применения методики управления процессом бурения на основе комплексного анализа критериев, базирующегося на методе полного факторного эксперимента [1, 6, 10]. В ранее проведенных научных исследованиях [1, 2, 10] данная методология демонстрирует возможности регулирования режимов бурения в наиболее благоприятной области их пределов. Такой подход возможен при наличии современных интерак-

тивных технологий, позволяющих фиксировать в режиме реального времени значения параметров бурения, а именно: частоты вращения (ω), осевой нагрузки (P), механической скорости бурения (v_m) и мощности (N). Собственно управление осуществляется на основе анализа эмпирических моделей зависимостей получаемых данных [1, 10]. Применение метода позволяет обеспечить рациональную обработку породоразрушающего инструмента при наилучших технико-экономических показателях путем регулирования технологии процесса бурения [1, 2, 10].

Рассмотрим особенности технологии бурения алмазным породоразрушающим инструментом (графические отображены на рис. 1). После приработки алмазной коронки на пониженных показателях частоты вращения и осевой нагрузки ($P \downarrow \omega \downarrow$) устанавливается режим постоянной механической скорости бурения (v_m) (линия 1–2, рис. 1). Критерием для определения оптимальной механической скорости бурения выступает показатель RPI , предоставляемый производителем породоразрушающего инструмента, или значение углубления скважины за один оборот ($h_{об}$), являющееся величиной обратной RPI :

$$RPI = \frac{1}{h_{об}}. \quad (1)$$

Как правило, показатель RPI фиксируется для конкретного типа бурового инструмента в виде рекомендуемого интервала значений, поэтому и оптимальное значение величины углубления за оборот может колебаться в определенных пределах (от h_{max} до h_{min}).

Учитывая, что механическая скорость бурения является произведением углубления ($h_{об}$) на частоту вращения (ω):

$$v_m = h_{об} \cdot \omega, \quad (2)$$

имея интервал оптимальных значений $h_{об} = h_{max} \dots h_{min}$, для достижения наилучшего результата величина постоянной механической скорости бурения (v_m) определяется по наибольшему из предложенных значений углубления за оборот – h_{max} . Для достижения заданных технологических условий подбираются такие показатели режимов бурения (P , ω), при которых обеспечена реализация принятой величины h_{max} .

Осевая нагрузка должна быть достаточной для внедрения реза в породу, но не превышать предел прочности породоразрушающего инструмента. В случае чрезмерного увеличения частоты вращения (ω) при неизменной осевой нагрузке (P) сопротивление породы внедрению инструмента начнет расти [9, 18], вследствие чего глубина внедрения реза в породу снизится, что отразится на значениях углубления за оборот и механической скорости бурения [2, 8, 16, 18]. Если увеличить осевую нагрузку ($P \uparrow$), не изменяя значения частоты вращения, значительно повысится мощность, затрачиваемая на разрушение горной породы ($N \uparrow$), при этом, учитывая особенности механизма разрушения горной породы алмазным резцом [2, 18], механическая скорость бурения не возрастет. Показатель мощности ограничен техническими возможностями оборудования и отражается на себесто-

имости буровых работ, любое повышение данного параметра нежелательно и влечет за собой ухудшение технико-экономических результатов. Поэтому в данной ситуации следует повысить осевую нагрузку ($P \uparrow$) и снизить частоту вращения ($\omega \downarrow$), что обеспечит более высокий уровень механической скорости бурения ($v_m \uparrow$) при незначительных изменениях мощности [2, 10]. По данной схеме на протяжении всего процесса бурения, в зависимости от изменения условий, осуществляется регулирование режимов бурения с целью непрерывного поддержания величины углубления за оборот в пределах выбранного значения h_{max} , т. е. $P\omega(f(h_{max}))$ (линия 1–2, рис. 1).

Однако такой механизм управления рационален при неизменном состоянии породоразрушающего инструмента. Со временем инструмент изнашивается и предложенный способ регулирования режимов бурения не приносит требуемых результатов, механическая скорость начинает неизменно падать ($v_m \downarrow$) (линия 2–2', рис. 1). При достижении механической скорости бурения значения, равного рейсовой скорости (v_p) [10], алмазную коронку необходимо изымать, ресурс ее считается исчерпанным. В этом случае размер проходки коронки составит L_1 (рис. 1). Ситуацию можно изменить, уменьшив величину критерия оптимизации – углубления за оборот, так, чтобы ее значение не выходило за пределы рекомендуемого производителем инструмента интервала – $h_{об} = h_2$, если $h_{max} < h_2 < h_{min}$. Таким образом, задав значение углубления за оборот, равное h_2 (в точке 2, рис. 1), можно остановить снижение скорости бурения, подобрав соответствующие заданным условиям режимы бурения (ω , P). Далее (по линии 2–3, рис. 1), придерживаясь вышеописанного механизма управления процессом, бурение осуществляется до тех пор, пока способность реализации заданного углубления не будет исчерпана, что произойдет с повышением уровня износа инструмента (точка 3, рис. 1). Механическая скорость снова приобретет тенденцию к снижению (линия 3–3', рис. 1). Предотвратить в данном случае падение скорости бурения будет возможно уменьшением в очередной раз величины критерия углубления, к примеру, до h_{min} . Таким образом, по мере износа инструмента, снижая значение критерия оптимизации ($h_{об}$), осуществимо увеличение его ресурса (проходка увеличится до L_3 , рис. 1).

Итак, для качественного управления системой алмазного бурения необходимо выделить критерий оптимизации, который должен быть задан в виде интервала оптимальных значений и иметь возможность изменяться в процессе бурения. Принимая в качестве такого параметра величину углубления за оборот, осуществимо управление механической скоростью бурения с учетом ресурса породоразрушающего инструмента.

Помимо этого, для обеспечения рациональности проведения работ необходимой процедурой также является регистрация и манипулирование величиной мощности, затрачиваемой на разрушение горных пород. Таким образом реализуется управление алмазным бурением на основе комплексной оценки оптимальности протекающих процессов.

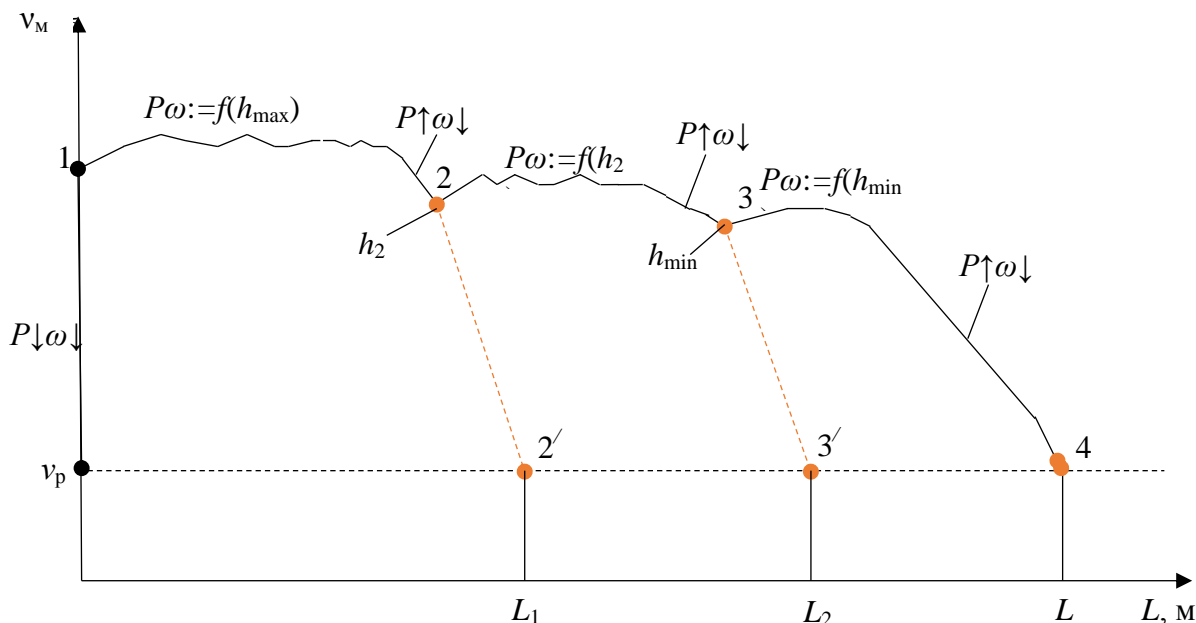


Рис. 1. Графическая интерпретация технологии процесса алмазного бурения
Fig. 1. Graphic interpretation of diamond drilling technology

Оптимальным считается бурение, энергоёмкость (W) которого стремится к минимуму. Учитывая, что данная величина определяется как отношение мощности к механической скорости бурения:

$$W = \frac{N}{v_m}, \quad (3)$$

для понижения энергоёмкости процесса необходимо обеспечение максимальной скорости бурения при минимальных затратах мощности [10].

Алгоритм управления системой алмазного бурения

Реализация предложенной методики целесообразна путем применения технологий компьютерного программирования, в алгоритм которого должны быть заложены описанные циклы управления.

Схематично регулирование алмазным бурением можно представить в виде рис. 2. Вводными являются параметры, фиксируемые датчиками, расположенными на забое скважины. Показатели частоты вращения (ω) и осевой нагрузки (P) в виде импульса передаются на поверхность, где воспринимаются персональным компьютером (ПК) и преобразуются в соответствующие числовые значения. Для описания условий, ограничивающих ресурс инструмента, вводится интервал изменения оптимальных значений углубления за оборот ($h_{об}$) и фиксированное значение рейсовой скорости (v_p). Непрерывно получая информацию о характере режима бурения на забое, программа проводит анализ возможных изменений механической скорости бурения (v_m) и мощности (N), затрачиваемой на разрушение забоя. Имея конкретные значения частоты вращения и осевой нагрузки, путем математических вычислений в каждый момент времени определяется значение механической скорости (по формуле (2)) и мощности (по формуле: $N = P\omega R\mu/97,5$, где

R – радиус торца бурового инструмента и μ – коэффициент сопротивления породы вращению бурового инструмента, заранее заданы как константы процесса). Полученные результаты сравниваются с аналогично определенными в предыдущий период времени. Если показатель механической скорости бурения в данный момент времени (v_i) больше, чем в предыдущий период (v_{i-1}), следовательно, механическая скорость растет ($v_i > v_{i-1} \rightarrow v_m \uparrow$). Если значение мощности в данный момент времени (N_i) меньше, чем в предыдущий (N_{i-1}), делается вывод о том, что затраты мощности снижаются ($N_i < N_{i-1} \rightarrow N \downarrow$), и так далее.

В момент, когда оказывается, что механическая скорость падает ($v_m \downarrow$), а мощность растет ($N \uparrow$), отдается команда о снижении частоты вращения ($\omega \downarrow$) и повышении осевой нагрузки ($P \uparrow$). В период роста и механической скорости бурения ($v_m \uparrow$), и мощности ($N \uparrow$) отдается команда о снижении осевой нагрузки ($P \downarrow$) и повышении частоты вращения ($\omega \uparrow$). Если механическая скорость растет ($v_m \uparrow$), а мощность падает ($N \downarrow$) – о снижении осевой нагрузки ($P \downarrow$) и повышении частоты вращения ($\omega \uparrow$). В случае если многочисленные преобразования не привели к должному результату, программой отдается команда о снижении критерия оптимизации – значения углубления за оборот ($h_{об} \downarrow$), и цикл повторяется (рис. 2).

Перспективы автоматизации алгоритма управления системой алмазного бурения

Автоматизация предложенного алгоритма управления возможна путем использования различных языков программирования, даже такого доступного для пользователей ПК, как язык визуального программирования *TouchDesigner* компании *Derivative*. *TouchDesigner* прост в применении и не требует фун-

даментальных знаний, при этом обладает всеми необходимыми возможностями для интерактивного мультимедийного контента в реальном времени, обладает поддержкой различных устройств, совместим с дру-

гими программами, а главное – компатибелен с датчиками всевозможных типов, что важно при решении поставленной задачи.

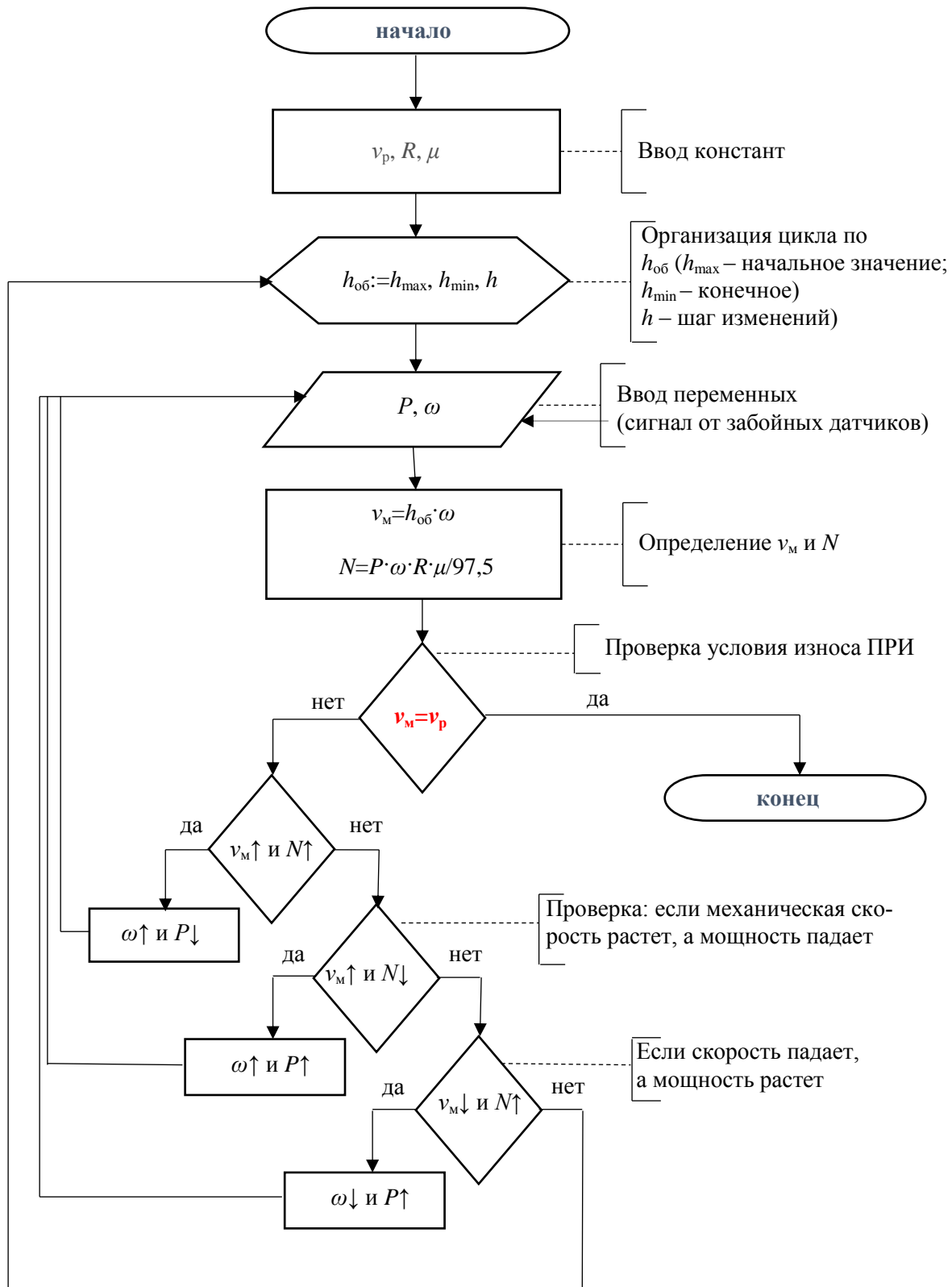


Рис. 2. Схема алгоритма управления алмазным бурением
 Fig. 2. Diagram of the diamond drilling control algorithm

TouchDesigner представлен в виде конструктора блоков с определенными функциями. Его функции разделены на категории: *COMP* – создание диалоговых окон, *TOP* – мультимедиа 2D, *CHOP* – математическая модель, *SOP* – геометрия, *MAT* – материал, *DAT* – база данных и текст. Каждая категория имеет свои возможности и их совокупности отлично дополняют друг друга для реализации проекта.

С целью проверки функциональности языка *TouchDesigner* на первом этапе было разработано программное обеспечение, позволяющее одним кликом преобразовывать полученные в режиме реального времени значения параметров режимов бурения в графическую интерпретацию эмпирических моделей механической скорости бурения, углубления за оборот и энергоёмкости, получаемых по методике [1] (рис. 3, 4).

Принимаемые в режиме реального времени режимные параметры фиксируются программой в модуле «Входные данные» (рис. 3, а). Так как на первом этапе научных исследований совмещение программного обеспечения с реальной системой бурения преждевременно и нерационально, благодаря возможностям языка *TouchDisigne* производится моделирование производственных ситуации. Изменение режимов бурения в заранее заданных пределах осуществляется путем плавного регулирования их значений в соответствующем окне интерфейса программы.

Опираясь на полученную информацию в сегменте «Коэффициенты» (рис. 3, б), производятся все необходимые расчеты, результаты которых выводятся в сегмент «Математическая модель» (рис. 3, в), где и составляются по методике [1] модели, отражающие зависимость механической скорости, мощности и энергоёмкости от режимов бурения.



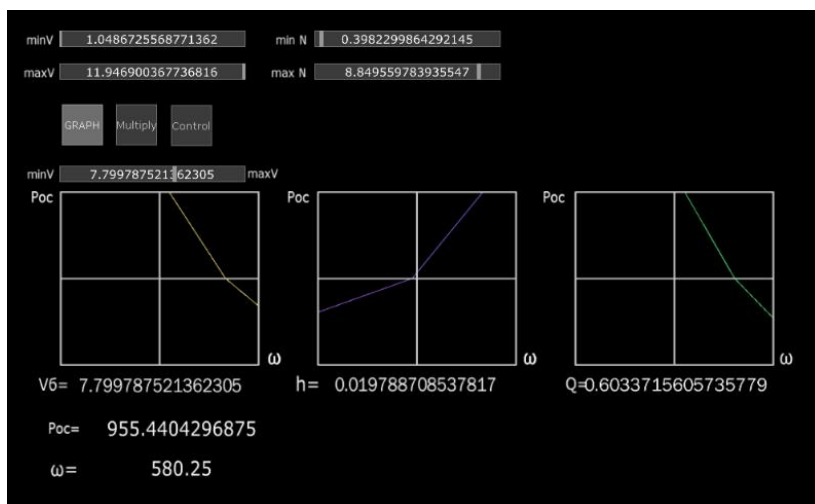
Рис. 3. Реализация методики управления бурением по методу [1] языком *TouchDesigner*: а) ввод данных в режиме реального времени; б) определение эмпирических коэффициентов моделей зависимостей параметров; в) расчет показателей

Fig. 3 Implementation of the drilling control methodology [1] using the *TouchDesigner* language: а) online data entry; б) determination of empirical coefficients of parameter dependence models; в) calculation of indicators

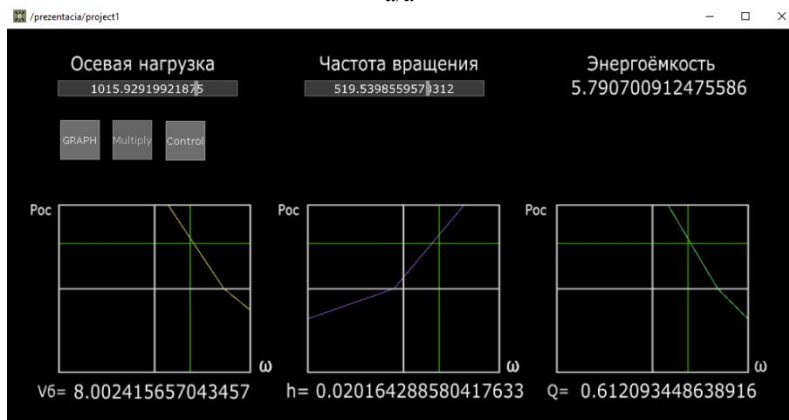
Полученные результаты программной обработки в виде координат точек выводятся в графическом сегменте. Для удобства и наглядности в программе введена функция «*GRAPH*» (рис. 4). При нажатии кнопки *GRAPH* активируется режим изменения значения механической скорости бурения (рис. 4, а). На первом этапе программирования с целью проверки адекватности работы программы и моделирования процесса бурения изменение значения механической скорости бурения реализуется вручную с помощью перемещения специального ползунка. Уменьшая или увеличивая значение механической скорости бурения, на экране

можно наблюдать как при этом изменяются графики, отражающие зависимость показателя углубления за оборот от режимов бурения (P и ω) (рис. 4, а).

Аналогичным образом посредством языка *TouchDesigner* была предпринята попытка решения обратной задачи, в результате чего имеется программный продукт, позволяющий изменением режимов бурения (вручную, перемещением ползунка) осуществлять управление показателем энергоёмкости (рис. 4, б), что позволяет определить наиболее рациональный режим бурения, обеспечивающий оптимальную для данных условий энергоёмкость процесса.



a/a



б/б

Рис. 4. Пример интерфейса программного обеспечения, реализуемого языком *TouchDesigner*: а) графическая интерпретация эмпирических моделей механической скорости бурения, углубления за оборот; б) управление энергоёмкостью процесса бурения

Fig. 4. Example of a software interface implemented by the *TouchDesigner* language: а) graphic interpretation of empirical models of ROP, deepening per revolution; б) energy management of drilling

Результаты исследования полученного экспериментального программного продукта указывают на возможность автоматизации управления системой алмазного бурения путем применения языка программирования, например, такого как *TouchDesigner*. А значит, управление на основе комплексного анализа критериев возможно и перспективно. *TouchDesigner* демонстрирует свою гибкость при оценке технологической ситуации, своевременно осуществляет сбор и обработку данных в режиме реального времени.

Особым преимуществом *TouchDesigner* является восприимчивость к сигналам, получаемым с разных датчиков. А самообучаемость программы в дальнейшем позволит ускорить обработку данных режима бурения и выдать правильное решение онлайн.

На основе проведенной научной работы определена перспектива разработки программного продукта на языке *TouchDesigner*, алгоритм которого должен быть основан на методике управления процессом бурения по принципу комплексного анализа критериев, бази-

рующегося на методе полного факторного эксперимента (подробнее с методикой можно ознакомиться в ранее выполненных работах [1, 2, 6, 10]).

Выводы

1. Интерактивное управление процессом алмазного бурения является актуальной производственной и научной задачей.
2. Качественное управление системой алмазного бурения возможно с учетом всех составляющих бурения: типа породоразрушающего инструмента, механизма разрушения им горных пород, режимов бурения и т. д.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нескоромных В.В., Попова М.С. Разработка методики управления процессом бурения на основе комплексного анализа критериев // Записки Горного Института. – 2019. – Т. 240. – С. 701–710.
2. Нескоромных В.В., Попова М.С., Баочанг Л. Разрушение горных пород при бурении скважин алмазным буровым инструментом: монография. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2020. – 268 с.
3. Принципы конструирования и эксплуатации алмазного породоразрушающего инструмента / А.А. Буканов, Л.К. Горшков, А.И. Осецкий, Н.В. Соловьев // Разведка и охрана недр. – 2013. – № 7. – С. 44–49.
4. Brook B. Principles of diamond tool technology for sawing rock // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2002. – V. 39 (1). – P. 41–58.
5. Tonon F., Amadei B. Effect of elastic anisotropy on tunnel wall displacements behind a tunnel face // Rock Mechanics and Rock Engineering. – 2002. – V. 35 (3). – P. 141–160.
6. Коротков А.В. Современный взгляд на основные задачи оптимизации алмазного бурения // Известия сибирского отделения РАН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. – 2011. – Т. 2 (39). – С. 205–209.
7. Detournay E., Richard T., Shepherd M. Drilling response of drag bits: theory and experiment // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2008. – V. 45 (8). – P. 1347–1360.
8. Basarir H., Karpuz C. Preliminary estimation of rock mass strength using diamond bit drilling operational parameters // International Journal of Mining, Reclamation and Environment. – 2016. – V. 30 (2). – P. 145–164.
9. Борисов К.И. Современные методы оценки сопротивления горных пород резанию-скалыванию при бурении долотами PDC: монография. – Томск: ТПУ, 2013. – 166 с.
10. Нескоромных В.В. Оптимизация в геологоразведочном производстве. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2013. – 246 с.
11. Инновационные подходы к конструированию высокоэффективного породоразрушающего инструмента / А.Я. Третьяк, В.В. Попов, А.Н. Гроссу, К.А. Борисов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2017. – № 8. – С. 225–230.
12. Su O., Ali Akcin. Numerical simulation of rock cutting using the discrete element method // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2011. – V. 48 (3). – P. 434–442.
13. Hasan A.R., Kabir C.S. Wellbore heat-transfer modeling and applications // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2012. – V. 96–97. – P. 109–119.

Информация об авторах

Нескоромных В.В., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии и техники разведки Института горного дела, геологии и геотехнологий Сибирского федерального университета.

Попова М.С., кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и техники разведки Института горного дела, геологии и геотехнологий Сибирского федерального университета.

Зотов З.Г., студент кафедры технологии и техники разведки Института горного дела, геологии и геотехнологий Сибирского федерального университета.

Лиу Баочанг, профессор геотехнологий кафедры разведки и бурения, Университет Цзилинь.

3. Перспективным является направление развития методики управления, основанной на комплексном анализе критериев бурения и базирующейся на методе полного факторного эксперимента.
4. Величина углубления за оборот, принятая по показателю *RPI*, в качестве критерия оптимизации буровых работ позволяет регулировать процесс с достижением наилучших результатов скоростей бурения при рациональном и долгосрочном использовании породоразрушающего инструмента.
5. Автоматизация управления системой алмазного бурения в оптимальных пределах всех взаимозависимых параметров возможна с применением современных технологий программирования.

14. A novel method for measuring and analyzing the interaction between drill bit and rock / X. Wang, Z. Wang, D. Wang, L. Chai // Measurement. – 2018. – V. 121. – P. 344–354.
15. Kanyanta V., Ozbayraktar S., Maweja K. Effect of manufacturing parameters on polycrystalline diamond compact cutting tool stress-state // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2014. – V. 45. – P. 147–152.
16. Che D., Zhu W.-L., Ehmman K.F. Chipping and crushing mechanisms in orthogonal rock cutting // International Journal of Mechanical Sciences. – 2016. – № 119. – P. 224–236.
17. Евсеев В.Д., Мавлютов М.Р. Пути повышения эффективности разрушения горных пород // Материалы региональной конференции геологов Сибири, Дальнего Востока и Северо-Востока России. – Томск, 2000. – Т. 1. – С. 463–465.
18. Нескоромных В.В., Попова М.С., Харитонов А.Ю. Влияние сил сопротивления на глубину резания-скалывания горной породы алмазным резцом // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 10. – С. 40–48.
19. Closed-form solution of stress state and stability analysis of wellbore in anisotropic permeable rocks / D.-P. Do, N.-H. Tran, H.-L. Dang, D. Hoxha // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. – 2019. – V. 113. – P. 11–23.
20. Optimization model for polycrystalline diamond compact bits based on reverse design / Z. Ai, Y. Han, Y. Kuang, Y. Wang, M. Zhang // Advances in Mechanical Engineering. – 2018. – V. 10 (6). – P. 476–479.
21. Numerical investigations on the effect of ultra-high cutting speed on the cutting heat and rock-breaking performance of a single cutter / M. Gao, K. Zhang, Q. Zhou, H. Zhou, B. Liu, G. Zheng // Journal of Petroleum Science and Engineering. – July 2020. – V. 190. – Article № 107120.
22. Integrated FEA modeling offers system approach to drillstring optimization / H. Aslaksen, M. Annand, R. Duncan, A. Fjaere, L. Paez, U. Tran // Society of Petroleum Engineers/SPE Drilling Conference. – Miami, Florida, USA, 2006. – P. 669–684. DOI: 10.2118/99018-MS
23. Huang H., Lecampion B., Detournay E. Discrete element modeling of tool-rock interaction I: Rock cutting // International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. – 2013. – № 37 (13). – P. 1913–1929.

Поступила: 11.10.2021 г.

UDC 622.24.08

ALGORITHM OF DIAMOND DRILLING SYSTEM CONTROL

Vyacheslav V. Neskoromnykh¹,
sovair@bk.ru

Marina S. Popova¹,
alleniram83@mail.ru

Zakhar G. Zotov¹,
zotovz2@bk.ru

Liu Baochang²,
liubc@jlu.edu.cn

¹ Siberian Federal University,
95, Krasnoyarskiy rabochniy avenue, Krasnoyarsk, 660095, Russia.

² Jilin University,
938, Ximinzhū street, Changchun, 130026, China.

The relevance. Diamond drilling is characterized by high rotational speed of the tool at great depths. Such conditions of rock destruction require special control of drilling parameters and their correction. All drilling parameters are interrelated. To achieve the most efficient operation of a diamond rock cutting tool, an optimal mechanism for its operation is required. Analysis of the situation and selection of the required parameters of the drilling mode with diamond tools is the laborious work. This must be done continuously online. The urgent task is the development of the automated control system for diamond drilling in order to rationalize the use of diamond tools. This is possible with the use of modern computer programming technologies. Software algorithm must take into account all the requirements for optimizing the interdependent drilling parameters.

The main aim of the research is to develop a control algorithm for a diamond drilling system for its further implementation into software.

Objects: diamond drilling, technical and economic indicators of drilling and parameters affecting the results of drilling.

Methods: analytical method, full factorial experiment method, modeling method.

Results. The main parameters affecting the results of drilling operations are ROP, tool life and power spent on rock destruction. The deepening per revolution as an optimality criterion makes it possible to ensure an acceptable drilling speed and low power consumption while maintaining a high resource of the tool. The control process for diamond drilling consists in analyzing the change at a specific point in time in ROP and power. After the analysis, a decision is made to correct the value of the speed and axial load. A control algorithm for the diamond drilling system was developed. The algorithm can be implemented in an accessible programming language.

Key words:

Drilling, control, optimization, deepening per revolution, ROP, optimality criterion, algorithm, drilling mode.

REFERENCES

1. Neskoromnykh V.V., Popova M.S. Development of a drilling process control technique based on a comprehensive analysis of the criteria. *Journal of Mining Institute*, 2019, vol. 240, pp. 701–710. In Rus. DOI: 10.31897/pmi.2019.6.701.
2. Neskoromnykh V.V., Popova M.S., Liu Baochang. *Razrusheniye gornyykh porod pri burenii skvazhin almaznym burovym instrumentom. Monografiya* [Destruction of rocks when drilling wells with diamond drilling tools: monograph]. Krasnoyarsk, Siberian Federal University Publ., 2020. 268 p.
3. Bukanov A.A., Gorshkov L.K., Osetskii A.I., Soloviev N.V. Printsipy konstruirovaniya i ekspluatatsii almaznogo porodorazrushayushchego instrumenta [Principles for the design and operation of diamond rock cutting tools]. *Razvedka i okhrana nedr*, 2013, no. 7, pp. 44–49.
4. Brook B. Principles of diamond tool technology for sawing rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2002, vol. 39 (1), pp. 41–58.
5. Tonon F., Amadei B. Effect of elastic anisotropy on tunnel wall displacements behind a tunnel face. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2002, vol. 35, no. 3, pp. 141–160.
6. Korotkov A.V. Sovremennyy vzglyad na osnovnyye zadachi optimizatsii almaznogo bureniya [A modern look at the main tasks of optimization of diamond drilling]. *Izvestiya Sibirskogo otdeleniya RAEN. Geologiya, poiski i razvedka rudnykh mestorozhdeniy*, 2011, no. 2 (39), pp. 205–209.
7. Detournay E., Richard T., Shepherd M. Drilling response of drag bits: theory and experiment. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2008, vol. 45 (8), pp. 1347–1360.
8. Basarir H., Karpuz C. Preliminary estimation of rock mass strength using diamond bit drilling operational parameters. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 2016, vol. 30 (2), pp. 145–164.
9. Borisov K.I. *Sovremennyye metody otsenki soprotivleniya gornyykh porod rezaniyu–skalyvaniyu pri burenii dolotami PDC. Monografiya* [Modern methods for assessing the resistance of rocks to cutting–chipping when drilling with PDC bits. Monograph]. Tomsk, TPU Publ. house, 2013. 166 p.
10. Neskoromnykh V.V. *Optimizatsiya v geologorazvedochnom proizvodstve* [Optimization in geological survey production]. Moscow, INFRA-M Publ.; Krasnoyarsk, SFU Publ., 2013. 246 p.
11. Tretyak A.Ya., Popov V.V., Grossu A.N., Borisov K.A. Innovative approaches to the design of highly efficient rock cutting tools. *Gornyye informatsionno-analiticheskiy byulleten*, 2017, no. 8, pp. 225–230. In Rus.
12. Su O., Ali Akcin. Numerical simulation of rock cutting using the discrete element method. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2011, vol. 48 (3), pp. 434–442.
13. Hasan A.R., Kabir C.S. Wellbore heat-transfer modeling and applications. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2012, vol. 96–97, pp. 109–119.
14. Wang X., Wang Z., Wang D., Chai L. A novel method for measuring and analyzing the interaction between drill bit and rock. *Measurement*, 2018, vol. 121, pp. 344–354.

15. Kanyanta V., Ozbayraktar S., Maweja K. Effect of manufacturing parameters on polycrystalline diamond compact cutting tool stress-state. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2014, vol. 45, pp. 147–152.
16. Che D., Zhu W.-L., Ehmann K.F. Chipping and crushing mechanisms in orthogonal rock cutting. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2016, no. 119, pp. 224–236.
17. Evseev V.D., Mavlyutov M.R. Puti povysheniya effektivnosti razrusheniya gornykh porod [Ways to increase the efficiency of rock destruction]. *Materialy regionalnoy konferentsii geologov Sibiri, Dalnego Vostoka i Severo-Vostoka Rossii* [Proceedings of the regional conference of geologists of Siberia, the Far East and the North-East of Russia]. Tomsk 2000. Vol. I, pp. 463–465.
18. Neskoromnykh V.V., Popova M.S., Kharitonov A.Yu. Influence of resistance forces on the depth of rock cutting–chipping by a diamond cutter. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 10, pp. 40–48. In Rus.
19. Do D.-P., Tran N.-H., Dang H.-L., Hoxha D. Closed-form solution of stress state and stability analysis of wellbore in anisotropic permeable rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, vol. 113, pp. 11–23.
20. Ai Z., Han Y., Kuang Y., Wang Y., Zhang M. Optimization model for polycrystalline diamond compact bits based on reverse design. *Advances in Mechanical Engineering*, 2018, vol. 10 (6), pp. 476–479.
21. Gao M., Zhang K., Zhou Q., Zhou H., Liu B., Zheng G. Numerical investigations on the effect of ultra-high cutting speed on the cutting heat and rock-breaking performance of a single cutter. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, July 2020, vol. 190, article no. 107120.
22. Aslaksen H., Annand M., Duncan R., Fjaere A., Paez L., Tran U. Integrated FEA modeling offers system approach to drillstring optimization. *Society of Petroleum Engineers/SPE Drilling Conference*. Miami, Florida, USA, 2006. pp. 669–684. DOI: 10.2118/99018-MS
23. Huang H., Lecampion B., Detournay E. Discrete element modeling of tool-rock interaction I: Rock cutting. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2013, no. 37 (13), pp. 1913–1929.

Received: 11 October 2021.

Information about the authors

Vyacheslav V. Neskoromnykh, Dr. Sc., professor, head of the department of technology and equipment of investigation, Siberian Federal University.

Marina S. Popova, Cand. Sc., associate professor, Siberian Federal University.

Zakhar G. Zotov, student, Siberian Federal University.

Liu Baochang, professor, Jilin University.