

УДК 622.24.08

СОВРЕМЕННЫЕ ОСНОВЫ АВТОМАТИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ АЛМАЗНОГО БУРЕНИЯ

Попова Марина Сергеевна¹,
alleniram83@mail.ru

Нескоромных Вячеслав Васильевич¹,
sovair@bk.ru

Зотов Захар Геннадьевич¹,
zotovz2@bk.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. Алмазное бурение является одним из перспективных и универсальных способов проходки скважин, при котором возможно достижение высоких скоростей бурения на больших глубинах проведения работ. При этом дорогостоящий алмазный инструмент нуждается в сохранении эффективного ресурса. Разработанный способ управления алмазным бурением на основе комплексного анализа критериев с применением метода полного факторного эксперимента эффективен в случае его реализации в режиме реального времени. Таким образом, актуальной является проблема разработки системы автоматизированного управления режимом алмазного бурения, позволяющего сохранять ресурс инструмента при обеспечении высоких показателей механической скорости бурения и минимальных затратах мощности. Такой подход позволит повысить технико-экономические результаты алмазного бурения.

Цель: разработка надежной интерактивной системы наземных датчиков и вычислительного комплекса, позволяющей реализовать автоматизированное управление алмазным бурением на основе комплексного анализа критериев, в полной мере характеризующих сложный процесс бурения, и функционирующей в режиме реального времени.

Объекты: процесс алмазного бурения, интерактивные системы, устройства и датчики последнего поколения.

Методы: аналитического исследования, компьютерного моделирования, полного факторного эксперимента.

Результаты. Представлена система датчиков и вычислительного блока, состоящего из компьютеров и программного обеспечения, способная к детальному сбору и обработке информации, позволяющей дать полную оценку работы инструмента на забое. Описана схема взаимодействия устройств автоматизации процесса алмазного бурения. Приведено подробное описание работы программного обеспечения от сигнала датчиков до вывода результатов на экран табло. Дана характеристика результата применения автоматизированной системы управления процессом алмазного бурения.

Ключевые слова:

бурение, управление, оптимизация, алгоритм, режим бурения, автоматизация, программное обеспечение.

Введение

Проведение буровых работ в современных горно-геологических и экономических условиях требует кардинально новых подходов к контролю и управлению технологией процесса бурения [1–23].

Алмазное бурение как перспективный и универсальный способ проходки скважин отличается применением дорогостоящего инструмента, эффективный ресурс которого напрямую влияет на результаты технико-экономических показателей буровых работ [10]. При этом применение алмазного вида инструмента позволяет достигать высоких скоростей проходки. Отсюда следует, что для достижения наилучших результатов применения такого способа бурения необходимо обеспечение баланса между износом инструмента и реализацией высоких темпов процесса бурения.

Разработанный метод управления алмазным бурением на основе комплексного анализа критериев про-

ходки скважин позволяет, опираясь на анализ горно-геологических условий и ресурса инструмента, подбирать оптимальный режим его работы, способствующий щадящему износу инструмента при максимально допустимой механической скорости бурения и минимальных затратах мощности [1, 10, 12].

Реализация описанного управления возможна путем применения метода полного факторного эксперимента, позволяющего, при наличии данных о характере взаимодействия режущей поверхности бурового инструмента с забоем скважины, строить математические модели, отражающие влияние параметров режима бурения (частоты вращения, осевой нагрузки и подачи промывочной жидкости) на показатели механической скорости бурения, углубления за оборот и энергоемкости бурового процесса [1, 10, 12]. Интегративный анализ получаемых таким образом зависимостей позволяет определять производительность бурового инструмента, энергопотребление, эффек-

тивность разрушения горной породы, делать вывод о состоянии инструмента (изношен/не изношен) и эффективности его эксплуатации, не прерывая процесс бурения. Новизной представленного метода управления является возможность анализа работы бурового инструмента на основе системы трех критериев процесса бурения, что способствует соблюдению точности получаемых результатов, направленных на повышение ресурса инструмента и качества проводимых работ.

Основы метода управления

Итак, оптимальным считается режим эксплуатации бурового инструмента, при котором в случае допустимой реализации его ресурса достигаются максимальные скорости бурения и минимальные затраты мощности. На первых этапах исследования определено, что при прочих равных технико-технологических условиях на разных стадиях процесса бурения по мере износа инструмента и смены геологического разреза наблюдаются изменения характера разрушения горной породы на забое, что требует своевременного регулирования параметров режима бурения для осуществления эффективной работы инструмента. Причем чем быстрее будет реакция (отклик) на буровую ситуацию, тем надежнее достижение наилучших результатов. Частота таких изменений различна и зависит от типа, конструкции бурового инструмента, оборудования, области их применения и других производственных факторов. Поэтому для управления алмазным бурением с целью достижения оптимального режима работы бурового инструмента необходим автоматизированный подход с применением современных информационных компьютерных технологий. А рациональным управление алмазным бурением будет в том случае, когда предложенный метод управления будет реализован в режиме реального времени (онлайн).

Предполагается, что такая интерактивная система состоит из вычислительной машины – компьютера управления и связанных с ним датчиков, и заключается в следующем. Компьютер непрерывно получает сигнал о состоянии системы взаимодействия бурового инструмента с забоем, преобразовывает и обрабатывает полученную информацию, далее выдает результат в виде отклика, отражающего необходимые для данного момента бурения значения показателей режима бурения, реализация которых гарантирует максимально возможную механическую скорость бурения и минимальные затраты мощности при умеренном сохранении ресурса инструмента.

Для разработки программного обеспечения такой вычислительной машины в качестве базиса принят алгоритм, в основу которого заложен расчет и анализ параметров механической скорости бурения и мощности в зависимости от изменения частоты вращения, осевой нагрузки и углубления за оборот. Разработанный алгоритм позволяет в зависимости от сложившейся ситуации осуществлять регулирование показателей режима бурения до достижения оптимального состояния работы инструмента и поддерживать его в

допустимых пределах [1, 2]. Исходными данными при этом выступают показатели частоты вращения, осевой нагрузки, подачи промывочной жидкости, углубления за оборот, которые непрерывно и быстро должны обрабатываться компьютером.

Таким образом, для технической реализации предложенного управления необходима разработка системы датчиков и схемы их взаимодействия в условиях возможностей бурового оборудования, а также программного обеспечения, позволяющего преобразовывать электронный сигнал от датчиков в параметры управления и интерактивно реализовывать предложенный алгоритм обработки данных.

Схема оборудования автоматизированной системы управления

Существующие телеметрические системы облегчают подобный сбор и обработку данных. Однако серийно выпускаемые забойные датчики прямого измерения зачастую весьма габаритны. Они без проблем могут быть применены лишь в случае бурения скважин большого диаметра, например, эксплуатационного назначения. При бурении скважин малого диаметра, особенно на больших глубинах, геометрические параметры скважины и оборудования, находящегося в ней в процессе бурения, не позволяют располагать какие-либо приборы или дополнительные устройства в призабойной зоне. Описанная ситуация характерна, например, для геологоразведочного бурения, в процессе которого применение алмазного инструмента характеризуется минимальными зазорами, загромаждение которых недопустимо спецификой протекающих в скважине процессов и чревато нарушением технологии бурения.

При этом для исполнения предложенного метода управления передача информации (от источника к пульту управления) в такой системе должна иметь соответствующее направление и представлять собой схему, показанную на рис. 1.

Основываясь на выделенных особенностях описанной проблемы, для реализации предложенного метода управления разработана схема расположения наземного оборудования (на примере современной гидравлической буровой установки DBC S21, способной бурить на глубине 2200 м с частотой вращения более 1500 мин⁻¹) и сеть взаимодействия датчиков с компьютером управления (рис. 2, 3).

Согласно предложенной схеме (рис. 2) ротор установки оборудуется датчиками: оборотов ротора (например, бесконтактным ДОР-1) и момента на роторе (ДМ, КЭИ-ПЭ1 500 4/20), что позволяет, помимо частоты вращения (ω), получать данные о затрачиваемой на вращение колонны мощности ($N_{вр}$), которая рассчитывается компьютером как произведение величины момента на показатель частоты вращения.

Гидравлический механизм подачи оснащается манометром (например, *UniTrans*), что позволяет производить расчет осевого усилия исходя из величины фиксируемого манометром давления и геометрических параметров гидроцилиндров подачи.

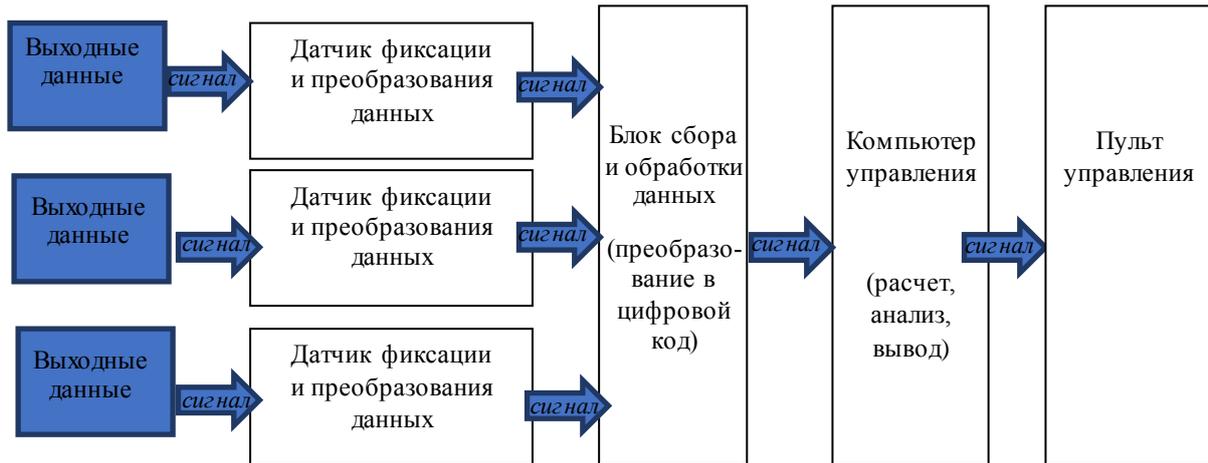


Рис. 1. Схема передачи информации в интерактивной системе управления процессом алмазного бурения
 Fig. 1. Scheme of information transfer in the interactive control system of the diamond drilling

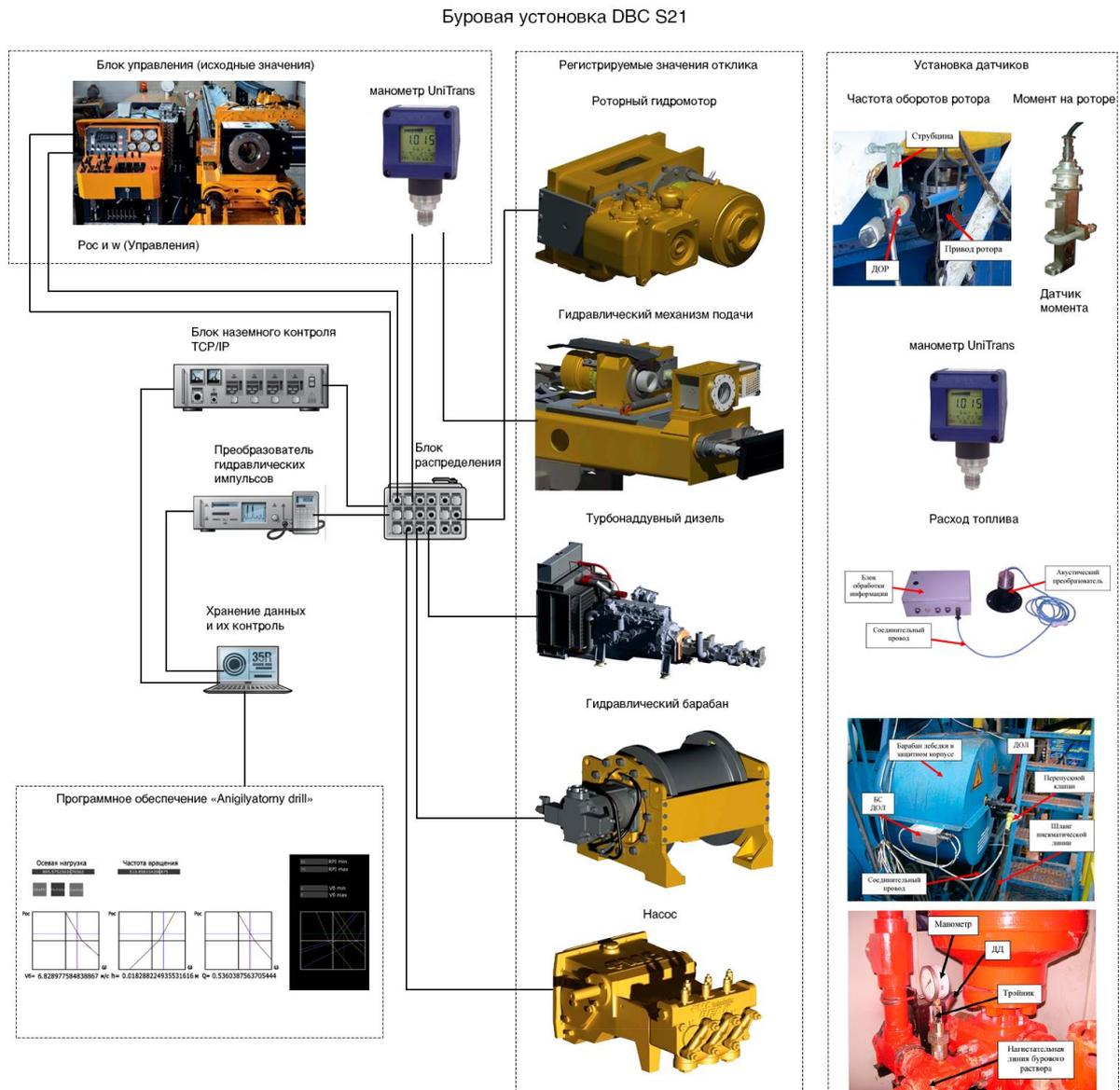


Рис. 2. Схема оборудования системы управления на примере бурового станка DBC S21
 Fig. 2. Scheme of equipment of the control system on the example of a drilling rig DBC S21

В случае подачи с лебедки в систему может вводиться датчик веса (типа ДНК-311-06), позволяющий путем преобразования усилия натяжения неподвижной ветви талевого каната в электрический сигнал или цифровой код вычислять параметры веса на крюке и осевой нагрузки на инструмент.

Учитывая особенности работы дизельного двигателя, его оснащение датчиком расхода жидкости (ультразвуковым расходомером, работа которого основана на действии акустического преобразователя) позволяет, исходя из фиксируемого значения расхода топлива (Q) в процессе бурения скважины, с учетом паспортных значений удельного расхода топлива агрегата (q), рассчитывать мощность на двигателе (N_d) как:

$$N_d = \frac{Q}{q}$$

С целью определения в любой момент бурения глубины скважины (и как следствие величины углубления за оборот $h_{об}$) буровая лебедка оборудуется датчиком оборота лебедки (ДОЛ). На сегодняшний день отечественные ДОЛ имеют техническое оснащение, рассчитанное на скорость до 1500 мин^{-1} (ТПГ) и до 2000 мин^{-1} (ЗАО

НППГА «Луч», ООО «Геотек-Прибор»). Используя показатели ДОЛ, углубление забоя скважины за исследуемый период времени определяют исходя из диаметра барабана лебедки и диаметра используемого каната.

Оснащение насоса расходомером и датчиком давления позволяет фиксировать и контролировать в процессе бурения показатель подачи промывочной жидкости.

Представленная система датчиков синхронизируется блоком распределения, от которого информация подается на блок наземного контроля, и через преобразователь импульсов сигнал в виде цифрового кода поступает на компьютер управления.

В данном случае система управления буровой установкой включает пульты, объединяющие в себе органы управления, цепи управления и исполнительные механизмы. Для реализации представленной интерактивной системы управления компьютеры, сетевой концентратор, источник бесперебойного питания и другая аппаратура монтируются в центральный шкаф. При этом вся аппаратура подключается друг к другу согласно схеме, представленной на рис. 3.

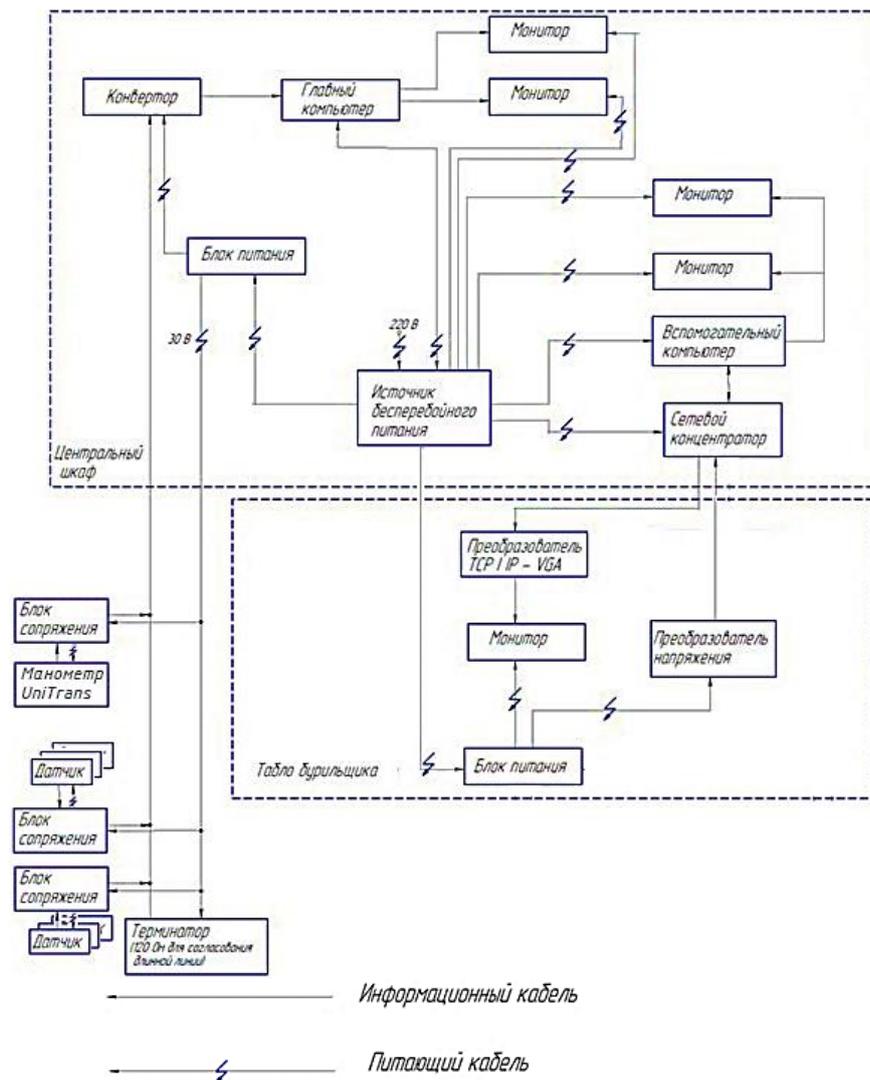


Рис. 3. Схема подключения электрооборудования
 Fig. 3. Electrical connection diagram

Преимуществом применения представленной схемы электрооборудования выступает возможность полной реализации мощности каждого агрегата для питания всех потребителей электроэнергии. К тому же схема предусматривает функцию параллельной работы нескольких дизель-генераторов, что в случае необходимости остановки одного из агрегатов обеспечивает бесперебойное резервирование электрооборудования, а также при подключении дополнительных устройств распределение нагрузки на каждый дизель-генератор.

В схеме входные гидравлические значения манометров с переводом в электрический сигнал собираются в конвертере с внешними откликами датчиков частоты вращения ротора, расхода жидкости, скорости бурения, натяжения троса, глубины, энергоёмкости. В главном компьютере программа соотносит и оптимизирует входные значения со значениями откликов внешних показателей бурения для оптимальной корректировки в режиме реального времени. В итоге на выходе критические, текущие и рекомендуемые значения параметров бурения отображаются на табло бурильщика.

Программное обеспечение

Имея представленную систему оборудования, надежно и быстро поставляющую информацию на компьютер управления, важным остается его программное обеспечение, способное верно распознавать получаемую информацию, обрабатывать ее, производить необходимые расчеты, строить математические модели зависимостей параметров бурения и графически интерпретировать их с целью поиска оптимальных значений.

Для реализации представленной системы интерактивного управления алмазным бурением разработан программный продукт «Anigilyatorn' drill». Программа написана на языке программирования *TouchDesigner*, преимуществом которого является совместимость с датчиками различной комплектации и возможность визуализации результатов обработки данных в виде систем математических моделей любой сложности и графиков зависимостей.

Исходя из типа и конструкции алмазного инструмента, согласно рекомендуемым производителем значениям показателя *RPI*, в окне ввода данных пользователем задаются критерии управления – требуемое значение показателя углубления за оборот (как величина обратная показателю *RPI*) и желаемый максимум механической скорости бурения (рис. 4, а).

Получая сигнал в виде цифрового кода, программа осуществляет сортировку и расчет текущих показателей датчиков: частоты вращения, момента на вращателе, давления в гидросистеме механизма подачи, расхода промывочной жидкости, количества оборотов лебедки, расхода топлива на двигателе и т. д. На основании полученных данных программа осуществляет комплекс расчетов, необходимых для определения параметров, в полной мере характеризующих процесс бурения, например, мощности на двигателе, мощности на вращателе, осевого усилия на инструмент, подачи промывочной жидкости, текущего значения углубления за оборот и т. д. Далее, согласно методу полного факторного эксперимента, формирует математические модели зависимостей параметров бурения и в виде графиков выводит на экран линии по каждому заданному значению (рис. 5).

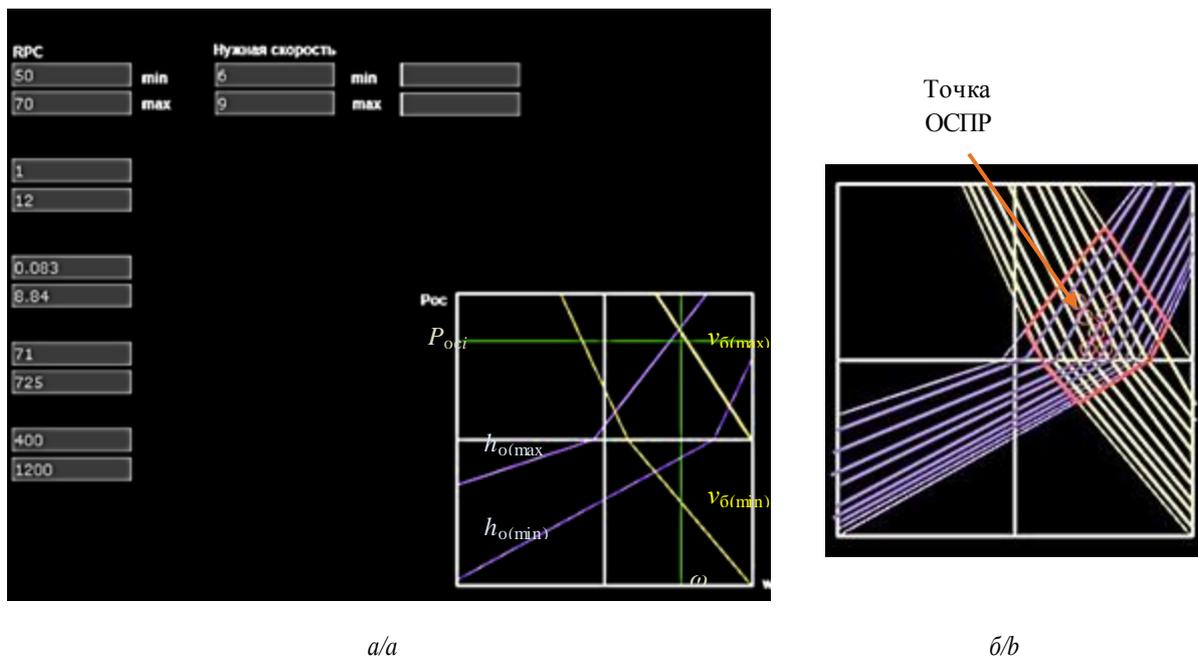


Рис. 4. Интерфейс программы Anigilyatorn' drill: а) общий вид; б) поиск оптимального сочетания параметров режима бурения

Fig. 4. Program interface Anigilyatorn' drill: а) general form; б) search for the optimal combination of drilling mode parameters

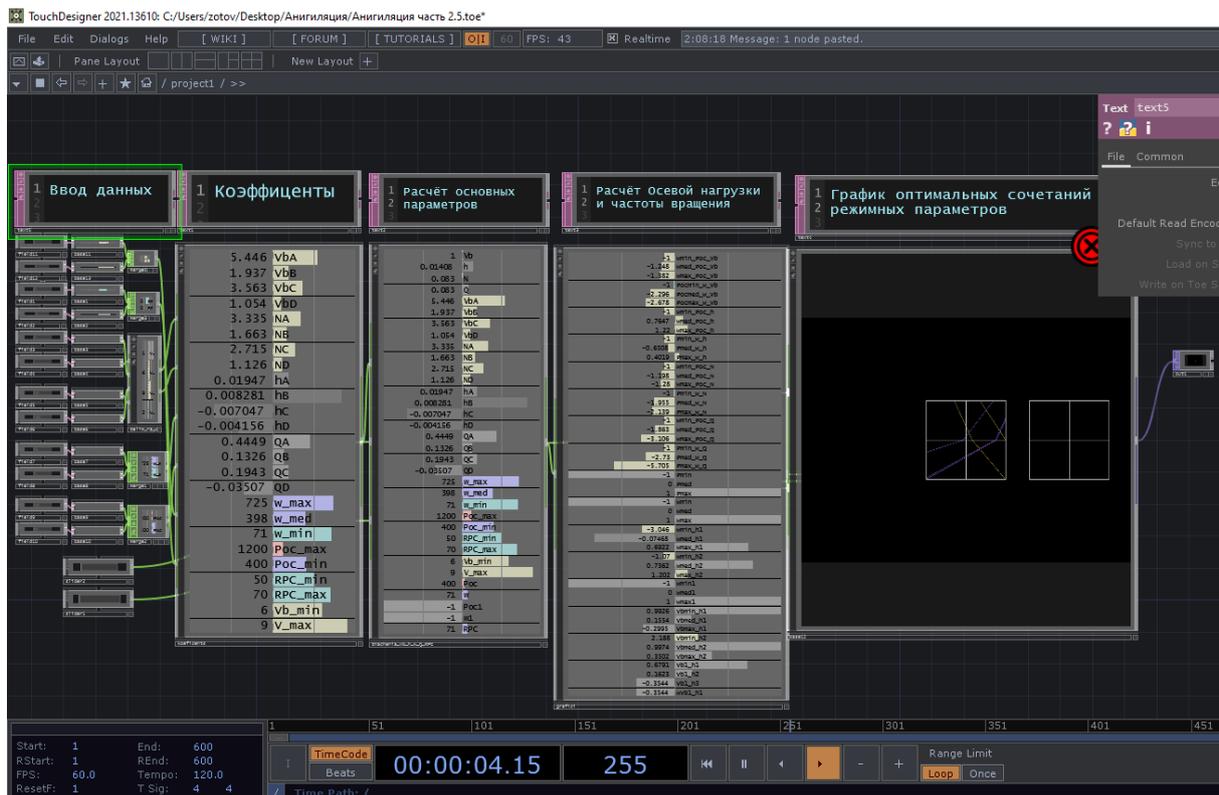


Рис. 5. Внутренняя структура работы программы Anigilyatorn' drill
 Fig. 5. Internal structure of the program Anigilyatorn' drill

Полученные линии являются результатом графической интерпретации математических моделей, отражающих зависимость механической скорости бурения (v_0) и углубления за оборот (h_0) от частоты вращения (ω) и осевой нагрузки (P_{oc}), полученных как:

$$v_0 = A + B \cdot P_{oc} + C \cdot \omega + D \cdot P_{oc} \cdot \omega;$$

$$h_0 = E + F \cdot P_{oc} + D \cdot \omega + H \cdot P_{oc} \cdot \omega;$$

где $A, B, C, D, E, F, H, K, L, M, S$ – коэффициенты, рассчитываемые в соответствии с методикой полного факторного эксперимента [1, 2, 10].

Пересечение графиков, отражающих реализацию максимально возможной скорости бурения ($v_{0(max)}$), минимально возможной скорости бурения ($v_{0(min)}$), максимально допустимого (по RPI) углубления за оборот ($h_{0(max)}$) и минимально допустимого углубления за оборот ($h_{0(min)}$), формирует многоугольник, который представляет собой область оптимального режима работы бурового инструмента (рис. 4). В любой точке выделенной области можно определить сочетание величин частоты вращения (ω_i) и осевой нагрузки (P_{oci}), при реализации которых осуществляется рациональное использование породоразрушающего инструмента. Для автоматизации процесса анализа полученной области оптимальных значений и перебора данных в программу заложен скрипт, позволяющий находить все точки пересечения значений параметров бурения, входящих в эту область, – точки оптимального сочетания параметров режима бурения (ОСПР) (рис. 4, б).

На протяжении всего процесса бурения программа рассчитывает текущий (в данный момент времени) показатель механической скорости v_i как произведение текущего значения углубления за оборот h_{0i} (из обработки данных ДОЛ) и частоты вращения (по сигналу от ДОР). Полученная величина механической скорости бурения v_i сравнивается со значением в предыдущий момент времени v_{i-1} . Если $v_i < v_{i-1}$, система сигнализирует о том, что скорость бурения падает. Если $v_i > v_{i-1}$, система делает вывод о росте скорости. Аналогично, имея, благодаря разработанной интерактивной системе датчиков, значение мощности, затрачиваемой на вращение колонны $N_{вр}$, и мощности на двигателе N_d , программой осуществляется расчет мощности, затрачиваемой на разрушение горной породы в текущий момент бурения N_i и реализуется анализ всех трех показателей. Если значение мощности в данный момент времени больше, чем в предыдущий, делается вывод о том, что затраты мощности повышаются, и наоборот [2].

Основываясь на исследовании механизма разрушения породы алмазным резцом [4, 5, 7, 15–17, 19], программа осуществляет регулирование показателей режима бурения так, чтобы значения частоты вращения и осевой нагрузки, оставаясь в пределах области оптимальных значений, позволяли достигать максимально возможной величины механической скорости бурения без критического повышения мощности [2]. На мониторе точка оптимального сочетания параметров режима бурения должна находиться как можно ближе к вершине полученного многоугольника ($v_{0(max)}$).

представленного на рис. 4, б. Например, когда механическая скорость падает, а мощность растет, точка ОСПР будет находиться в нижней части графического многоугольника. При этом на табло появляется сигнал о необходимости снижения частоты вращения и повышения осевой нагрузки. Такой маневр позволит снизить сопротивление инструменту и увеличить глубину внедрения его резцов в породу, что обеспечит эффективное разрушение горной породы без аномального износа режущей части инструмента [9, 18]. Верная корректировка режимов бурения отразится на графике в виде точки ОСПР, смещенной ближе к вершине многоугольника.

Случай, когда точка ОСПР выйдет за пределы многоугольника, указывает на износ инструмента и необходимость снижения критерия управления – углубления за оборот. При вводе уменьшенного на ступень (в допустимых показателем RPI пределах [1, 2, 10, 12]) показателя критерия управления программа перестраивает многоугольник области оптимального режима работы бурового инструмента и цикл управления повторяется.

Представленный метод сбора, обработки, анализа информации и управления буровым процессом является надежным способом повышения технико-экономических показателей бурения. При этом уровень точности и скорости реагирования на забойные процессы определяет качество проводимых работ. Представленный интерактивный анализ взаимодействия бурового инструмента с забоем осуществляется в конкретных временных рамках с заранее заданным шагом обработки данных. То есть результат достигается в определенных точках отмеченной области, при этом промежуточный результат остается необрабо-

ванным. Для ускорения дальнейшего процесса обработки данных и охвата всей области оптимальных параметров бурения в программе заложена функция сбора и хранения значений и результатов возможных откликов системы. Наличие такой базы данных способствует быстрому реагированию системы. Непрерывно собирая и храня информацию, полученную в процессе управления, программа повышает результативность ее применения, т. е. является самообучаемой.

С этой целью в алгоритм программного обеспечения компьютера управления заложен разработанный скрипт, позволяющий находить значения всех точек пересечения графиков v_0 и h_0 , входящих в область оптимальных значений параметров бурения для данных условий проводимых работ (рис. 4). Количество линий (k) определяется как

$$k = v_{0\max} - v_{0\min} / n.$$

Программа производит перебор параметров с шагом $v_{0\min} + k$ до тех пор, пока критерий $v_{0\max}$ не достигнет значения $v_{0\min} + k = v_{0\max}$. Таким образом для каждой точки $v_{0\min} + k$ находятся все соотношения осевой нагрузки P_{oc} и частоты вращения ω . Далее происходит отсортировка по значению частоты вращения ω в линиях графиков значений $h_{0(\min)}$ и $h_{0(\max)}$ с целью выделения граничных условий.

Параметр осевого усилия P_{oc} кодируется от $-1,0$ до $1,0$ с шагом $0,1$. При $P_{oc} = -1$: $\omega_{h(\max)} < \omega < \omega_{h(\min)}$. Алгоритм продолжается до тех пор, пока не будут отсортированы все P_{oc} и ω по значению $v_{0\min} + k = v_{0\max}$.

Запуск написанного скрипта *text10* (рис. 6) на выводе формирует таблицу данных всех комбинаций P_{oc} и ω , входящих в оптимальную область значений с откликом на значение углубления за оборот.

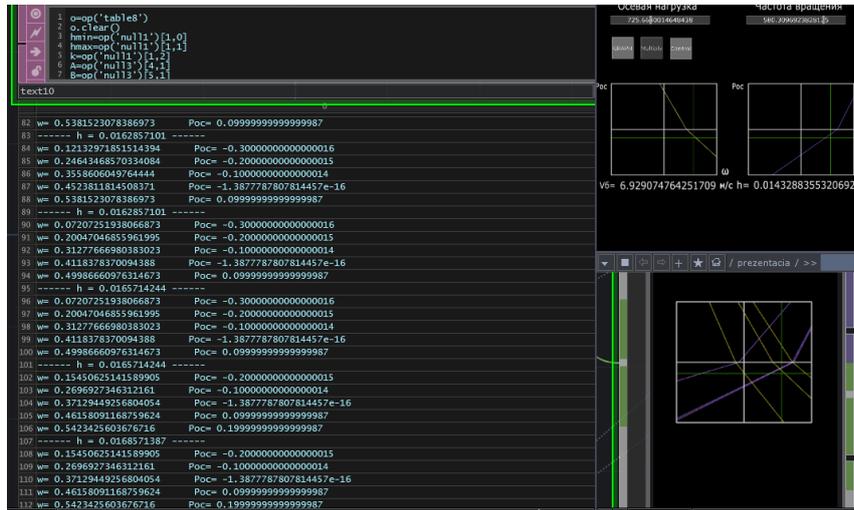


Рис. 6. База данных значений, входящих в оптимальную область значений

Fig. 6. Database of values included in the optimal range of values

По мере наполнения такой базы данных реакция системы на условия бурения ускоряется за счет синхронизации отклика и фактора, снятого с датчиков. При изменении буровой ситуации программа автоматически находит кратчайший путь для возвращения режима бурения в область оптимальных значений.

Выводы

1. Достижение наилучших технико-экономических результатов алмазного бурения возможно за счет автоматизации управления, основанного на интерактивной системе взаимодействующих устройств, работа которых описывается алгоритмом управ-

- ления на основе комплексного анализа трех критериев процесса бурения.
2. Система сбора и обработки информации, предназначенная для контроля технологических параметров алмазного бурения, может представлять собой комплекс наземного оборудования, который может включать:
 - блок управления;
 - блоки концентратора связи;
 - пульт управления;
 - технологические датчики;
 - соединительных кабелей;
 - вычислительный комплекс.
 3. Разработанная интерактивная система датчиков, интегрированных в вычислительный комплекс, включающий компьютеры и соответствующее программное обеспечение, позволяет учитывать основные особенности условий проведения буровых работ, сбор, обработку и систематизацию данных на основе метода полного факторного эксперимента и, таким образом, является основой качественного управления процессом алмазного бурения, основными параметрами которого являются высокие механическая скорость бурения и эффективный ресурс бурового инструмента.

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. Алгоритм управления системой алмазного бурения / В.В. Нескоромных, М.С. Попова, З.Г. Зотов, Б. Лю // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 2. – С. 81–89. DOI: 10.18799/24131830/2022/2/3562.
3. Принципы конструирования и эксплуатации алмазного породоразрушающего инструмента / А.А. Буканов, Л.К. Горшков, А.И. Осечкин, 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.
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., Ehmann 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. I. – 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. – № 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. – V. 37 (13). – P. 1913–1929.

Поступила: 14.02.2023 г.

Прошла рецензирование: 10.03.2023 г.

Информация об авторах

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

Нескоромных В.В., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой 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.

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

UDC 622.24.08

MODERN BASIS OF AUTOMATION OF DIAMOND DRILLING CONTROL

Marina S. Popova¹,
alleniram83@mail.ru

Vyacheslav V. Neskoromykh¹,
sovair@bk.ru

Zakhar G. Zotov¹,
zotovz2@bk.ru

Liu Baochang²,
liubc@jlu.edu.cn

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

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

The relevance. Diamond drilling is one of the promising and versatile methods of well drilling, which makes it possible to achieve high drilling speeds at great depths of work. At the same time, an expensive diamond tool needs to save a resource. The developed method for managing diamond drilling based on a comprehensive analysis of criteria using the method of a full factorial experiment is effective if it is implemented in real time. Thus, the problem of developing an automated control system for the diamond drilling mode, which makes it possible to save the resource of the tool while ensuring high rates of mechanical drilling speed and minimal power consumption, is topical. This approach will improve the technical and economic results of diamond drilling.

The aim of the work is to develop a reliable interactive system of ground sensors and a computer complex that allows implementing automated control of diamond drilling based on a comprehensive analysis of criteria that fully characterize complex drilling and operate in real time.

Objects: diamond drilling, interactive systems, devices and sensors of the latest generation.

Methods: analytical research, computer simulation, full factorial experiment.

Results. The paper introduces the system of sensors and computing unit, consisting of computers and software, capable of collecting and processing information in detail, which makes it possible to give a full assessment of the work of the tool at the bottomhole. The authors describe the scheme of interaction of devices for automation of diamond drilling. The paper introduces the detailed description of the software operation from the sensor signal to the display of the results on the display screen and the characteristic of the result of the application of an automated control system for diamond drilling.

Key words:

drilling, control, optimization, algorithm, drilling mode, automation, software.

REFERENCES

- Neskoromykh 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.
- Neskoromykh V.V., Popova M.S., Zotov Z.G., Liu Baochang. Algorithm of diamond drilling system control. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 2, pp. 81–89. In Rus.
- Bukanov A.A., Gorshkov L.K., Osetskiy A.I., Soloviev N.V. Printsipy konstruirovaniya i ekspluatatsii almaznogo porodora-zrushayushchego instrumenta [Principles for the design and operation of diamond rock cutting tools]. *Razvedka i ohrana nedr*, 2013, no. 7, pp. 44–49.
- 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.
- 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.
- 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 mestorozhdenij*, 2011, no. 2 (39), pp. 205–209.
- 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.
- 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.
- 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.
- Neskoromykh V.V. *Optimizatsiya v geologorazvedochnom proizvodstve* [Optimization in geological survey production]. Moscow, INRA-M Publ.; Krasnoyarsk, SFU Publ., 2013. 246 p.
- Tretyak A.Ya., Popov V.V., Grossu A.N., Borisov K.A. Innovative approaches to the design of highly efficient rock cutting tools. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*, 2017, no. 8, pp. 225–230. In Rus.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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* [Materials of regional conference of geologists from Siberia, far east and North-East of Russia]. Tomsk, 2000. Vol. I, pp. 463–465.
18. Neskromnykh 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: 14 February 2023.

Reviewed: 10 March 2023.

Information about the authors

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

Vyacheslav V. Neskromnykh, Dr. Sc., professor, head of the Department of Technology and Equipment of Investigation, Siberian Federal University.

Zakhar G. Zotov, student, Siberian Federal University.

Liu Baochang, professor, Jilin University.